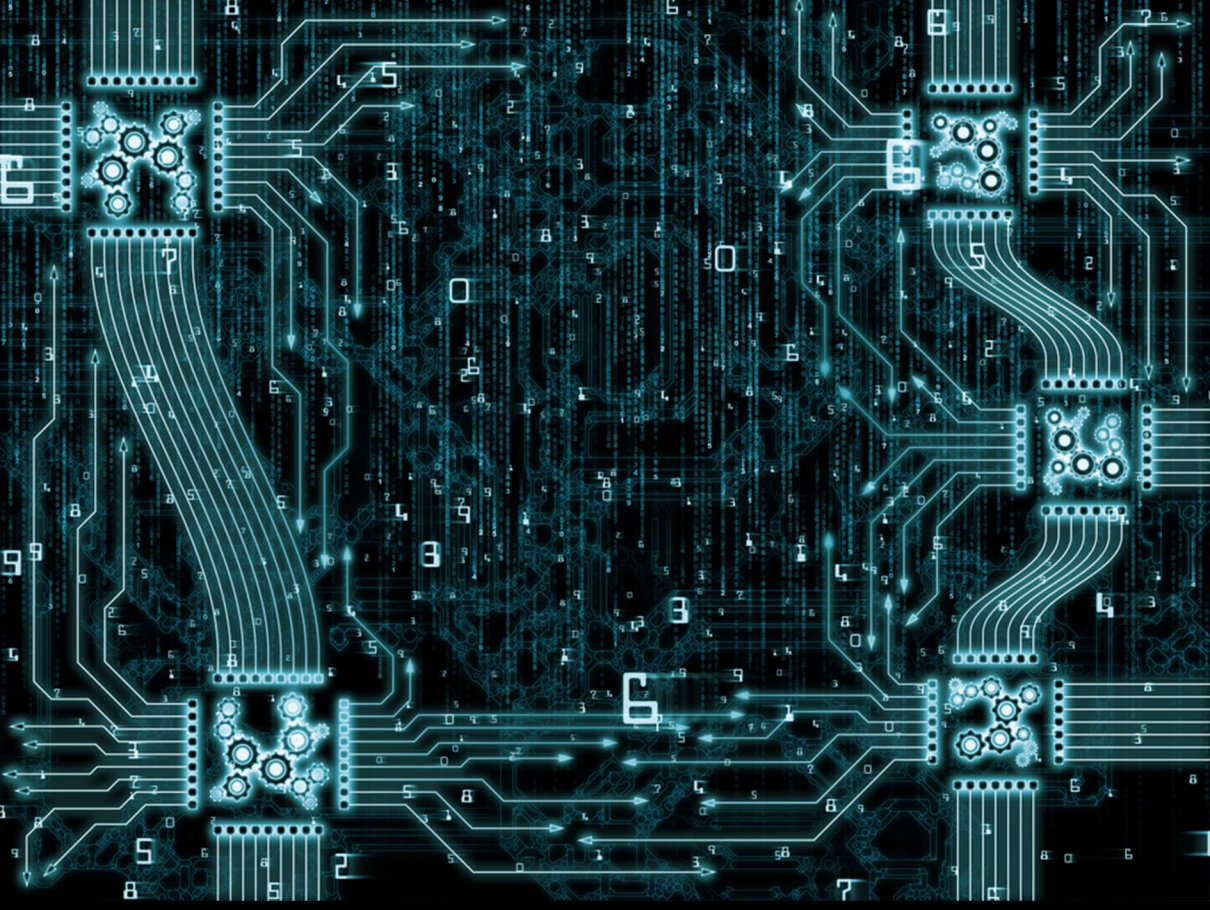


Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler

Editörler:

Prof. Dr. Birol KILIÇ

Prof. Dr. Gülden BAŞYİĞİT KILIÇ

DUVAR

Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler

Editörler:

Prof. Dr. Birol KILIÇ

Prof. Dr. Gülden BAŞYİĞİT KILIÇ

Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler
Editörler: Prof. Dr. Birol KILIÇ- Prof. Dr. Gülden BAŞYİĞİT KILIÇ,

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design
Baskı: ARALIK 2022
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-8261-68-4

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvaryayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

*Baskı ve Cilt:*REPRO BİR
Repro Bir Mat Kağ. Rek. Tas. Tic. Ltd. Şti.
İvogsan 1518. Sokak 2/30 Mat-Sit iş Merkezi Ostim
Yenimahalle/Ankara

İÇİNDEKİLER

İNŞAAT 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN GAYRİMENKUL SEKTÖRÜNÜN DİJİTALLEŞMESİNE ETKİSİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR UYGULAMA **9**
Adnan AVŞAR, Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇOLAK

MERMER ATIKLARININ BETON TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI VE BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ
Öğr. Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL

DOĞAL LİF TAKVİYELER **47**
Ali AVCI,Ayşegül AKDOĞAN EKER, Mehmet Safa BODUR

SİLİKA NANOPARTİKÜL ÜRETİMİNDE BADEM KABUĞUNUN KULLANIMI **65**
Doç.Dr. Başak MESCİ OKTAY, Prof. Dr. Feza GEYİKÇİ

BİYOBOZUNUR METAL VE ALAŞIMLAR **81**
Dr. Öğr. Üyesi Bekir YAVUZER

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE VERİM ARTTIRMAYA YÖNELİK ÇALIŞMALAR **99**
Muhammed ŞULE, Can COŞKUN, Zuhal OKTAY

TEKSTİL İŞLETMELERİNDE RİSK ANALİZİ UYGULAMALARI **117**
Dr. Öğr. Üyesi Celal Güngör, Pınar Coşkun

ISM BANDI UYGULAMALARI İÇİN GENİŞ-BANT TEKSTİL ANTEN TASARIMI **133**
Dr. Öğretim Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN
Araştırma Görevlisi Cem GÜLER

MİKROAKIŞKAN TEKNOLOJİSİNİN NANOPARÇACIK SENTEZUYGULAMALARINDAKİ YERİ **151**
Dr. Öğr. Üyesi Ceyda ÖKSEL KARAKUŞ

ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE XANTHAN GUM KULLANIMI **169**
Dr. Öğretim Üyesi Çiğdem CEYLAN

JEOTERMAL ALANLARIN JEOLOJİK, JEOKİMYASAL VE JEOFİZİKSEL YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI **191**
Dr. Didem KIRAY, Dr. Öğr. Gör. Oya CENGİZ

KALSİYUM LİGNOSULFONAT İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLLİ BİR ZEMİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ **211**
Dr. Öğr. Üyesi Erdinç KESKİN,
İnşaat Yüksek Mühendisi Şükrü Çağdaş KALKAN

VAN GÖLÜ KİRLİLİK DURUMU VE GELECEĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA **231**
Erkan MARHAN, İbrahim KOÇ

MARMARA DENİZİ İSTANBUL-TEKİRDAĞ HATTINDA, SEDİMENTTEKİ, KENTSEL VE SANAYİ KAYNAKLI AĞIR METAL VE ORGANİK MADDE KİRLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÖNLEMLER **249**
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah YİNANÇ

PARSEL VE ADA BAZLI YAPILAŞMANIN KARŞILAŞTIRMASI VE ŞEHİRLEŞMEYE ETKİLERİ; OSMANİYE ÖRNEĞİ **269**
Fazıl NACAR

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRÜN GELİŞİMİ İÇİN ATIK BİYOKÜTLENİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÇEVRESEL ETKİNİN AZALTILMASI **291**
Dr. Öğr. Üyesi Gamze GÜNDÜZ MERİÇ

YÜKSEK BİNALARDA TAŞIYICI SİSTEMLER **303**
Dr. Öğr. Üyesi Gülhan İNCE

KARAR AĞAÇLARIYLA KAYMA TEST VERİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI **325**
Gültekin ÇOŞKUN, Gencay SARIIŞIK

R ORTAMI ÖZEL VERİ SETLERİNİ TAHMİN ETMEK İÇİN ZAMAN SERİSİ ALGORİTMALARINI HİBRİT MODELLERLE BİRLEŞTİRME **341**
Öğr. Gör. İbrahim Halil ÜNLÜK

HAFİF BETON ve HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANILAN YAPI MALZEMELERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA
Öğr. Gör. Dr. İbrahim PINARCI

DİJİTAL DÖNÜŞÜM ÇAĞINDA GELECEĞİN MESLEKLERİ **373**
Öğr. Gör. İlhan UYSAL

DENİM ATIKLARINDAN YAPILAN UPCYCLE DOKUMALAR **385**
Güler ÖNCÜ, Meruyert KAYGUSUZ

ISPARTA İLİNİN EKİM 2020-MART 2021 TARİHLERİ ARASINDAKİ HAVA KALİTE PARAMETRELERİNİN HYSPLIT PROGRAMI İLE MODELLENMESİ **399**
M. Yunus PAMUKOĞLU, Ali TEKELİ[2]

GÖMÜLÜ SİSTEMLERDE İŞLEVSEL GÜVENLİK VE GÜVENCE **435**
Dr. Öğ. Üy. Mustafa Engin

OLAY GÜDÜMLÜ MOLEKÜLER DİNAMİK SİMÜLASYONUNUN GELİŞİMİ VE MODELLENEN SEYREK GAS DİNAMİĞİ SİMÜLASYONLARINA GENEL BAKIŞ **453**
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇ

JET GROUT VE TAŞ KOLON YÖNTEMLERİ İLE SIVILAŞMA ANALİZİ: TERME (SAMSUN) ÖRNEĞİ **469**
Onur Cafer KURT, Doç. Dr. Mustafa VEKLİ

ASFALT BETON MALZEMELERİN KARMA MOD I-II KIRILMA ÖZELLİKLERİNİN VE TOKLUK DEĞERİNİN BELİRLENMESİNDE BİR ASTM STANDARDININ FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI **481**
Nazife Erarslan

POLİMERLERİN LAZER İLETİM KAYNAĞI: KAYNAK PARAMETRELERİ, KAYNAK KALİTESİ VE UYGULAMALAR ÜZERİNE ARAŞTIRMA **503**
Dr. Öğretim Üyesi Nilay Küçükdoğan Öztürk

VERMİKÜLİTLERİN ENDÜSTRİYEL OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ **513**
Dr. Öğr. Üyesi Nükhet ŞAPCI

DOĞAL GÖZENEKLİ AGREGALARIN ÇİMENTO ESASLI HAFİF HARÇ ÜRETİMİNDE KULLANIMI **523**
Dr. Öğr. Üyesi Nükhet ŞAPCI

GÜNEŞ GÜÇ KULELERİNDE HELİOSTAT YERLEŞİMLERİNİN ENERJİ ÜRETİMİNE ETKİSİ **539**
Onur Mahmut Pişirir, Okan Bingöl

KÜRESEL GELİŞMELER IŞIĞINDA TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ **555**
Doç.Dr.Ramazan ŞENOL

AKUAPONİK SİSTEMLERDE UV FİLTRELERİN İNCELENMESİ **567**
Burcu ÇELİK, Doç.Dr.Ramazan ŞENOL, Dr. Öğr. Üyesi Halit BAYRAK

ZNO NANOYAPILI MALZEMELERİN ODA SICAKLIĞINDA ÇALIŞAN GAZ SENSÖRLERİNDE KULLANIMI **579**
Dr. Öğr. Üyesi Selda Topçu Şendoğdular, Dr. Öğr. Üyesi Levent Şendoğdular

CNC KOORDİNAT SİSTEMİNE VE PROGRAM KODLAMASINA GİRİŞ **595**
Dr. Öğr. Üyesi, Selim BACAK

KARNAUBA VE BALMUMU VAKSLARI İLE HAZIRLANAN OLEOJELLERİN DSC VE FT-IR SPEKTROSKOPİSİ İLE KARAKTERİZASYONU **611**
Selvanur KARA, Dr. Öğr. Üyesi Halime PEHLİVANOĞLU

SİBER GÜVENLİK VE DOS SALDIRILARI **631**
Dr. Semih Çakır Dr. Nesibe Yalçın

EKTRÜZYON İLE ÜRETİLEN DOLGU TAKVİYELİ TERMOPLASTİKLERİN ERİYİK AKIŞ İNDEKSLERİ VE YOĞUNLUK DEĞİŞİMLERİ **647**
Doç. Dr. Yılmaz KISMET, Pamuk AYİKURT

RÜZGÂR HIZI POTANSİYEL HESABINDA KULLANILAN DAĞILIM YÖNTEMLERİ **659**
Doç. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ, Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

ÜRETKEN TASARIM (GENERATIVE DESIGN) YÖNTEMİ **671**
Süleyman KILIÇ

YENİLİKÇİ TASARIMLAR İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU **683**
Doç. Dr. Vedat Taşdemir, Doç. Dr. Ömer Seçgin

TÜRKİYE, RUSYA VE İNGİLTERE İÇİN CO2 EMİSYON TAHMİN ANALİZLERİ **697**
Doç. Dr. Zeydin PALA

DeepAR İLE SICAKLIK TAHMİNİ **709**
Doç. Dr. Zeydin PALA

BİYOKOMPOZİTLERİN TERMAL ÖZELLİKLERİ **721**
Ali AVCI, Ayşegül AKDOĞAN EKER, Mehmet Safa BODUR

ENDÜSTRİYEL NANOMALZEMELER: KARAKTERİZASYON, BİYOLOJİK AKTİVİTE VE YASAL DÜZENLEMELER **743**
Dr. Öğr. Üyesi Ceyda ÖKSEL KARAKUŞ

BİYOKÜTLE ATIKLARINDAN HİDROTERMAL İŞLEM İLE KATI YAKIT ÜRETİMİ **765**
Dr. Öğr. Üyesi Gamze GÜNDÜZ MERİÇ

KAYMA DİRENCİ VE TEST YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ **775**
Gültekin ÇOŞKUN, Gencay SARIIŞIK

KAYMA ÇERÇEVELERİNİN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİNDE TAŞIMA MATRİSİ YÖNTEMİ **793**
Kanat Burak BOZDOĞAN, Duygu ÖZTÜRK

MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI AKILLI KLİNİK KARAR DESTEK SİSTEMLERİ **809**
Merve ERKINAY ÖZDEMİR

POLİETİLEN TEKNE ÜRETİMİ **823**
Mustafa KAFALI

HDPE MALZEMENİN TEKNE GÖVDESİ ÜRETİMİNDE KULLANIMI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA **835**
Mustafa KAFALI

ARAÇLARIN İNTERNETİ **847**
Hakkı SOY

NORMAL FAYLAR ETKİSİYLE OLUŞMUŞ JEOMORFOLOJİK YAPILAR **863**
Serap ÇOLAK EROL

TERS FAYLAR ETKİSİYLE OLUŞMUŞ JEOMORFOLOJİK YAPILAR **881**
Serap ÇOLAK EROL

GÖL TUZUNUN KURUTULMASINA HAVA HIZININ ETKİSİ **893**
Sultan PEKTAŞ, Soner ÇELEN, Aytaç MORALAR

EKSENEL AKIŞLI SOĞUTMA FANLARI İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAKLAŞIMIYLA AKIŞ ANALİZİ UYGULAMASI **903**
Aytaç MORALAR

ALİAĞA (İZMİR) BAZALTLARININ MEKANİK STABİLİZASYON TEMEL PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ **915**
Hakan ELÇİ, Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU

ÇAM İĞNESİNİ KULLANARAK SiO2 ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI **929**
Doç.Dr. Başak MESCİ OKTAY, Prof. Dr. Feza GEYİKÇİ

YENİ NESİL DERLEYİCİ TASARIM PLATFORMU: LLVM KOMUT SETİ MİMARİSİ **941**
Fatih TOPALOĞLU

DOĞAL TAŞLARIN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN GABİON DUVAR UYGULAMALARI AÇISINDAN UYGUNLUĞUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ **955**
Hakan ELÇİ, Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU

İNŞAAT 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN GAYRİMENKUL SEKTÖRÜNÜN DİJİTALLEŞMESİNE ETKİSİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR UYGULAMA*

Adnan AVŞAR[1]
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇOLAK[2]

[1]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,0000-0002-6599-4099
[2]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, 0000-0003-0058-6809

**Bu yayın "DİJİTAL GAYRİMENKUL İÇİN İNŞAAT 4.0" adlı yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.*

1. **GİRİŞ**

Kullanılan malzeme ve uygulamaların sürdürülebilir olmaması nedeniyle verimin düşük olduğu günümüz gayrimenkul sektörü; deneyimlerimizi oluşturacak yaşam alanlarını uygun fiyatlarla oluşturamaması, konut üretim talebini karşılayamaması ve sera gazı emisyon salınımının düşük seviyelerde tutulamaması nedeniyle doğal bir değişim sürecine girmiştir. Bu değişim süreci Endüstri 4.0'ın olgunlaşan teknolojilerinin kullanılmasıyla gayrimenkul sektörünün dijitalleşmesini de sağlamaktadır.

Dijital gayrimenkul, dijitalleşme ve inovasyon ile yetenek ve bilgi düzeyinin artırılması, kaliteli ve dayanıklı işler yapılması, paydaş katılımının artırılması (kamu ve özel iştiraklerin birlikte çalışması) ve yasal yapı oluşturulması olarak tanımlanmaktadır (Dünya Ekonomik Formu, 2021). Öte yandan dijital gayrimenkulün yapısını; gayrimenkul finans teknolojileri, paydaş ekonomileri, akıllı bina teknolojileri ve İnşaat 4.0 oluşturmaktadır. Bu sektörler arasında ise İnşaat 4.0'ın doğrudan ve dolaylı olarak dijital gayrimenkulün 1/3'ünü oluşturması (Baum, 2017) nedeniyle inşaat sektörünün bu teknolojiye geçişi, gayrimenkul sektörünün geleceğinin şekillenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir.

Toplumlar ve ekonomiler için hayati önem taşıyan ve insanların yaşamlarını sürdürdükleri alanlar olan binalar ve şehirler daha iyi tasarlanıp inşa edilmesi gerekliliği nedeniyle gayrimenkul endüstrisinin bu ihtiyaca yanıt vermesi bir zorunluluktur. Günümüz gayrimenkul alanında yaşanan sıkıntıların başlıca sebebi, kullanılan malzeme ve uygulamaların sürdürülebilir olmaması nedeniyle maliyetlerin yüksek olmasıdır. Ayrıca mevcut inşaat endüstrisinde verim her geçen gün azaldığı ve bu durumun gayrimenkul sektöründe ciddi kayıplara yol açtığı ve açmaya devam edeceği öngörülmekte olup, İnşaat 4.0 ile bu sorunların büyük ölçüde aşılabileceği düşünülmektedir.

Bu nedenle inşaat endüstrisindeki eğilimlerin ve boşlukların daha iyi analiz edilmesini sağlamak amacıyla inşaat şirketlerinin faaliyet alanlarının ve türlerinin 4.0 teknoloji bileşenlerini kullanma düzeyleri üzerindeki etkisi ile bu teknoloji bileşenlerinin şirketin performansı üzerindeki etkisi anket yöntemi kullanılarak bu çalışmada araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde İnşaat 4.0 teknolojileri ve gayrimenkul sektörü ile ilgili kavramsal çerçeve verilmiştir. Üçüncü bölümde elde edilen veriler analiz edilerek bulgularına yer verilmiş, son bölümde ise sonuçlar verilmiştir. Ulusal ve uluslararası literatür incelendiğinde bu kapsamda bir çalışmanın olmaması araştırmanın önemini ve literatüre olan katkısını göstermektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVRE

2.1. Günümüz Gayrimenkul Sektörü

Önemli bir yatırım varlığı sınıfı olan Gayrimenkul, dünya GSYH'nın %10'nu oluşturmaktadır. Düşük faiz oranları ve artan menkul kıymetleştirme ile önemli bir yatırım aracına dönüşen gayrimenkul sektöründe, son on yılda yıllık % 3 lük bir büyüme oranı ve yıllık % 14 lük bir yatırım hacmi artışı yaşanmıştır.(Jones Lang LaSalle Incorporated ve Global Real Estate Perspective, 2021) Jones Lang LaSalle Incorporated'e göre, 2007 yılında yüksek bir ticari işlem hacmine sahip olan gayrimenkul işlem hacimleri, 2009'dan itibaren istikrarlı bir şekilde artarak 2019'da rekor seviyeye ulaşmıştır. 2020 yılı ise birden fazla krizin (halk sağlığı, sosyal ve ekonomik) yaşandığı bir yıl olduğundan dolayı işlem hacimlerinde bir düşüş yaşanmıştır. Yatırımcılar 2019'da daha ihtiyatlı hale gelirken, devlet tahlilleri, sağlam getiriler ve istikrarlı bir yayılma ile oldukça likit kalarak dayanıklılığını ve istikrarını korumuşlardır. 2030'da dünya genelinde, gayrimenkul sektörünün GSYH'nın yaklaşık % 14,7'ye ulaşması beklenmektedir.

Geleneksel inşaat yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı ülkelerde**, bu yöntemlerin** istihdam kaynağı oluşturmakta olumlu etkilerinin olduğu ancak endüstriyel teknoloji kullanımının, yapılarda iş gücü kullanımı teknolojinin tipine göre % 5-50 oranında azalttığı tespit edilmesine karşın gelişmiş teknolojilerin istihdamı kısıtlayan etkileri inşaat malzemeleri ve makineleri sayesinde yaratılacak yeni iş olanakları, üretim artışının getireceği ekonomik gelişme şantiyelerde kullanılan işgücünde süreklilik sağlanması ve mevcut işgücünün belli bir oranının prefabrik üretimine geçen fabrikalara kaydırılma imkânı ile önemli ölçüde azaltılacaktır. (Yazıcıoğlu, 1981)

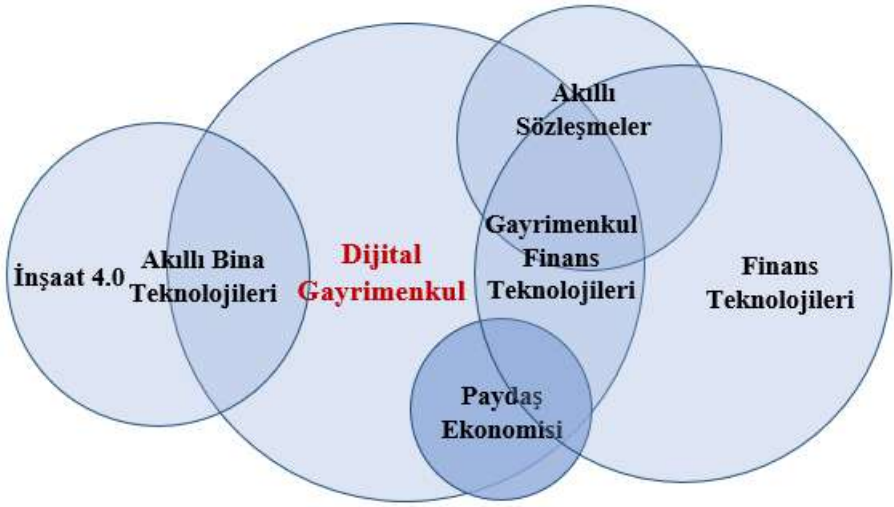
Teknoloji seçiminde bir diğer belirleyici etmen, özellikle konut inşaatında yaygın olarak görülen kalite düşüklüğünün kalitesiz malzeme kullanımının yanı sıra niteliksiz işçi kullanımından da kaynaklandığı ve Türkiye'de nitelikli işgücünün yetersizliği verimin düşmesine neden olduğu için işgücünün niteliğidir. (Gürel, 1995).

2.2. Gayrimenkul Sektörünün Geleceği: Dijital Gayrimenkul

Dijital Gayrimenkul, binaların ve şehirlerin verilerinin derlemesinde, işlenmesinde ve tasarımında teknoloji odaklı inovasyon konusunda gayrimenkul sektöründe ve tüketicilerinde bir zihniyet değişikliğine neden olan bir hareketi tanımlamaktadır. (Baum ve Dearsley, 2019).

Çevrimiçi bir Dijital Gayrimenkul'ün veritabanını yöneten ve sunan Unissu, bir varlığın yaşam döngüsüne dayalı olarak Dijital Gayrimenkul pazarını kategorize etmek için alternatif bir yaklaşım benimsemketedir. 7.000'den fazla

şirketten oluşan örneklemleri İnşaat 4.0'ı içermekte, ancak Baum'un metodolojisi ile aynı ölçüde 'paylaşılan ekonomi'yi dikkate almamaktadır.. Unissu'nun kurucu ortağı Eddie Holmes konuyu şöyle açıklamaktadır: "Her zaman bir Dijital Gayrimenkul işinin, inşadan yıkıma kadarki tüm süreci içerdiğini, temel gayrimenkul'ün yaşam döngüsü ile ilgili olarak kullanılacak teknolojiyi sağlayan bir şirket olduğu ilkesi üzerinde çalıştık." Bir başka Dijital Gayrimenkul veri sağlayıcısı olan CRETech, gayrimenkul ve emlak teknolojisi şirketlerini genel gayrimenkul alanında veya yazılım, donanım alanlarında hizmet veren özel şirketler olarak sınıflandırmaktadır. Küresel gayrimenkul firması CBRE ise garimenkulün yaşam döngüsündeki yeri veya sunduğu hizmete göre değil, belirlenen beş piyasa verimsizliğinden hangisini çözmeye çalıştığına göre Dijital Gayrimenkul'ü sınıflandırmış ve Dijital Gayrimenkul'ü, verimliliği, görünürlüğü, deneyimi, esnekliği ve üretkenliği artırmak için teknolojiyi kullanan herhangi bir gayrimenkul şirketi olarak ifade etmiştir (CBRE, 2019).



Şekil 1. Dijital Gayrimenkul'ün Yapısı

2.3. İnşaat 4.0 ve Dijitalleşme

Dijitalleşme, ulaşılabilir bilgilerin herhangi bir bilgisayar, akıllı telefon, tablet vb. teknolojik araçlar tarafından okunabilecek, o ortamlarda düzenlenebilecek ve iş akışlarına dahil edilecek şekilde dijital ortama aktarılması sürecine verilen ad olarak tanımlanabilir (Çalışkan, 2020). Dijitalleşme, uyumlu olmayan bir bilgi iletişim teknolojisi altyapısına sahip olmak anlamına gelmemektedir. Sahip olunan kaynakların, işletmeye değer katacak sonuçlara dönüştürme sürecini ifade etmektedir. İşletmelerin yeni iş modelleri geliştirmesi,

yeni ürün ve hizmetlerin yaratılması ve işletmenin sahip olduğu tüm kaynaklarını etkin kullanılabilmesi sürecinde teknoloji ile uyumlaştırabilmek anlamına gelmektedir (Accenture, 2015).

Dijitalleştirme faaliyetlerinin bütün sektörlerde olduğu gibi gayrimenkul sektörü üzerindeki etkisi de her geçen gün artırarak sürdürecektir yani binaların kullanımı, binaların işletilmesi ve yönetimi ve sermaye piyasaları dahil olmak üzere Dijital Gayrimenkul'ün tüm alanlarında etkisi her geçen gün daha da artacaktır. Bunu değişimi sağlayacak dijitalleşmenin temel teknolojileri şunlardır;

- İnternet Siteleri ve Akıllı Telefon Uygulamaları,
- Uygulama Programı Arayüzleri (UPA'ları),
- Büyük Veri Analizi,
- Nesnelerin İnterneti (Nİ),
- Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi,
- Blok Zinciri,
- Sensörler,
- Sanal ve Artırılmış Gerçeklik (SG ve AG),
- Konum Teknolojisi ve 5G Teknolojileri,
- Bulut Bilişim,
- Siber Fiziksel Sistemler (SFS),
- Siber Güvenlik

İnşaat 4.0, tüm dijital teknolojilerin birbirleriyle iletişim ve etkileşimde kullanıldığı ve inşaat sektörünün dijitalleşmeye başladığı yeni bir dönem olarak tanımlanabilir. İnşaat 4.0'ın, tüm ekipmanların internete ve birbirine bağlı olduğu ve inşaat projesinin her bir parçasının drone ve sanal simülasyonlar aracılığıyla izlenebildiği ve yönetilebildiği dijital bir şantiye binasının oluşturulmasına dayandığı belirtilmektedir. (Osunsanmi vd., 2018, Oesterreich ve Teuteberg, 2016). İnşaat 4.0 kavramı, Endüstri 4.0'ı meydana getiren modern teknolojilerin ve yeni üretim tekniklerinin inşaat projesi yaşam döngüsü boyunca kullanılarak süreçlerin otomatikleştirilmesi ve dijitalleştirilmesidir (Gürkan, 2019).

Son on yılda, inşaat projelerinin performansını iyileştirme ve yönetim süreçlerini yapılandırma konusundaki muazzam ihtiyaç nedeniyle Endüstri 4.0'ın çok çeşitli teknolojilerinin artan kullanımı, inşaat dijitalleşmesini, otomasyonunu ve entegrasyonunu sağlamıştır (Oesterreich ve Teuteberg, 2016). Altus (2019), tarafından inşaat teknolojileri ile ilgili yapılan araştırmada en fazla değişime uğratacağına inanılan teknolojiler sırasıyla akıllı bina, prefabrikasyon (modüler

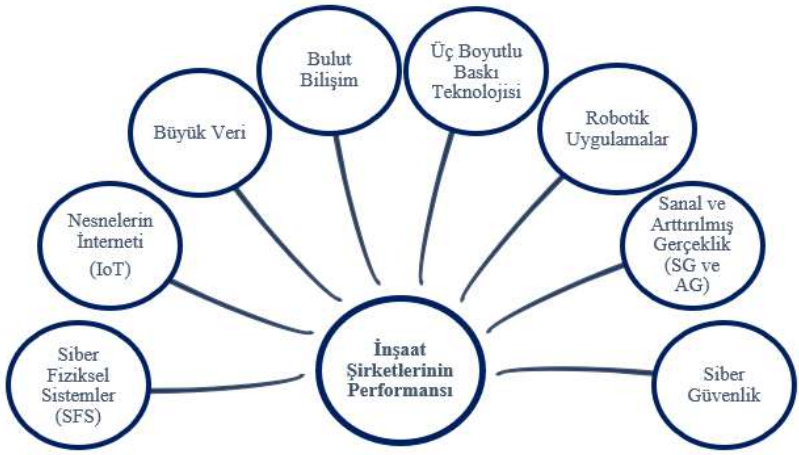
inşaat), yapı bilgi modellemesi, şantiye robotları, akıllı bina tasarımları (yapay zeka + makine öğrenimi kullanarak) ve 3 boyutlu baskı teknoloji olmuştur.

3. METOD

Araştırma kapsamında gerekli verilerin toplanması birincil veri yöntemlerinden biri olan anket yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Birincil veriler, araştırmacının çalışması için ihtiyacı olan verileri değişik metotlar kullanarak kendisinin toplaması ile oluşan verilerdir (Altunışık vd., 2005). Anketler online olmak suretiyle firmaların yöneticilerine uygulanmıştır.

3.1. Araştırma Modeli

Endüstri 4.0 teknolojilerinden olgunlaşarak İnşaat 4.0'ın bileşenlerini oluşturan siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerinin inşaat şirketleri tarafından gerçekleştirilme düzeylerinin bu şirketlerin performanları üzerindeki etkileri araştırılmış olup araştırmanın modeli aşağıdaki gibidir.



Şekil 2. Araştırmanın modeli

3.2. Araştırmanın Hipotezleri

Endüstri 4.0 teknolojilerinden olgunlaşarak İnşaat 4.0'ın bileşenlerini oluşturan siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerinin inşaat şirketleri tarafından gerçekleştirilme

düzeylerinin bu şirketlerin performanları üzerindeki etkilerini araştırmak için kurulan hipotezler;

H_1: Siber fiziksel sistemler bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_2: Nesnelerin interneti bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_3: Büyük veri bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_4: Bulut bilişim bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_5: Üç boyutlu baskı teknoloji bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_6: Robotik uygulamalar bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_7: Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.
H_8: Siber güvenlik bileşeninin şirketin performansı üzerinde etkisi vardır.

3.3. Araştıramnın Evreni ve Örneklemi

Araştırma probleminin cevaplanmasıyla ilgili olan ve araştırmacının belirttiği koşullara uyan gruba araştırmanın evreni denir. (Lin, 1976). Zaman ve mali kaynaklar konusundaki sınırlılıklardan dolayı evrenin içinde yer alan, özellikleri ve verdikleri cevaplar açısından evreni yansıtan daha küçük bir gruptaki insanlardan bilgileri toplamak yani örneklemden toplamak, daha ucuz, daha hızlı ve daha kolay bir yoldur (De Vaus, 1990). Bu kapsamda araştırmayı ilgilendiren grubun tümünden (evren), bu grubu temsil edecek bir örneklem seçilerek araştırma hazırlanmıştır. Araştırmanın evrenini Türkiye'de faaliyet gösteren ulusal ve ulslararası inşaat şirketleri oluşturmakta olup, araştırmanın örneklemini ise bu firmaların içinde yer alan ve özellikleri bu firmaları yansıtan 189 inşaat şirketi temsilcisi oluşturmaktadır.

3.4. Veri Toplama Yöntemi

Araştırmada kullanılan anket formu üç bölümden oluşmakta olup bu bölümlerde yer verilenler sırasıyla;

- İlk bölümde şirketlere ait faaliyet alanı ve türü, sektördeki faaliyet süresi ve çalışan sayısına ilişkin sorular yer almaktadır. Araştırmaya katılan personelin pozisyonu, eğitim düzeyi, yaşı ve çalışma süresine ilişkin sorular yer almaktadır.
- Anket formunun ikinci bölümünde şirketlerinlerin İ4.0 olgunluk düzeylerine yönelik ölçek oluşturulurken, Duman ve Akdemir (2021)

tarafından işletmelerin Endüstri 4.0 teknolojileri kullanım düzeyinin belirlenmesine yönelik geliştirilen ölçek temel alınmıştır. İ4.0 teknoloji bileşenleri olan sekiz teknolojiye ait temel aşamaların şirkette uygulanıp uygulanmadığını sorgulayan sorular beşli likert ölçek ile sorulmuştur. Teknolojilerin şirketlerde gerçekleştirilme düzeyleri, "Gerçekleştirilmedi, Hazırlık Aşamasında, Kısmen Gerçekleştirildi, Büyük Oranda Gerçekleştirildi, Tamamen Gerçekleştirildi" cevap seçenekleri ile belirlenmeye çalışılmıştır.

- Anket formunun üçüncü bölümünde yer alan sorular şirketlerin performansını ölçümlemek amacıyla sorulmuştur. Performans soruları araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Bu ölçekte İ4.0 nitel örgütsel performans iyileşmeleri için "Hiç Katılmıyorum, Katılmıyorum, Kararsızım, Kısmen Katılıyorum ve Tamamen Katılıyorum" cevaplarına göre analizler yapılmıştır.

3.5. Verilerin Analizi

Verilerin analizi için IBM SPSS 25 programı kullanılmıştır. Endüstri 4.0 teknolojilerinden olgunlaşarak İnşaat 4.0'ın bileşenlerini oluşturan siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerinin inşaat şirketleri tarafından gerçekleştirilme düzeylerinin bu şirketlerin performanları üzerindeki etkilerini belirlemek için çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Faaliyet alanına göre firma performans ve İ4.0 teknoloji bileşenlerinin karşılaştırılması için Bağımsız Örneklem T testi ve Mann Whitney U testi; faaliyet türüne göre firma performans ve İ4.0 teknoloji bileşenlerinin karşılaştırılması için Tek Yönlü Varyans analizi ve Kruskal Wallis H testi kullanılmıştır. Post Hoc test olarak ise Tukey HSD ve Mann Whitney U testi kullanılmıştır.

Tablo 1. Araştırmaya katılan personelin pozisyonu, eğitim düzeyi, yaşı ve çalışma sürelerine ilişkin bilgiler

N=189		n	%
Pozisyon	Çalışan	50	26.5
	Orta Seviye Yönetici	52	27.5
	Üst Seviye Yönetici	87	46.0
Eğitim Düzeyi	Lise ve Altı	15	7.9
	Yüksekokul	12	6.3
	Lisans	125	66.1
	Yüksek Lisans ve Üzeri	37	19.6
Yaş	20-30 Yaş	14	7.4
	31-40 Yaş	82	43.4
	41-50 Yaş	40	21.2
	51-60 Yaş	32	16.9
	60 Yaş Üstü	21	11.1
Şu anki Firmadaki Çalışma Süresi	1 Yıldan Az	70	37.0
	1-5 Yıl	22	11.6
	6-10 Yıl	30	15.9
	11-15 Yıl	10	5.3
	15 Yıl Üstü	57	30.2

Araştırmaya katılan 189 personelden %26.5' inin çalışan, %27.5' inin orta düzey yönetici, %46.0' sının üst düzey yönetici olduğu; %7.9' unun lise ve altı, %6.3' ünün yüksekokul, %66.1' inin lisans, %19.6' sının yüksek lisans ve üzerinde eğitiminin olduğu; %7.4' ünün 20-30 yaş, %43.4' ünün 31-40 yaş, %21.2' sinin 41-50 yaş, %16.9' unun 51-60 yaş, %11.1' inin 60 yaşın üstünde olduğu; %37.0' sinin 1 yıldan az, %11.6' sının 1-5 yıl, %15.9' unun 6-10 yıl, %5.3' ünün 11-15 yıl ve %30.2' sinin 15 yılın üstünde şuanki firmasında çalıştığı gözlenmiştir.

Tablo 2. Firmanın faaliyet alanı, türü, sektördeki faaliyet süresi ve çalışan sayısına ilişkin bilgiler

N=189		n	%
Firmanın Faaliyet Alanı	Ulusal	158	83.6
	Uluslararası	31	16.4
Firmanın Faaliyet Türü	Üst yapı taahhüt işleri	41	21.7
	Alt yapı taahhüt işleri	138	73.0
	Malzeme pazarlama işleri	7	3.7
	Gayrimenkul satış işleri	2	1.1
	Prefabrik imalat işleri	1	0.5
Firmanın İnşaat Sektöründeki Faaliyet Süresi	0-5 Yıl	1	0.5
	6-10 Yıl	31	16.4
	11-15 Yıl	32	16.9
	16-20 Yıl	16	8.5
	21 Yıl ve Üstü	109	57.7
Çalışan Sayısı	1-9 Kişi	8	4.2
	10-49 Kişi	77	40.7
	50-249 Kişi	38	20.1
	250 Kişi ve daha fazla	66	34.9

Araştırmaya katılan firmalardan %83.6' sının ulusal, %16.4' ünün uluslararası alanda faaliyet gösterdiği; %21.7' sinin üst yapı taahhüt işleri, %73.0' ünün alt yapı taahhüt işleri, %3.7' sinin malzeme pazarlama işleri, %1.1' inin gayrimenkul satış işleri ve %0.5' inin prefabrik imalat işlerinde faaliyet gösterdiği; %0.5' inin 0-5 yıl, %16.4' ünün 6-10 yıl, %16.9' unun 11-15 yıl, %8.5' inin 16-20 yıl, %57.7' sinin 21 yıl ve üstünde sektörde faaliyet gösterdiği; %4.2' sinin 1-9 çalışanı, %40.7' sinin 10-49 çalışanı, %20.1' inin 50-249 çalışanı, %34.9' unun 250 ve daha fazla çalışanı olduğu gözlenmiştir.

Tablo 3. Güvenirlik test sonuçları

	Cronbach α	Madde Sayısı
Firma Performans	0.98	16
İ4.0 Teknoloji Bileşenleri	0.95	31
Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	0.71	5
Nesnelerin İnterneti (IoT)	0.81	4
Büyük Veri	0.90	4
Bulut Bilişim	0.83	4
Üç Boyutlu Baskı Teknolojisi	0.79	4
Robotik Uygulamalar	0.96	4
Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik (SG ve AG)	0.71	4
Siber Güvenlik	0.91	2

Firma performansına ait 16 maddenin Cronbach alfa değeri 0.98, İ4.0 teknoloji bileşenlerine ait 31 maddenin Cronbach alfa değeri 0.95, siber fiziksel sistemler bileşeninin 0.71, nesnelerin interneti bileşeninin 0.81, büyün veri bileşeninin 0.90, bulut bilişim bileşeninin 0.83, üç boyutlu baskı teknolojisi bileşeninin 0.79, robotik uygulamalar bileşenini 0.96, sanal ve arttırılmış gerçeklik bileşeninin 0.71 ve siber güvenlik bileşeninin Cronbach alfa değeri 0.91 olarak bulunmuştur. Cronbach alfa değerinin 0.70' den yüksek olması güvenilirliğin yüksek olduğunun bir göstergesidir (Pallant, 2011). Buna göre tüm alfa değerlerinin 0.70' den yüksek olması ile anket formlarının güvenilir ve tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

İ4.0 teknoloji bileşenlerinin faktör analiz sonucunda KMO (Kaiser-Mayer-Olkin) değeri .764 olarak bulunmuş ve bu değer örneklem büyüklüğünün yeterli olduğu göstermektedir. Barlett testinin sonucu ise 11810.769 p<.001 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4. İnşaat 4.0 Teknoloji bileşenleri anketi açıklayıcı faktör analizi

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	14.38	46.38	46.38	14.38	46.38	46.38	8.15	26.29	26.29
2	3.43	11.07	57.44	3.43	11.07	57.44	4.44	14.34	40.63
3	3.10	10.00	67.44	3.10	10.00	67.44	4.32	13.92	54.54
4	1.97	6.34	73.78	1.97	6.34	73.78	4.16	13.42	67.97
5	1.41	4.54	78.32	1.41	4.54	78.32	2.29	7.38	75.35
6	1.22	3.93	82.25	1.22	3.93	82.25	2.14	6.90	82.25

Faktör analizi açıklanan toplam varyans sonucuna göre; İ4.0 teknoloji bileşenlerine ait ölçeğin özdeğeri 1' den büyük 6 faktör altında toplandığı tespit edilmiş olup, İ4.0 teknoloji bileşenlerine ait anketin 6 boyuttan olduğu ve toplam varyansın %82.25' inin açıkladığı tespit edilmiştir.

Firma performansının faktör analiz sonucunda KMO (Kaiser-Mayer-Olkin) değeri .764 olarak bulunmuş ve bu değer örneklem büyüklüğünün yeterli olduğu göstermektedir. Barlett testinin sonucu ise 11810.769 p<.001 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 5. Firma performansının anketi açıklayıcı faktör analizi

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	11.78	73.63	73.63	11.78	73.63	73.63

Faktör analizi açıklanan toplam varyans sonucuna göre; firma performansına ait ölçeğin özdeğeri 1' den büyük 1 faktör altında toplandığı tespit edilmiş olup, firma performansına ait anketin 1 boyuttan olduğu ve toplam varyansın %73.63' ünün açıkladığı tespit edilmiştir.

4. BULGULAR

Tablo 6. Tanımlayıcı istatistik değerleri

N=189		Ort.	S. Sapma	Min	Max	Çarpıklık	Basıklık
Firma Performans		4	1.02	1.00	4.94	-0.82	0.00
İ4.0 Teknoloji Bileşenleri	Siber Fiziksel Sistemler	2	0.88	1.00	5.00	0.28	-0.52
	Nesnelerin İnterneti	3	1.13	1.00	5.00	0.17	-0.74
	Büyük Veri	2	1.27	1.00	5.00	0.63	-0.84
	Bulut Bilişim	2	1.22	1.00	5.00	0.66	-0.57
	3 Boyutlu Baskı Teknolojisi	2	0.76	1.00	4.25	1.09	0.15
	Robotik Uygulamalar	1	0.68	1.00	3.25	1.86	2.01
	Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik	2	0.82	1.00	4.20	1.22	0.53
	Siber Güvenlik	2	1.38	1.00	5.00	0.58	-0.97

Firma performans ortalamasının 4 olduğu ve performans düzeyinin yüksek olduğu gözlenmiştir. İ4.0 teknoloji bileşenlerinden siber fiziksel sistemler, büyük veri, bulut bilişim, 3 boyutlu baskı teknolojisi, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerinde hazırlık aşamasında olunduğu; nesnelerin interneti bileşenini kısmen gerçekleştirdikleri; robotik uygulamalar bileşenini gerçekleştirmedikleri gözlenmiştir. Çarpıklık ve basıklık değerlerinin ±1.5 aralığında olduğu ve verilerin normal dağıldığı sonucuna varılmıştır. (Fidell vd., 2013) Dolayısıyla firma performans, siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik değişkenlerinin normal dağılım gösterdiği; robotik uygulamalar değişkeninin normal dağılım göstermediği tespit edilmiştir.

Tablo 7. İ4.0 Teknoloji bileşenleri ve gerçekleştirme durumları

İ4.0 Teknoloji Bileşenleri		Ort.	S. Sapma	1 Gerçekleştirilmedi		2 Hazırlık aşamasında		3 Kısmen gerçekleştirildi		4 Büyük oranda gerçekleştirildi		5 Tamamen gerçekleştirildi	
				n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	1. Firmamızdaki makinalarda radyo frekans tanımlama etiketleri bulunur.	2	0.88	122	64.6	33	17.5	28	14.8	5	2.6	1	0.5
	2. Firmamızda otomatik kumanda ve taşıt sistemleri kullanılmaktadır.	2	1.32	89	47.1	26	13.8	44	23.3	14	7.4	16	8.5
	3. Firmamızda gerçek zamanlı (anlık) veriler elde edilebilmektedir.	3	1.39	56	29.6	2	1.1	72	38.1	32	16.9	27	14.3
	4. Müşteri isteklerine hızlı geri dönüş sistemi oluşturulmuştur.	2	1.45	84	44.4	24	12.7	23	12.2	42	22.2	16	8.5
	5. Firmamızda yalın üretim sistemi oluşturulmuştur.	2	1.35	89	47.1	36	19.0	30	15.9	16	8.5	18	9.5
Nesnelerin İnterneti (IoT)	6. Firmamızda akıllı cihazlar (tablet, telefon, makine vs.) arasında internet ağ sistemi kurulmuştur.	4	1.34	26	13.8	2	1.1	38	20.1	52	27.5	71	37.6
	7. Firmamızda ileri teknoloji sayesinde üretim süreçlerinde güvenlik sağlanmıştır.	3	1.46	55	29.1	12	6.3	47	24.9	43	22.8	32	16.9
	8. Firmamızda akıllı ölçüm teknikleri (akıllı sayaç, uzaktan ölçüm vb.) kullanılmaktadır.	2	1.48	89	47.1	19	10.1	36	19.0	20	10.6	25	13.2
	9. Firmamızda nesnelerin interneti lojistik (taşıma, depolama vb.) faaliyetlerinde kullanılmaktadır.	3	1.42	59	31.2	14	7.4	53	28.0	38	20.1	25	13.2
Büyük Veri	10. Firmamızda veri tabanı yönetim sistemi bulunmaktadır.	3	1.42	53	28.0	4	2.1	59	31.2	43	22.8	30	15.9
	11. Firmamızda büyük veri ile ortaya çıkan sorunlar tespit edilmektedir.	2	1.56	87	46.0	26	13.8	17	9.0	29	15.3	30	15.9
	12. Büyük veri, karar alma yöntemlerinde kullanılmaktadır.	2	1.42	91	48.1	26	13.8	29	15.3	24	12.7	19	10.1
	13. Büyük veri ile, ürünün kalitesi ve tam zamanında teslimatı ile ilgili tahmin yapılmaktadır.	2	1.39	86	45.5	34	18.0	29	15.3	21	11.1	19	10.1
Bulut Bilişim	14. Firmamızda bulut bilişim ile hızlı veri transferi ve yedeklenme sağlanmaktadır.	2	1.53	96	50.8	26	13.8	26	13.8	8	4.2	33	17.5
	15. Firmamızda bulut bilişim alt yapısı, yazılım veya platformlarından birisi bulunmaktadır.	2	1.61	100	52.9	16	8.5	17	9.0	23	12.2	33	17.5
	16. Firmamız dışarıdan (Turkcell, TTNET, xClouds vb.) bulut hizmetlerinden faydalanmaktadır.	3	1.57	67	35.4	13	6.9	52	27.5	11	5.8	46	24.3
	17. Firmamız çalışanları bulut bilişim ile istenilen bilgilere kolaylıkla her yerden erişebilmektedirler.	2	1.23	86	45.5	32	16.9	48	25.4	11	5.8	12	6.3

Tablo 7. İ4.0 Teknoloji bileşenleri ve gerçekleştirme durumları (devam)

İ4.0 Teknoloji Bileşenleri		Ort.	S. Sapma	1. Gerçekleştirilmedi		2. Hazırlık aşamasında		3. Kısmen gerçekleştirildi		4. Büyük oranda gerçekleştirildi		5. Tamamen gerçekleştirildi	
				n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Üç Boyutlu Basım Teknolojisi	18. Firmamızda kalıpsız üretim için 3B teknolojisine sahip yazıcılar kullanılmaktadır.	2	1.41	107	56.6	20	10.6	28	14.8	13	6.9	21	11.1
	19. Firmamızda 3B yazıcılar ile hızlı ve esnek prototipleme ve üretim sistemleri oluşturulmuştur.	1	0.79	143	75.7	16	8.5	27	14.3	3	1.6	0	0.0
	20. Firmamızda 3B yazıcılar ile kişiselleştirilmiş üretim yapılmaktadır.	1	0.71	144	76.2	22	11.6	22	11.6	1	0.5	0	0.0
	21. 3B yazıcılar ile yaratıcı ürün tasarımları yapılmaktadır.	1	0.77	141	74.6	17	9.0	30	15.9	1	0.5	0	0.0
Robotik Uygulamalar	22. Firmamızda robotik özellikli cihazlar veya endüstriyel robotlar kullanılmaktadır.	1	0.78	150	79.4	5	2.6	34	18.0	0	0.0	0	0.0
	23. Firmamızda robotlar, beklenmedik durumlarda kendi kendine karar verebilmektedir.	1	0.66	158	83.6	9	4.8	22	11.6	0	0.0	0	0.0
	24. Firmamızda robotlar ve çalışanlar uyum içinde çalışmaktadır.	1	0.79	144	76.2	23	12.2	15	7.9	7	3.7	0	0.0
	25. Firmamızda robotlar ve bunların eylemleri uzaktan kontrol edilebilmektedir.	1	0.67	146	77.2	22	11.6	21	11.1	0	0.0	0	0.0
Sanal ve Artırılmış Gerçeklik (SG ve AG)	26. Fiziksel üretim süreçlerimizin bilgisayar ortamında sanal kopyaları vardır.	2	1.45	103	54.5	14	7.4	19	10.1	40	21.2	13	6.9
	27. Firmamızda sanal ve artırılmış gerçeklik cihazları (simülatörler, sanal gerçeklik gözlüğü, optik projeksiyon sistemleri, monitörler, el ya da insan vücuduna takılan görüntüleme cihazları vb.) kullanılmaktadır.	1	0.87	143	75.7	7	3.7	36	19.0	2	1.1	1	0.5
	28. Firmamızda sanal ve artırılmış gerçeklik ile ürün süreçlerinde yaratıcılık ve zenginleştirme sağlanmaktadır.	1	0.79	140	74.1	18	9.5	29	15.3	2	1.1	0	0.0
	29. Firmamızda bazı çalışan eğitimleri (acil durumlar, makine kullanımı, tatbikatlar vb.) bilgisayar ortamında yapılabilmektedir.	3	1.44	69	36.5	21	11.1	61	32.3	6	3.2	32	16.9
Siber Güvenlik	30. Firmamızda siber güvenlik tedbirleri alınmaktadır.	2	1.44	79	41.8	21	11.1	41	21.7	26	13.8	22	11.6
	31.Firmamızda kişisel ve organizasyonel verilerin korunmasına yönelik politikalar oluşturulmaktadır.	2	1.45	71	37.6	36	19.0	39	20.6	13	6.9	30	15.9

Firmaların %38.1' i siber fiziksel sistem bileşeni uygulamaları arasında yer alan "gerçek zamanlı veriler elde edebilmeyi" kısmen gerçekleştirdiği, %37.6' sı nesnelerin interneti bileşeni uygulamaları arasında yer alan "akıllı cihazlar arasında internet ağ sistemi kurulumunu" tamamen gerçekleştirdiği ve % 31.2' si büyük veri bileşeni uygulamaları arasında yer alan "veri tabanı yönetim sistemini bulundurmayı" kısmen gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

Siber fiziksel sistem bileşeni uygulamalarının ortalamasına baktığımızda; "gerçek zamanlı veriler elde edebilmeyi" kısmen gerçekleştirdikleri; aşağıdaki uygulamalar için hazırlık aşamasında olunduğu tespit edilmiştir.

- Makinalarda radyo frekans tanımlama etiketlerini bulundurma
- Otomatik kumanda ve taşıt sistemlerini kullanma
- Müşteri isteklerine hızlı ger dönüş sistemi oluşturma
- Yalın üretim sistemi oluşturma

Nesnelerin interneti bileşeni uygulamalarının ortalamasına baktığımızda; "akıllı cihazlar arasında internet ağ sistemini" büyük oranda gerçekleştirdikleri; aşağıdaki uygulamalar için hazırlık aşamasında olunduğu tespit edilmiştir.

- "ileri teknoloji sayesinde üretim süreçlerinde güvenlik sağlanmasını" ve
- "nesnelerin interneti lojistik faaliyetlerinde kullanımını" kısmen gerçekleştirdikleri;
- "akıllı ölçüm tekniklerinin kullanımı"

Büyük veri bileşeni uygulamalarının ortalamasına baktığımızda; "veri tabanı yönetim sistemi bulundurmayı" kısmen gerçekleştirdikleri; aşağıdaki uygulamalar için hazırlık aşamasında olunduğu tespit edilmiştir.

- Büyük veri ile ortaya çıkan sorunların tespiti
- Büyük veri, karar alma yöntemlerinde kullanımı
- Büyük veri ile ürünün kalitesi ve tam zamanında teslimatı ile ilgili tahmin yapımı

Bulut bilişim uygulamalarının ortalamasına baktığımızda; "dışarıdan bulut hizmetlerinden faydalanmayı" kısmen gerçekleştirdikleri; aşağıdaki uygulamalar için hazırlık aşamasında olunduğu tespit edilmiştir.

- Bulut bilişim ile hızlı veri transferi ve yedekleme sağlanması
- Bulut bilişim alt yapısı, yazılım veya platformlarından birisini bulundurma
- Çalışanları bulut bilişim ile istenilen bilgilere kolaylıkla her yerden erişebilme

Üç boyutlu baskı teknoloji bileşeni uygulamalarının ortalamasına baktığımızda; "üretim için 3B teknolojisine sahip yazıcıların kullanımı" için hazırlık aşamasında olunduğu; aşağıdaki uygulamaların gerçekleşmediği tespit edilmiştir.

- 3B baskı teknolojisi ile hızlı ve esnek prototipleme ve üretim sistemleri oluşturma
- 3B baskı teknolojisi ile kişiselleştirilmiş üretim yapımı
- 3B baskı teknolojisi ile yaratıcı ürün tasarımlarının yapımı

Robotik uygulama bileşeni uygulamalarının ortalamasına baktığımızda aşağıdaki uygulamaların gerçekleşmediği tespit edilmiştir.

- Robotik özellikli cihazlar veya endüstriyel robot kullanımı
- Robotların beklenmedik durumlarda kendi kendine karar verebilmesi
- Robotlar ve çalışanların uyum içinde çalışması
- Robotlar ve bunların eylemleri uzaktan kontrol edebilme

Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik bileşeni uygulamalarının ortalamasına baktığımızda; "bazı çalışan eğitimlerini bilgisayar ortamında yapımının" kısmen gerçekleştirildiği; "fiziksel üretim süreçlerinin bilgisayar ortamında sanal kopyalarının oluşumunun" hazırlık aşamasında olunduğu; aşağıdaki uygulamaların gerçekleşmediği tespit edilmiştir.

- Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik cihazlarının kullanımı
- Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik ile ürün süreçlerinde yaratıcılık ve zenginleştirme sağlama

Siber güvenlik bileşeni uygulamalarının ortalamalarına baktığımızda; "siber güvenlik tedbirlerinin alınımı" ve "kişisel ve organizasyonel verilerin korunmasına yönelik politikaların oluşturulması" konusunda hazırlık aşamasında olunduğu tespit edilmiştir.

Tablo 8. Korelasyon analizi

N=189			Firma Performans
İ4.0 Teknoloji Bileşenleri	Siber Fiziksel Sistemler	r	0.21*
	Nesnelerin İnterneti	r	0.50*
	Büyük Veri	r	0.33*
	Bulut Bilişim	r	0.35*
	3 Boyutlu Baskı Teknolojisi	r	0.24*
	Robotik Uygulamalar	r	0.18**
	Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik	r	0.36*
	Siber Güvenlik	r	0.25*

r: Pearson Korelasyon, Spearman Korelasyon, *p≤0.01, **p≤0.05: Düzeyinde Anlamlı

Firma performansı ile siber fiziksel sitemler (r=0.21, p≤0.01), üç boyutlu baskı teknoloji (r=0.24, p≤0.01), robotik uygulamalar (r=0.18, p≤0.05), siber güvenlik (r=0.25, p≤0.01) bileşenleri arasında pozitif yönde çok zayıf düzeyde anlamlı bir ilişki olduğu; büyük veri (r=0.33, p≤0.01), bulut bilişim (r=0.35, p≤0.01), sanal ve arttırılmış gerçeklik (r=0.36, p≤0.01) bileşenleri arasında pozitif yönde zayıf düzeyde; nesnelerin interneti (r=0.50, p≤0.01) bileşeni arasında pozitif yönde orta düzeyde anlamlı bir ilişki olduğu gözlenmiş olup; firmalar siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerini gerçekleştirme düzeylerini arttırdıkça firma performanslarının yükseldiği söylenebilir.

Endüstri 4.0 teknoloji bileşenlerinden siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerini gerçekleştirme düzeylerinin firmaların performansı üzerindeki etkisine yönelik çoklu regresyon analiz sonucu Tablo 14'tedir.

Tablo 9. Çoklu regresyon analiz sonucu

	B	S. Hata	Beta	t	p
Sabit Değer	2.58	0.20		12.98	0.00*
Siber Fiziksel Sistemler	-0.39	0.10	-0.33	-3.78	0.00*
Nesnelerin İnterneti	0.76	0.11	0.85	6.73	0.00*
Büyük Veri	-0.26	0.12	-0.32	-2.24	0.03*
Bulut Bilişim	0.16	0.10	0.19	1.61	0.11
3 Boyutlu Baskı Teknolojisi	-0.10	0.15	-0.07	-0.64	0.52
Robotik Uygulamalar	-0.44	0.17	-0.30	-2.56	0.01*
Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik	0.33	0.15	0.26	2.11	0.04*
Siber Güvenlik	0.06	0.07	0.08	0.85	0.40
Bağımlı Değişken: Firma Performansı			$R=0.60, R^2=0.36, F=12.579, p=0.00*$		

*p≤0.05: Düzeyinde Anlamlı

Endüstri 4.0 teknoloji bileşenlerinden siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerini gerçekleştirme düzeylerinin firmanın performansı üzerindeki etkisine yönelik yapılan çoklu regresyon analiz sonucuna göre; siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik bileşenlerinin firmanın performansı üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu

(p≤0.05); bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknoloji ve siber güvenlik bileşenlerinin firmanın performansı üzerindeki etkisinin anlamlı olmadığı (p>0.05) tespit edilmiştir.

Tablo 10. Faaliyet alanına göre firma performans ve İ4.0 teknoloji bileşenlerinin karşılaştırılması

N=189		Firmanın Faaliyet Alanı	n	Ort.	S. Sapma	Sıra Ort.	Test İst.		P
Firma Performans		Ulusal	158	3.57	1.06	90.97	T	-2.776	0.01*
		Uluslararası	31	4.11	0.58	115.56			
İ4.0 Teknoloji Bileşenleri	Siber Fiziksel Sistemler	Ulusal	158	2.27	0.89	97.87	T	1.588	0.11
		Uluslararası	31	1.99	0.79	80.39			
	Nesnelerin İnterneti	Ulusal	158	2.99	1.18	97.29	T	1.498	0.14
		Uluslararası	31	2.66	0.84	83.32			
	Büyük Veri	Ulusal	158	2.41	1.29	92.79	T	-1.099	0.27
		Uluslararası	31	2.69	1.17	106.27			
	Bulut Bilişim	Ulusal	158	2.30	1.27	90.99	T	-1.553	0.12
		Uluslararası	31	2.67	0.89	115.42			
	3 Boyutlu Baskı Teknolojisi	Ulusal	158	1.61	0.79	97.28	T	1.694	0.09
		Uluslararası	31	1.35	0.57	83.39			
	Robotik Uygulamalar	Ulusal	158	1.41	0.73	98.85	Z	-2.820	0.01*
		Uluslararası	31	1.05	0.19	75.35			
	Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik	Ulusal	158	1.87	0.87	98.27	T	2.351	0.02*
		Uluslararası	31	1.50	0.39	78.32			
	Siber Güvenlik	Ulusal	158	2.25	1.29	88.43	T	-4.326	0.00*
		Uluslararası	31	3.37	1.48	128.47			

T: Bağımsız Örneklem T Testi, Z: Mann Whitney U Testi, *p≤0.05: Düzeyinde Anlamlı

Siber fiziksel sitemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi bileşenlerinin faaliyet alanına göre anlamlı bir farklılık göstermediği (p>0.05); firma performansı, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerinin faaliyet alanına göre anlamlı bir farklılık gösterdiği (p≤0.05) gözlenmiştir. Dolayısıyla ulusal firmaların uluslararası firmalara kıyasla firma performansının daha düşük olduğu ve siber güvenlik bileşenini gerçekleştirme düzeyinin daha düşük olduğu; robotik uygulamalar ve sanal ve arttırılmış gerçeklik bileşenini gerçekleştirme düzeyinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 11. Faaliyet türüne göre firma performans ve İ4.0 teknoloji bileşenlerinin karşılaştırılması

N=189		Firmanın Faaliyet Türü	n	Ort.	S. Sapma	Sıra Ort.	Test İst.		p	Fark
Firma Performans		a. Üst yapı taahhüt işleri	41	3.67	0.63	87.84	F	0.020	0.98	-
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	3.65	1.12	97.30				
		c. Diğer	10	3.71	0.93	92.60				
İ4.0 Teknoloji Bileşenleri	Siber Fiziksel Sistemler	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	2.61	0.64	121.29	F	10.073	0.00*	a, c>b
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	2.06	0.91	83.61				
		c. Diğer	10	2.86	0.37	144.45				
	Nesnelerin İnterneti	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	3.77	0.86	136.17	F	18.280	0.00*	b<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	2.67	1.10	81.42				
		c. Diğer	10	3.25	0.85	113.55				
	Büyük Veri	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	3.66	1.14	143.89	F	31.841	0.00*	b, c<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	2.10	1.07	80.70				
		c. Diğer	10	2.43	1.38	91.85				
	Bulut Bilişim	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	2.95	0.93	126.39	F	6.856	0.00*	b<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	2.18	1.22	85.64				
		c. Diğer	10	2.48	1.50	95.40				
	3 Boyutlu Baskı Teknolojisi	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	1.92	0.91	115.15	F	6.286	0.00*	b<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	1.48	0.65	91.01				
		c. Diğer	10	1.33	1.03	67.50				
	Robotik Uygulamalar	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	1.70	0.93	109.72	χ^2	6.409	0.04*	b<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	1.25	0.57	90.62				
		c. Diğer	10	1.25	0.49	95.10				
	Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	2.20	0.77	124.17	F	6.751	0.00*	b, c<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	1.72	0.79	89.64				
		c. Diğer	10	1.42	1.03	49.30				
	Siber Güvenlik	a. Üst yapı taahhüt işleri	41	2.98	1.22	117.18	F	4.512	0.01*	b<a
		b. Alt yapı taahhüt işleri	138	2.31	1.39	90.05				
		c. Diğer	10	1.95	1.38	72.40				

F: Tek Yönlü Varyans Analizi, χ^2: Kruskal Wallis H Testi, *p≤0.05: Düzeyinde Anlamlı

Firma performansının faaliyet türüne göre anlamlı bir farklılık göstermediği ($p>0.05$); siber fiziksel sitemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknoloji, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerinin faaliyet türüne göre anlamlı bir farklılık gösterdiği ($p\leq0.05$) gözlenmiştir. Dolayısıyla;

- Alt yapı taahhüt işlerini yapan firmaların üst yapı taahhüt işleri ve diğer işleri yapan firmalara kıyasla siber fiziksel sistemleri gerçekleştirme düzeylerinin daha düşük olduğu
- Üst yapı taahhüt işlerini yapan firmaların alt yapı taahhüt işleri yapan firmalara kıyasla nesnelerin interneti, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknoloji, robotik uygulamalar ve siber güvenlik bileşenleri gerçekleştirme düzeylerinin daha yüksek olduğu
- Üst yapı taahhüt işlerini yapan firmaların alt yapı taahhüt işleri ve diğer işleri yapan firmalara kıyasla büyük veri ve arttırılmış gerçeklik bileşenleri gerçekleştirme düzeylerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Toplumlar ve ekonomiler için hayati önem taşıyan ve insanların yaşamlarını sürdürdükleri alanlar olan konutlar, iyi tasarlanıp inşa edilmesi ve gayrimenkul endüstrisinin bu ihtiyaca yanıt vermesi gerekliliği bir zorunluluk olup günümüz gayrimenkul sektörüne az kaynak ayrılması, sektöre yapılan yatırımların verimsiz kabul edilmesi ve bu sektöre öncelik verilmesinin kalkınmayı yavaşlatacağı şeklindeki görüşler nedeniyle emek yoğun bir sanayi dalı olarak kalması, parçalanmış yasal yapısı, yüksek karbon emisyonları oluşturan yapısı, uygun fiyatlı konut eksikliği, teknolojinin yavaş benimsenmesi, sektörün şeffaf olmaması ve esnekliğin azlığı gibi sorunları bulunan günümüz gayriemkul sektörü, ihtiyaçları karşılamamaktadır.

Gayrimenkul sektörünün ihtiyaçları karşılayamaması sonucunda doğal bir değişim süreci başlamış olup dijital gayrimenkulleşme sürecine girilmesini sağlamıştır. Dijital gayrimenkulü ise gayrimenkul finans teknolojileri, paydaş ekonomileri, akıllı bina teknolojileri ve İnşaat 4.0 sektörleri oluşturmaktadır. Dijital gayrimenkulü oluşturan sektörlerden biri olan İnşaat 4.0'ın doğrudan ve dolaylı olarak dijital gayrimenkulün 1/3'ünü oluşturması (Baum, 2017) nedeniyle inşaat sektörünün İnşaat 4.0'a geçişi, gayrimenkul sektörünün geleceğinin şekillenmesinde önemli bir rol üstlendiğini göstermektedir. Günümüz inşaat sektörü, nüfusun yaşlanması ve kötü çalışma koşulları nedeniyle genç nesillerin inşaat sektörüne olan ilgilerinin düşmesi sektörde çalışacak nüfusu azaltmakta ayrıca düşük eğitim seviyeli insanlar ve teknolojik yetersizlikler nedeniyle hammadde, enerji ve zaman israfıyla birlikte kusur oranlarının artıp maliyet

aşımlarının çoğalması diğer endüstrilerin aksine verimin her geçen gün daha da azalması gibi sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sorunların çözülememesi günümüz inşaat sektörünün teknolojik performans sınırına ulaştığını göstermektedir.

Dijital teknolojilerin, sensör sistemlerinin, akıllı makinelerin ve akıllı malzemelerin benimsenmesinde büyük zorluklarla karşı karşıya olan inşaat sektörü; gerek günümüz ihtiyaçlarına cevap verebilmek (konut ihtiyacı, iklim değişikliği vb. itici kuvvetler) gerekse büyüyebilmek için endüstriyel alandaki yenilikler ve teknolojik gelişmelerden doğmuş olan endüstri 4.0'ın yolundan giderek gelişimini sürdürmektedir. İnşaat 4.0'a geçiş ile inşaat sektöründeki üretim verimliliğindeki artış gayrimenkulleri finanse etme, işlem yapma ve satın alma faaliyetleri üzerinde büyük bir etki oluşturacak olup hem küresel iklimdeki acil durum hem de küresel konut kıtlığı sorununa çözüm olacaktır.

Çalışmanın analiz sonucunda elde edilen bulgulardan şu sonuçlar elde edilmiştir: Firmalar siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerini gerçekleştirme düzeylerini arttırdıkça firma performanslarının yükseldiği söylenebilir. Endüstri 4.0 teknoloji bileşenlerinden siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknolojisi, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik ve siber güvenlik bileşenlerini gerçekleştirme düzeylerinin firmanın performansı üzerindeki etkisine yönelik yapılan çoklu regresyon analiz sonucuna göre; siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, robotik uygulamalar, sanal ve arttırılmış gerçeklik bileşenlerinin firmanın performansı üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu ($p \leq 0.05$); bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknoloji ve siber güvenlik bileşenlerinin firmanın performansı üzerindeki etkisinin anlamlı olmadığı ($p > 0.05$) tespit edilmiştir.

Firma performansının faaliyet alanına göre değerlendirildğinde; Ulusal firmaların uluslararası firmalara kıyasla firma performansının daha düşük olduğu ve siber güvenlik bileşenini gerçekleştirme düzeyinin daha düşük olduğu; robotik uygulamalar ve sanal ve arttırılmış gerçeklik bileşenini gerçekleştirme düzeyinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Firma performansının faaliyet türüne göre değerlendirildğinde; Alt yapı taahhüt işlerini yapan firmaların üst yapı taahhüt işleri ve diğer işleri yapan firmalara kıyasla siber fiziksel sistemleri gerçekleştirme düzeylerinin daha düşük olduğu; Üst yapı taahhüt işlerini yapan firmaların alt yapı taahhüt işleri yapan firmalara kıyasla nesnelerin interneti, bulut bilişim, üç boyutlu baskı teknoloji, robotik uygulamalar ve siber güvenlik bileşenleri gerçekleştirme düzeylerinin daha yüksek olduğu Üst yapı taahhüt işlerini yapan firmaların alt yapı taahhüt

işleri ve diğer işleri yapan firmalara kıyasla büyük veri ve arttırılmış gerçeklik bileşenleri gerçekleştirme düzeylerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. sonuçları elde edilmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında 4.0 teknoloji bileşenlerini gerçekleştirme düzeyleri arttıkça firma performanslarının yükseldiği ve bu teknolojileri kullanan firmaların firma performanslarının 4.0 teknolojileri kullanmayanlara göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak inşaat sektöründe daha fazla bilimsel çalışma yapılması ile 4.0 teknolojilerinin bilinirliğini artırarak bu teknolojilerin kullanımları gerçekleştirilip sektördeki temel problem olan verimlilik sonunu büyük oranda çözülmesi sağlanabilir.

6. KAYNAKÇA

1. Accenture, T. L. (2015). Power of android wearable technology. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 498.
2. Altus Group (2019). Real estate development trends repor*t*. *Altus Group*, Retrieved: October 27, 2019, https://go.altusgroup.com/EMEADevelopment-Trends-Report-2019?utm_source=Future%20Proptech&utm_campaign=Development-trends-report-EN-future-proptech.
3. Altunışık, R., Coşkun, R., Bayraktaroğlu, S., & Yıldırım, E. (2007). Sosyal bilimlerde araştırma yöntemleri. Sakarya: Sakarya Kitabevi.
4. Baum, A. (2017). *PropTech 3.0: The future of Real Estate*. Saïd Business School, University of Oxford Research.
5. Baum, A. (2020). *Real Estate Tokenisation – The Future of Real Estate?*. SBS, University of Oxford Research.
6. Baum, A. and Dearsley, J. (2017, in Derbyshire, 2019): What is PropTech, *Unissu Online*, Retrieved: April 16, 2019, https://www.unissu.com/proptech-resources/what-is-proptech.
7. CBRE (2019): #TechCBRE. *CBRE Online*. Erişim Tarihi: 15 Kasım 2023. https://tech.cbre.com.
8. Çalışkan, G. (2020). Dijitalleşme / Dijital Dönüşüm Nedir?. Erişim: 22 Eylül 2023, https://binbiriz.com/blog/dijitallesme-dijital-donusum-nedir.
9. De Vaus, D. A. (1990). *Surveys in social research*, Unwin Hyman Ltd.: London.
10. Duman, M. Ç., ve Akdemir, B. (2021). İşletmelerin Endüstri 4.0 Teknolojileri Kullanım Düzeyinin Belirlenmesine Yönelik Bir Ölçek Geliştirme Çalışması. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi,* 12 (3), 923-940.
11. Fidell, S., Tabachnick, B., Mestre, V., and Fidell, L. (2013). *Aircraft noise-induced awakenings are more reasonably predicted from relative than from absolute sound exposure levels*. The Journal of the Acoustical Society of America, 134(5), 3645-3653.
12. Gürel, N. (1995). *Türkiye'de İşsizliğin Yapısal Analizi.* Banka ve Ekonomik Yorumlar.
13. Gürkan, A., (2019). *İnşaat 4.0 Kavramı ve Türk İnşaat Firmalarının Yeni Teknolojik Gelişmelere Yaklaşımı Üzerine Bir İnceleme*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
14. Lin N (1976). *Foundations of Social Research*. McGraw-Hill: USA.
15. Oesterreich, T. D., and Teuteberg, F. (2016). *Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A triangulation.* Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry, Computers in Industry, 83, pp. 121-139.

16. Osunsanmi, T., Aigbavboa, C., and Oke, A. (2018). *Construction 4.0: The Future of the Construction Industry in South Africa.*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 135, International Journal of Civil and Environmental Engineering, 12(3), pp. 206 - 212.
17. Pallant, J. (2011). *SPSS Survival Manual: A Step By Step Guide To Data Analysis Using The SPSS Program*. 4th Edition, Mc Graw Hill, Open Universty Press.
18. Unissu (2019). Global PropTech Analysis: Asia. *Unissu Online*, Retrieved: August 23, 2019. https://www.unissu.com/proptech-resources/global-proptech-analysis-asia.
19. WEF, (2021). A Framework for the Future of Real Estate 2021. *weforum online,* http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Framework_for_the_Future_of_Real_Estate_2021.pdf
20. World Economic Forum, (2018). *Shaping the future of construction - future scenarios and implications for the industry*. World Economic Forum: Geneva. http://www3.weforum.org/docs/Future_Scenarios_Implications_Industry_report_ 2018.pdf, (2018) , Accessed date: 8 August 2018.
21. Yazıcıoğlu, Ö. (1981). *Bina Yapımında Endüstrileşme ve Türkiye Açısından İrdelenmesi.* TÜBİTAK Yayın No: 51: Ankara. https://www.us.jll.com/en/trends-and-insights/research/global/gmp

MERMER ATIKLARININ BETON TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI VE BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Öğr. Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-6663-3340

1. Giriş

Türkiye, Dünyanın en zengin mermer rezervine sahip ilk on ülkesinden biridir. Mermer endüstrisi, son yıllarda yapılan yatırımlar ile zamanla mermer üretim miktarlarını artırmaktadır. Mermer üretim miktarındaki artış, atık mermer miktarlarının da artmasına sebep olmaktadır. Üretim sonrası oluşan atık mermer ürünleri, doğal kaynaklarımızı kirletmekte ve olumsuz çevreseletkilere yol açmaktadır.

Günümüzde, betona olan talep artışı ile birlikte ortaya çıkan doğal kaynakların azalma problemlerine karşı hem alternatif malzemeler bulmak hem de betonözelliklerini geliştirmek amacıyla, çeşitli atık malzemelerin betonda kısmi çimento veya agrega ikamesi olarak kullanılmasının uygulanabilirliği araştırılmaktadır.Bu çalışmada, atık mermerlerin beton teknolojisindeki kullanım yöntemleri, son yıllarda yapılan çalışmalar kapsamında incelenmiştir.

Türkiye, Dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp kuşağında yer aldığından, yaklaşık 5,1 milyar m^3 mermer rezervine sahiptir. Bu miktar, 15 milyar m^3 olduğu tahmin edilen dünya rezerv toplamının %34'üne karşılık gelmektedir. Bununla birlikte mermer sektöründe yaklaşık 1500 adet doğal taş ocağı, fabrika ölçeğinde üretim yapan 2000 tesis ve 9.000 atölye faaliyet göstermektedir [1]. Geçmiş yüzyıllardan günümüze kadar geçen zamanda mermerler; döşemelerde, duvar kaplamalarında, anıtlarda ve dekoratif uygulamalarda şekillendirilerek kullanılan, kristalimsi metamorfik kayalar olarak kullanılmaktadır. Yapı sektöründe, mermer ürünlerine olan talep artışı ile birlikte atık mermer miktarı da giderek artmaktadır [2]. Mermer madenciliği ve taş ocakçılığı faaliyetleri ile çok büyük miktarlarda atık alanları oluşmaktadır. Bu atıklar, mermer ocaklarını ve tesislerini çevreleyen alanlarda (Şekil 1) çevresel kaygılara ve su kaynaklarına zarar verecek etkilere neden olmaktadır. Her yıl, Türkiye'deki farklı işletme tesislerinde, önemli miktarlarda mermer atığı üretilerek, arazilerde depolanmaktadır.

Şekil 1. Atık mermer sahası.

Günümüzde, mermer işletme tesisleri tarafından üretilen mermer atık tozlarının arıtılması, küresel çevre sorunlarından biridir. Atık mermer tozları, çökeldikten sonra çöplüklere atılmakta, tarımı ve halk sağlığını da olumsuz etkilemektedir.

Mermer; kalker ($CaCO_3$) ve dolomitin ($CaMg(CO_3)_2$) yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşmesi sonucu oluşan doğal bir taştır [3]. Türkiye'nin Afyon ilindeüretilen beyaz mermer atıklarının kimyasal analizi Tablo 1'de [4] verilmiştir. Tablo 1'den de görüldüğü üzere, mermerin kimyasal analizi incelendiğinde, yapısında kalsiyum oksit (CaO) miktarının genellikle yüksek olduğu (%50'nin üstünde) görülmektedir. Mermerler farklı sanayi kollarında; seramik, çimento, plastik, refrakter, patlayıcı malzeme ve temizlik malzemeleri üretimlerinde kullanılmaktadır.

Tablo 1. Afyon ilindeki beyaz mermer atığının kimyasal analizi (% olarak).

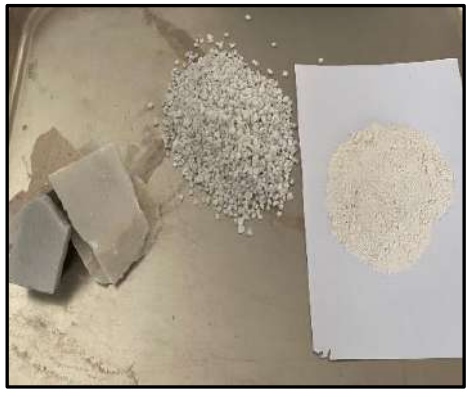
CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3
55,86	0,36	0,29	0,05	<0,04	<0,01	0,02	0,02	<0,002

Mermer bloğunun %70'i taş ocağından çıkarma ve kesme işlemlerinden sonra atık olarak çevrede depolanmakta, bunun da %40'ı çamura dönüşmektedir [5]. Mermer atıkları; toz, bulamaç ve mermer blokları şeklinde arazilere gelişigüzel dökülerek ocak ve tesislerin yakınındaki su kaynaklarının ve yeşil arazilerin kirletilmesine sebep olmaktadır.

Atık mermerlerin, betonun belirli özelliklerini geliştirmek için beton teknolojisinde,verimli ve ticari olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir (Şekil 2). Araştırmacılar, yaptıkları çalışmalar ile mermer atıklarının, çevresel yönetim sistemine zararını en aza indirmek ve geri dönüşümünü sağlayarak ekonomiye kazandırmak amacıyla, beton teknolojinde kullanımını değerlendirmişlerdir.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, atık mermer tozlarının; çimento ikamesi olarak, atık mermer parçalarının da ince veya kaba agrega (Şekil 3) ikamesi olarak beton üretiminde ve alt zemin iyileştirmesinde kullanıldığı gözlemlenmektedir.

Şekil 2. Mermer atıklarının beton teknolojisinde kullanımı.



Şekil 3. Atık mermer agregaları ve tozu.

2. Atık Mermerlerin Betonda Kullanımı

2.1.Atık Mermer Tozlarının Çimento İkamesi Olarak Kullanımı

Beton; bağlayıcı malzeme (çimento vb.), ince ve kaba agrega ile suyun heterojen bir karışımıdır. Dünyada en fazla enerji tüketen sektörlerden biri de çimento sektörü olup üretimi ile birlikte, küresel karbondioksit (CO_2) üretimine katkıda bulunmaktadır.Günümüzde, hızlı kentleşme ile birlikte bol miktarda çimento üretilmekte, bu durum ise yüksekenerji ihtiyacı ileçevre ve sağlık

sorunlarına neden olmaktadır. Bu kapsamda araştırmacılar tarafından, beton üretiminde çimento kullanımını azaltmak amacıyla, mermer işletmelerinde kesme ve şekillendirmenin yan ürünü olarak elde edilen atık mermer çamuru (Şekil 4) ve tozları kullanılmaktadır.

Şekil 4. Atık mermer çamuru.

Atık mermer çamuru topak halinde bulunduğundan ve karışımlarda homojen olarak dağılmadığından, öncelikle havada kurumaya bırakılmaktadır. Daha sonra, havada kurutulan atık mermer çamuru, çekiçle ezilmekte ve çamur içeriğindeki su miktarının uzaklaştırılması için 24 saatlik etüvde kurutulmaktadır. Kurutulan atık mermer çamurlarının toz malzeme haline getirilmesi için bilyalı değirmenlerde belli sürelerde öğütülme işlemi uygulanmaktadır. Son işlem olarak ise öğütülen malzemeler, 80-90 μm elekten geçirilerek atık mermer tozları elde edilmektedir [6].Günümüze kadar yapılan birçok çalışmada, harç ve beton üretimlerinde atık mermer tozunun kullanım olasılığını değerlendirmek için çalışmalar yapılmıştır.

Aliabdo vd.[7], atık mermer tozunun betonda çimento ve kum ikamesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmalarında, atık mermer tozunu çimentoyla ve kum ile ağırlıkça %0, %7,5, %10 ve %15 oranlarında kısmi olarak yer değiştirerek iki farklı yöntem denemişlerdir.Çalışma sonucunda genel olarakatık mermer tozunun kum yerine kullanılmasının, betonun mekanik özellikleri üzerinde, çimento yerine kullanılmasına göre daha önemli etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.Çimento ikamesi olarak kullanılan atık mermer tozunun, her seviyesinde beton basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü tespit edilirken (28 gün sonra basınç dayanımındaki azalma %7, %4, %5 ve %14'tür), kum ikamesi olarak %15'e kadar kullanılan atık mermer tozunun; basınç dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir. Bu durumun; atık mermer tozunun, mikro ince dolgu maddesi etkisine sahip olmasından kaynaklandığını değerlendirmişlerdir. Rid vd.[8] yaptıkları çalışmalarında, kısmi çimento ikamesi olarak atık mermer tozu ve uçucu kül gibi atık malzemeleri içeren

çevre dostu yüksek dayanımlı bir beton geliştirmeyi amaçlamışlardır. Karışım serilerindeki toplam bağlayıcının ağırlığına göre %2,5 , %5, %7,5 ve %10 atık mermer tozu ve uçucu külü birlikte kullanmışlar ve böylece çimento içeriğini %5, %10, %15 ve %20 oranlarında değiştirmişlerdir. Üretilen numunelerin taze hal özelliklerini ile basınç ve eğilme dayanımları açısından sertleşmiş hal özelliklerini 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük kür sonrası değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, %10'luk kısmi çimento ikameli serilerin (%5 mermer tozu ve %5 uçucu kül) en yüksek dayanımları sağladığı ve %15 (%7,5 mermer tozu ve %7,5 uçucu kül) ikameli karışımın optimal olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, uçucu kül ve atık mermer tozunun birleşik kullanımı ile toplam somutlaşmış karbonda bir azalma sağladığını bildirmişlerdir.

Son yıllarda kullanımı artan kendiliğinden yerleşen beton (KYB)'larda genellikle dolgu malzemesi olarak uçucu kül, taş tozu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünler kullanılmaktadır.Böylece KYB'nin işlenebilirliği artırılmakta ve aynı zamanda yan ürün kullanım miktarı artırılabilmektedir. Bununla birlikte endüstriyel atık ürünlerin çimento veya betonda bu şekilde kullanılması hem ekonomik fayda sağlamakta ve hem de çevre kirliliğini önlemektedir. Topçu vd.[9]'nin yaptıkları bir çalışmada,filler malzeme olarak kullanılan atık mermer tozunun, KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisinin araştırılmasını amaçlamışlardır. Karışım serilerinde kullanılan atık mermer tozunu, karışımdaki bağlayıcı toz malzemelerle; 0, 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 kg/m^3 gibi belirli içeriklerde değiştirmişlerdir. Çalışma sonucunda; KYB'nin taze ve serleşmiş özelliklerinin, atık mermer tozu kullanım miktarının, 1 m^3 beton için 200 kilogram ile sağlanabildiğini değerlendirmişlerdir.

2.2. Atık Mermerlerin İnce Agrega İkamesi Olarak Kullanımı

Beton hacminin yaklaşık %70-75'ini oluşturan agregaların özellikleri, betonun taze ve sertleşmiş haldeki fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde önemli bir rol oynar. Harç ve beton üretimlerinde, ince agrega yerine atık mermer tozunun ilave edilmesi, mermer atıklarını değerlendirmenin iyi bir yoludur. Dinesh ve Babu [10], yaptıkları bir çalışmada, ince agregaların kısmen mermer atıklarıyla değiştirilerek betondaki kullanımını amaçlamışlardır. Bu amaçla, ıslak mermer çamurunu öncelikle kurutmuşlar, daha sonra kurutulan malzemeyi eleyerek ince kum agregası olarak kullanmışlardır. Kontrol betonundaki ince agrega miktarını %10'ar oranlarında artırarak %0'dan %50'ye kadar ince agregaların değiştirilmesi ile ürettikleri beton serilerini; 7, 14 ve 28 gün süreyle kürlemişlerdir. Daha sonra, numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerini uygulamışlardır.

Çalışma sonucunda; %10 ince agrega ikamesine kadar atık mermer tozu kullanımının, betonda alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. Bourzik vd.[11], atık mermer tozunun betonda kısmi kum ikamesi olarak kullanımını incelemek amacıyla, kum ikame sevileri %0, %5, %10, %15 ve %20 olan beşli beton serileri hazırlamışlardır. Yaptıkları deney sonuçlarına göre %15'in altında atık mermer ikame yüzdesi içeren karışımların geleneksel karışımlara kıyasla mekanik özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.Atık mermer tozu içeren betonun işlenebilirliğinin, %15'e varan atık mermer ikame oranı ile arttığı,ikame oranı %20'yi geçtiğinde ise betonun işlenebilirliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Kumar vd.[12], yaptıkları bir çalışmada, ince agrega yerine %20, %30 ve %40 oranlarında atık mermer kullandıkları, polipropilen lif katkılı kendiliğinden yerleşen beton (KYB) serilerinde tüm karışımların taze beton özelliklerini karşıladığını ve serilerin 28 günlük basınç dayanımlarında en yüksek sonucun %20 oranlarında atık mermer kullanılan KYB serisinden elde edildiğini tespit etmişlerdir. Bu durumu, mermer atıklarının ince agrega ile değiştirilmesiyle gözenek yapısının incelmesi ve beton karışımının mikro yapısının artmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmişlerdir. Ghani vd. [13], beton üretiminde kısmen kum yerine %20'lik artışlarla %0 ila %80 arasında atık mermer tozu kullandıkları çalışmalarında üretim yaptıkları numuneleri 14,28 ve 70 günlük sürelerde küre tabi tutmuşlardır. Çalışma sonucunda betonun işlenebilirliğinin, atık mermer tozunun artması ile azaldığı, basınç dayanımlarının ise %40'a varan oranda atık mermer tozu kullanımıyla iyileştirildiği; bu sınırın üstündeki atık mermer tozu artışıyla birlikte dayanımların sürekli olarak azaldığını tespit etmişlerdir.

2.3. Atık Mermerlerin Kaba Agrega İkamesi Olarak Kullanımı

Atık mermerin betonda kaba agrega olarak kullanımındaki öncelikli amaç, atık mermer parçalarının veya bloklarının daha az enerji ile kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulması, doğal agrega kaynaklarına alternatif olması ve geri dönüştürülmesinin sağlanmasıdır.

Gencel vd. [14] tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada; üç farklı su/bağlayıcı oranlarında üretilen beton serilerinde, doğal iri agrega yerine %50 ve %100 oranlarında iri atık mermer agregası kullanmışlardır. Üretilen beton numunelerine işlenebilirlik, gözeneklilik, kuru kütle yoğunluğu, sorptivite, su emme, elastik modül, basınç ve yarmada çekme dayanımı deneylerini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda; betonda iri atık mermer agregası kullanımı ile mermerin pürüzsüz yüzeyinden kaynaklanan özelliği ile işlenebilirliğin bir miktar arttığını, iri atık mermer agregası içeren betonların doğal agrega içeren betonlardan biraz daha iyi mekanik performans

sergilediğini ve betonda iri atık mermer agregası kullanımının, doğal iri agregalara alternatif olabileceğini tespit etmişlerdir. Şenol [15] yaptığı bir çalışmada, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kaba agrega olarak kullanılan kalker esaslı kırmataş yerine %0, 25, 50, 75 ve 100 hacimsel oranlarında bazalt ve atık mermer agregaları kullanarak yüksek dayanımlı-kendiliğinden yerleşen betonserileri üretmiş ve numunelerin fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine agrega tipinin etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, 180 gün kür uygulanan %25 atık mermer agregalı serilerin basınç dayanımının, kontrol serisine göre %9,1 arttığını ve kırmataş agregaları yerine %25 ile %100 oranlarında bazalt veya atık mermer agregaları kullanılarak yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip kendiliğinden yerleşen betonların üretilebileceğini tespit etmiştir. Kore ve Vyas [16], betonda geleneksel doğal iri agrega yerine mermer atıklarını kullanarak yaptıkları bir çalışmada;geleneksel doğal kaba agregayı, ağırlıkça %0 ila %100 arasında farklı oranlarda mermer agregası ile değiştirerek ürettikleri beton serilerinde, işlenebilirliğin kontrol betonuna göre %14 arttığını, 28 günlük basınç dayanımlarının ise %18 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

2.4.Atık Mermerlerin Yol ve Alt Zemin Malzemesi Olarak Kullanımı

Endüstriyel atık malzemelerinin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ve doğal minerallerin (kireç, kil vb.) zemin stabilizasyonundakullanılmasıhem ekonomik üretim hem de atık malzemelerin geri dönüşümü ve çevre kirliliğinin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Son yıllarda yapılan birkaç araştırmada, ince taneli mermer atıklarının zemin uygulamalarında kullanılması durumunda atık mermerin betonun özelliklerini iyileştirdiği gibi zemin özelliklerini de geliştirdiği tespit edilmiştir.

Pateriya vd. [17] yaptıkları çalışmada; ilk olarak, mermer atığını, değişken çimento içeriği (%0,5 ila %10) kullanılarak stabilize etmişler ve ardındançimento ile kombinasyon halinde nano malzeme bazlı stabilizasyon (%0,1 Grafen Oksit Azaltıcı) kullanılarak test yapmışlardır. Çalışma sonucunda, stabilize edilmiş mermer atık matrisinin, yumuşak alt zemin ile alt temel arasındaki basınca dayanıklı bir örtü gibi yol yapımında kullanılabileceğini tespit emişlerdir. Fırat vd. [18] tarafından yapılan bir çalışmada mevcut hafriyat toprağı %5, %10, %15 ve %20 (ağırlıkça) oranlarında uçucu kül, atık mermer tozu ve atık kum ile stabilize edilerek üretilen numuneler, farklı sürelerde kür edilmiştir. Çalışma sonucunda atık madde içeriğindeki artışla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Jassim vd. [19] yaptıkları çalışmada, atık mermer tozunun alt zemin toprağının performansını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Çalışmalarında killi silt toprağın içerisine %0,

3, 6, 9, 12, 15 oranlarında atık mermer tozu kullanarak zemin numuneleri üretmişlerdir. Çalışmada, işlenmemiş toprağa %3 atık mermer tozu eklenmesinin, diğer mermer tozu yüzdeleriyle karşılaştırıldığında en iyi sonuçları verdiğini bulmuşlardır. Filiz vd.[20],atık mermer tozunun parke taşı imalatında kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, atık mermer tozu ile üretilen numunelerin ilgili standartlarda belirtilen parke üretim şartlarını sağladığını, kontrol betonuna göre basınç dayanımlarının; %32,3 ve yarmada çekme dayanımlarının %13,5 oranında arttığını, aşınma kaybının ise %8,4 oranında azaldığını tespit etmişlerdir.

2. Sonuçlar

Betonda atık mermer tozu veya mermer agregalarının kullanımı ile ilgili araştırma çalışmalarının yukarıdaki incelemesinden, atık mermerlerin betona kısmi olarak dahil edilmesinin, betonun taze hal, sertleşmiş hal ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile;

- Betondaki çimentonun %15'inin,agregaların ise %0 ila %100 arasında değişen ikame seviyelerindemermer atıkları ile yer değişimi sonucunda, daha iyi dayanım ve dayanıklılık elde edilebileceği,
- Atık mermerlerin betona kısmi olarak dahil edilmesinin, betonun sertleşmiş ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu,
- Günümüzde beton üretiminde kısmi çimento ikamesi olarak kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstriyel atık malzemelerin, tedarik ve nakliye süreçleri belli bir maliyet oluşturmaktadır. Atık mermer agregası ve tozlarının yerel mermer fabrikalarından serbestçe ve bol miktarda temin edilebilmesi, betonda kullanılan diğer endüstriyel atık malzemeler ile karşılaştırılarak, ekonomik açıdan da alternatif olabileceği,
- Mermerin ocaktan çıkarılması sırasında oluşan iri taneli mermer parçalarının, yol ve alt zemin iyileştirmesinde kullanılması ile taş ocağı atıklarının geri dönüştürülebileceği, doğal agrega talebinin azaltılabileceği, mermer atıklarının ile çevresel atık yönetimive ülke ekonomisine katkı sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, Doğal Taşlar Sektör Raporu, 2021.
2. Kuoribo, E., & Mahmoud, H. (2022). Utilisation of waste marble dust in concrete production: A scientometric review and future research directions. Journal of Cleaner Production, 133872.
3. Demirel, B., & Alyamaç, K. E. (2018). Waste marble powder/dust. In Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete (pp. 181-197). Woodhead Publishing.
4. Bayel, D. K., Karaca, Z., Onen, V., & Deliormanli, A. H. (2016). The relationship between mineral content and flocculant characteristics for slurry waste water recycling at marble processing plants. Mine Water and the Environment, 35(3), 332-336.
5. Bilir, T., Karadağ, Ö., & Aygün, B. F. (2022). Waste marble powder. In Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources (pp. 479-506). Woodhead Publishing.
6. Benjeddou, O., Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Soussi, C., Khadimallah, M. A., Alabduljabbar, H., & Tahir, M. M. (2020). Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar. Journal of Building Engineering, 32, 101642.
7. Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. Construction and building materials, 50, 28-41.
8. Rid, Z. A., Shah, S. N. R., Memon, M. J., Jhatial, A. A., Keerio, M. A., & Goh, W. I. (2022). Evaluation of combined utilization of marble dust powder and fly ash on the properties and sustainability of high-strength concrete. Environmental Science and Pollution Research, 29(19), 28005-28019.
9. Topcu, I. B., Bilir, T., & Uygunoğlu, T. (2009). Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. Construction and building Materials, 23(5), 1947-1953.
10. SD, A. S., Dinesh, A., & Babu, S. (2021). Investigation of waste marble powder in the development of sustainable concrete. Materials Today: Proceedings, 44, 4223-4226.
11. Bourzik, O., Baba, K., Akkouri, N., & Nounah, A. (2022). Effect of waste marble powder on the properties of concrete. Materials Today: Proceedings.
12. Kumar, M. A., Balaji, S., Selvapraveen, S., & Kulanthaivel, P. (2022). Laboratory study on mechanical properties of self compacting concrete

using marble waste and polypropylene fiber. Cleaner Materials, 6, 100156.
13. Ghani, A., Ali, Z., Khan, F. A., Shah, S. R., Khan, S. W., & Rashid, M. (2020). Experimental study on the behavior of waste marble powder as partial replacement of sand in concrete. SN Applied Sciences, 2(9), 1-13.
14. Gencel, O., Nodehi, M., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Koksal, F.,..& Ozbakkaloglu, T. (2022). The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study. Construction and Building Materials, 361, 129612.
15. Şenol, A. F. (2019). Yüksek Dayanımlı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Fiziksel, Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerine Agrega Tipinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi.
16. Kore, S. D., & Vyas, A. K. (2016). Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. Case studies in construction materials, 4, 85-92.
17. Pateriya, A. S., Robert, D. J., Dharavath, K., & Soni, S. K. (2022). Stabilization of marble wastes using cement and nano materials for subgrade applications. Construction and Building Materials, 326, 126865.
18. Firat, S., Khatib, J. M., Yilmaz, G., & Comert, A. T. (2017). Effect of curing time on selected properties of soil stabilized with fly ash, marble dust and waste sand for road sub-base materials. Waste Management & Research, 35(7), 747-756.
19. Jassim, N. W., Hassan, H. A., Mohammed, H. A., & Fattah, M. Y. (2022). Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. Results in Engineering, 100436.
20. Filiz, M., Cengiz, Ö., Soykan, O., & Yunus, E. (2010). Atık mermer tozunun parke taşlarında kullanılması. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(2), 57-72.

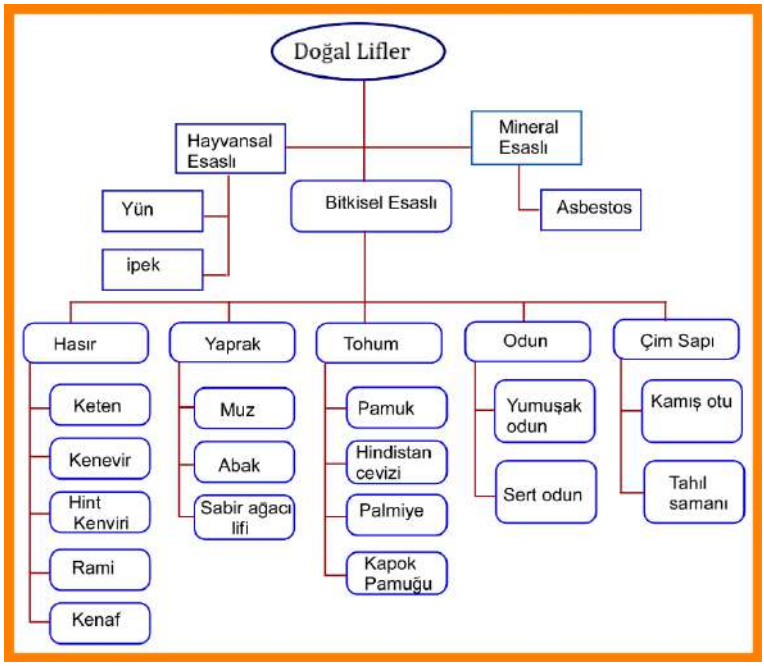
DOĞAL LİF TAKVİYELER

Ali AVCI[1],
Ayşegül AKDOĞAN EKER[2],
Mehmet Safa BODUR[3]

[1]Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
ORCID: 0000-0003-3901-6248
[2]Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID2:0000-0003-0212-9230
[3]Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
ORCID3:0000-0001-5976-0256

Doğal Lifler

Doğal lifler günlük hayatımızda birçok uygulamada doğrudan veya dolayı olarak kullandığımız malzemelerdir. Doğal liflerin en büyük özelliği, kullanım ömürlerinin sonunda kompostlama veya diğer yöntemlerle bozunabilmeleridir. Doğal lifler genellikle kaynağına göre bitkisel, hayvansal ve mineral olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Thakur, Thakur, andGupta 2014). Tüm bitkisel liflerin ana maddesi selülozdan hayvansal lifler ise proteinden meydana gelmektedirler. İpek hariç birçok hayvansal lifin dayanımı bitkisel liflere göre daha düşüktür. Doğal lifler arasında, bitkisel lifler en sık olarak uygulama alanı bulan ve yüksek ticari öneme sahip olan sınıftır. Pamuk dışındaki hemen hemen tüm bitkisel lifler, esas olarak selüloz, hemiselüloz, linyin, reçine ve suda çözünür bileşikten oluşurlar (KoronisandSilva 2018). Belirli bir lifteki selüloz miktarı, yapısındaki hidrojen ve diğer bağları sayesinde lifin sertliğini ve dayanımını belirler. Daha yüksek oranda hidroksil gruplarının ve higroskopik yapının varlığından dolayı, bitkisel liflerin önemli özelliklerinden biri yüksek nem tutma kabiliyetleridir. Bitkilerdeki selüloz, hemiselüloz ve linyin miktarları olgunlukları, büyüme yerleri, çevre ve hatta türler nedeniyle farklılık gösterir. Tüm bitkisel lifleri ortak bir formülü $(C_6H_{10}O_5)_n$ olan selülozdan yaklaşık %65-70 oranında içerirler ve kristal yapıya sahiptir (Syduzzaman et al. 2020). Şekil 1'de farklı türdeki doğal liflerin kaynağına göre sınıflandırılması verilmiştir. Asbest kanserojen etkisi nedeniyle artık çalışmalarda tercih edilmemektedir. Doğal liflerin hücre yapıları, her biri farklı bir kalınlığa ve kimyasal bileşime sahip dört farklı katmandan oluşan karmaşık katmanlı bir tüp şeklindedir. Liflerin hücre duvarı, bir tane birincil ince duvar, üç tane ikincil hücre duvarı ve lümen adı verilen kalın orta tabakadan oluşur. Lümenin içi boştur ve bu kısımda liflerin ısıyı tutmasını sağlayan hava vardır. Doğal bir lifteki her bir katman, bir hemiselüloz ve linyin matrisine gömülü selüloz içermektedir (Lotfi et al. 2021; Thakur et al. 2014).



Şekil 1. Doğal liflerin sınıflandırılması (Sparnins 2009)

Selüloz molekülleri rastgele yönlendirilir ve molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağları oluşturma eğilimindedir. Selülozun paketleme yoğunluğu oldukça kristalin olduğu için %80'e varan kristallin yapıda olabilir. Kalan kısım daha düşük bir paketleme yoğunluğuna sahiptir ve genellikle amorf selüloz olarak adlandırılır.Çoğu bitkinin kuru ağırlığının, yaklaşık %45-50'si selülozdan oluşur (KoronisandSilva 2018). Hemiselüloz, pektinin çıkarılmasından sonra selüloza bağlanan oldukça dallanmış polisakkaritlerden oluşur. Linyin şekilsizdir, hücre duvarlarını sertleştirir ve selüloz için koruyucu bir bariyer görevi görür. Şekil 2 'de bir doğal lifin hücresel gösterimi verilmektedir. Genellikle yüksek selüloz oranı ve keten, kenevir, kenaf, jüt ve rami gibi selüloz mikrofibrilleri lif yönünde daha fazla hizalanmış olan liflerde yüksek performans elde edilir. Özellikle keten, kenaf ve kenevir lifleri, diğer sak liflerine kıyasla üstün mekanik özellikleri, yüksek çekme dayanımları nedeniyle kompozit uygulamalarında gelecek vaat eden lifler olarak görülmektedirler (Lotfi et al. 2021). Doğal liflerin özellikleri, kimyasal bileşimi ve yapısının yanı sıra, lifin yetiştirme koşulları, hasat zamanı, çıkarma yöntemi, işleme ve saklama prosedürleriyle ilgili olan önemli ölçüde değişir.

Şekil 2. Doğal lifin yapısal görünümü (Bhattacharyya, Subasinghe, and Kim 2015)

Doğal liflerin mukavemeti ve sertliği genellikle cam liflerden daha düşük olmasına rağmen doğal liflerin sertliği cam lifle karılaştırılabilir. Doğal liflerin özgül elastik modülleri cam lifinden daha yüksek iken özgül dayanımları ise hemen hemen aynıdır. Farklı doğal liflerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin, çeşitli araştırmacıların sonuçları Tablo 1'de verilmektedir. Mühendislik uygulamaları için, doğal liflerin mekanik özelliklerindeki bu değişkenlik, parçaların doğru, güvenli olması ve arızalarının kesin olarak tahmin edilmesini zorlaştır. Bitki lifleri, doğa tarafından tasarlanmış birer kompozit bir malzeme olup bitki liflerinin kimyasal bileşimi ve yapısı Tablo 2'te verilmektedir. Lifler temelde sert, kristalin selüloz mikrofibril ile güçlendirilmiş amorf bir linyin ve hemiselülozdan oluşurlar. Selüloz, bitkisel liflerdeki en önemli yapısal bileşendir ancak, selülozun ısıl direnci zayıftır. Bitki liflerinin genel özelliklerini belirleyen diğer önemli faktörler ise; yapıları, kimyasal bileşimleri, mikrofibrillerin açısı, hücre boyutları ve lif kusurlarıdır. Pamuk dışındaki bitki liflerinin çoğu selüloz, hemiselülozlar, linyin, yağ gibi suda çözünür bazı bileşiklerden meydana gelirler. Şekil 3'te çoğu doğal lifin sıklıkla kullanılan sentetik liflerin, birim fiyatından çok daha ucuz olduğu görülmektedir. Bu nedenle, çeşitli lif takviyeli kompozitler arasında mekanik performans, maliyet ve çevresel sonuçlar hesaba katıldığında, keten, kenevir ve Hint keneviri takviyeli kompozitlerin, cam ve karbon lif takviyeli kompozitlere alternatif olarak kullanılabileceği görülmektedir. Fiyat açısından bakıldığında, doğal liflerin tonu yaklaşık olarak 200 dolar iken cam liflerin tonu 1200-3000 dolar, karbon liflerin tonu ise 8000-12500 dolar aralığındadır (Şekil 3). Keten, kenevir, Hint keneviri veya kenaf gibi doğal liflerin karbon ayak izi, muadilleri cam ve mineral liflere göre çok daha düşüktür. Bir ton cam lifin üretimi için yaklaşık 1.7-2.5 ton CO_2 eşdeğeri salınım hesaplanmışken, bu oran doğal lifler için sadece 0.35-0.55 ton CO_2 eşdeğeridir. Yani doğal lifler cam liflere göre yaklaşık %80 daha düşük karbon ayak izine sahiptirler.

Tablo 1. Doğal ve sentetik liflerin fiziksel özellikleri (Akdoğan and Vanlı 2020; El-Abbassi et al. 2020; Pickering, Efendy, and Le 2016; Sparnins 2009; Syduzzaman et al. 2020)

Lif Türü	Yoğunluk g cm^{-3}	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Özgül Dayanım (MPa g cm^{-3})	Özgül Modül (GPa g cm^{-3})	Uzama (%)
Keten	1.4-1.5	345–2000	27–103	165-1430	19–73	1.2-3.3
Kendir	1.5	270–1100	23.5–90	180–740	150–495	1-3.5
Hint Kenevir	1.3–1.5	320–800	10–78	245–610	7.1–60	1-1.8
Rami	1.0-1.5	400–1000	24.5–128	265- 665	16-85	1.2-3.8
Kenevir	1.2-1.4	223-930	14.5-53	160-665	10-475	1.5-6.9
Sisal	1.3–1.5	363–855	9.4–38	240-570	6-25	2-7
Hindistan Cevizi	1.15-1.45	95-230	2.8-6	80-191	2.3-5	15-51
Pamuk	1.5–1.6	190–800	5.5–13	190–530	3.5-8.6	3.7–10
Muz	1.35	355-500	12-33.8	260-370	9-25	1.5-9
Bambu	0.6-1.1	140-850	11-32	150-950	12-35	2.5-3.7
İpek	1.3	100–1500	5–25	100–1500	4–20	18-60
Tüy	0.9	100–203	3–10	112–226	3.3–11	___
Cam	2.5	2000–3000	72	800–1200	29	2.5-3.4
Karbon	1.7	4000	235	2350	138	1.4-1.8

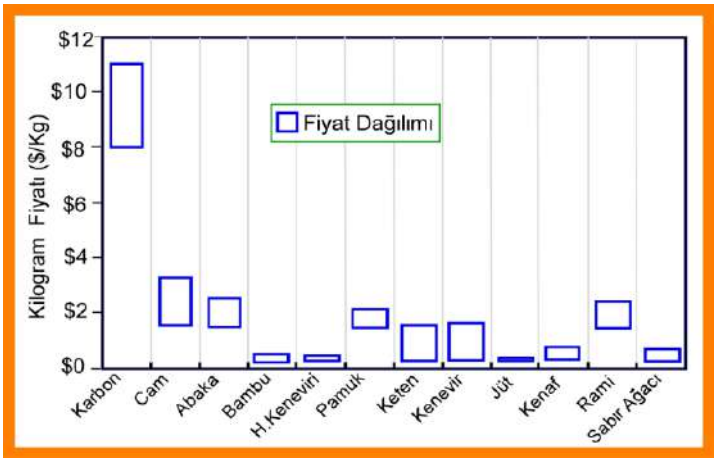
Bununla birlikte, doğal lif takviyeli kompozitler, cam lif takviyeli kompozitlere göre yaklaşık %50 daha düşük karbon salınımına sahiptir. Keten, kenevir, Hint kenevir ve kenaf gibi farklı doğal liflerin karbon ayak izleri birbirine yakındır.

Tablo 2. Doğal bitkisel liflerin kimyasal bileşimleri (Bhattacharyya et al. 2015; GholampourandOzbakkaloglu 2020; Hao et al. 2018; Kilinç, Durmuşkahya, andSeydibeyoğlu 2017; Mohanty, Drzal, andGroup 2005)

Lif Türü	Selüloz ağ. %	Yarı Selüloz ağ. %	Linyin ağ. %	Pektin ağ. %	Yağlar ağ. %
Keten	64.1-81	16.7-20.6	2-2.2	2.3	1.5-3
Kenevir	68-74	15-22.4	3.7-10	0.9	0.8
Hint Keneviri	61-71.5	12-20.4	12-13	0.2	0.5
Rami	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9	0.3
Sisal	31-78	10-21.5	8-19	10	2
Hindistan Cevizi	32-43	0.15-0.25	40-45	3-4	___
Pamuk	82.7-90	5.7	___	0.1	0.6
Muz	60-65	10-19	5-10	___	___
Bambu	26-43	30	21-31	___	___
Abaka	56-68	20-25	7-13	1	3
Kenaf	45-72	21.5-33.9	8-21.2	3-5	___

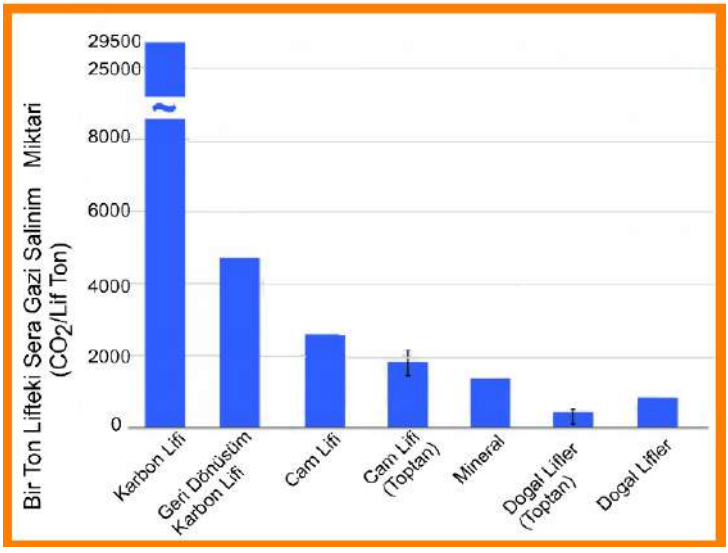
Şekil 4'te doğal lifler için ton başına yaklaşık 400 kg CO_2-eşdeğerdir verilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere karbon lifinin karbon ayak izi doğal liflerle kıyaslanamayacak kadar yüksektir. Doğal liftlerin mahsul olarak yetiştirilmesinden son kullanımına kadar yapısında karbon tutuğundan esasında, karbon salınım değerleri daha da düşüktür.

2015'te Paris'te yapılan iklim zirvesinde 2050 yılına kadar endüstriyel karbon salınımını düşürecek ve karbon ayak izini azaltacak yeni üretim teknolojileri ve uygulamaları ile çeşitli kısıtlamalara kadar birçok tedbir tartışılmıştır. Avrupa Birliği (AB), 1990 karbon salınımı miktarına göre 2030 itibariyle %40'lık azalma, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) 2025 itibariyle 2005 yılı karbon salınımı miktarına göre %28'lik azalma taahhüt etmişlerdir. Almanya ise 2035 yılına kadar enerji ihtiyacının yüzde 60'ını temiz (yeşil) enerjiden temin etmeyi planladığını da bildirmiştir. Karbon salınımında en büyük pay başta enerji olmak üzere petrolden üretilen her şey diye özetlemek mümkündür. Türkiye gelişmekte olan bir ülke olarak karbon salınımını 2030 yılına varıldığında yüzde 21'e düşürmeyi taahhüt etmiştir. 2015 yılı Paris iklim zirvesinde 200 ülke sera gazı salınımını azaltacaklarını taahhüt etmişlerdir. Ancak, Dünya nüfusunun %5'inin yaşadığı ABD dünya genelindeki karbon salınımının %30'undan sorumlu olmasına rağmen bu taahhüdünden 2017 yılında çekilmiştir.



Şekil 3. Doğal lifler ve sentetik lifler arasında ağırlık başına maliyet karşılaştırması referans (Lotfi et al. 2021)

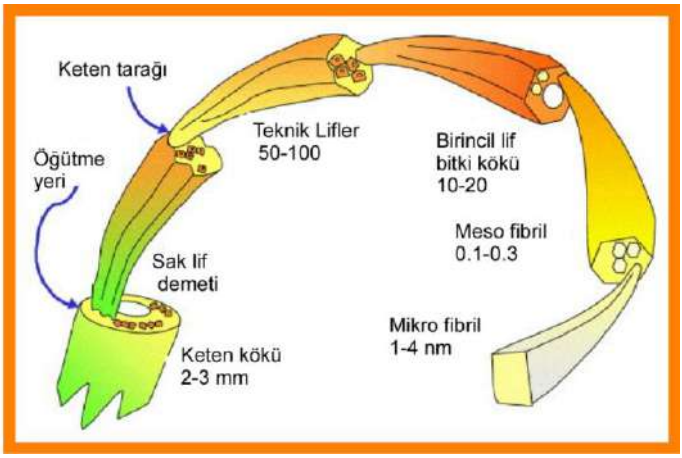
Ülkemiz de ise son durum, Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) Mart 2021 verilerine göre toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %3.1 azalarak 506.1 milyon ton (Mt) CO_2 eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplanmıştır (Co 2021). İnsanlık ve iklim için verilen bu taahhütlerin gerçekleştirmenin önemli yollarından birisi de hiç şüphesiz karbon ayak izi muadillerine göre çok düşük olan yeşil kompozitlerin, yeşil malzemelerin geliştirilerek endüstriyel ölçekte kullanılmasıdır.



Şekil 4. Farklı liflere ait bir kilodaki karbon ayak izi verileri (Chegdani et al. 2020)

Keten Lifi

Keten (Linumusitatissimum) dünyadaki en eski lif için kullanılan bitkilerinden biridir. Tekstil alanında kullanımının 7000 yılı aştığı bilinmektedir (Yan, Chouw, andJayaraman 2014). Ketenin, Güneybatı Asya ve Akdeniz menşeli olduğu ileri sürülmekle birlikte, Çin, Hindistan, Arjantin, Kanada ve ABD gibi çok çeşitli ülkelerde yetişmektedir (Kilinç et al. 2017). Kanada 2005-2006 yıllarında, yaklaşık 1035 milyon ton keten üretmiştir ve şu anda ihracatının %60'ını Avrupa Birliği'ne, %30'unu ABD'ye ve %4'ünü Japonya'ya göndermektedir (Ramesh 2019). Keten, tek yıllık bir bitkidir ve 0.5±1.25 m boyunda, gövde çapı 16±3.2 mm'dir. Yıllık otsu gövdeli bir bitki olan keten, lif üretimi için yaklaşık 100 gün sonra veya bitkinin tabanı sararınca hasat edilir. Bitki hem lifi hem de keten tohumu yağı yapımında kullanılan tohumları için yetiştirilir. Sak lifleri çürüme yoluyla kabuktan ayrılır. Keten bitkisi yaklaşık %25 tohum, %75 sap ve yapraktan oluşur (Kilinç et al. 2017). Bir sapın ağırlığının yaklaşık ¼'ü sak lifidir. Keten çeşidine göre 80-150 cm boya kadar büyüyebilir (Bismarck, Mishra, andLampke 2005). Şekil 5'te kökten mikrofibrile kadar bir keten lifinin şematik gösterimi ve boyutları verilmektedir. Nihai lif uzunluğu ortalama 33 mm (9±70 mm) ve liflerin genişliği ortalama 19 µm (5±38 µm)'dir(Pickering 2008). Kaba sak lif demetleri, mekanik kırma, kesme ile gövdeden ayrılarak teknik lifler elde edilir. Ketenin lifinin kalitesi ve hasat edilen ürünün verimi, yetişmesi ve hasadı sırasındaki hava koşullarındaki değişimlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Örneğin, keten lifi hafif yağmurlu havada ve 18-20 °C sıcaklıkta hasat edilirse en iyi özellikler elde edileceği bildirilmiştir (Ramesh 2019). Şekil 5'te görüldüğü üzere birincil lifler; bir birincil hücre duvarı, ikincil bir hücre duvarı ve lifin merkezinde açık bir kanal olan bir lümenden oluşan tek bitki hücreleridir. İkincil hücre duvarı; lif çapının çoğunu oluşturur ve esas olarak selüloz ve hemiselülozdan oluşur. İkinci hücre duvarındaki selüloz kristaliteleri, amorf hemiselüloz fazlar tarafından birbirine yapıştırılmış, yönlendirilmiş, oldukça kristalin mikro fibriller şeklindedir. Keten liflerinin rengi açık sarıdan griye değişebilir. Lifler çok güçlüdür ama aynı zamanda esnektir. Uzaması çok düşük olup genel olarak özellikleri diğer doğal liflerde olduğu gibi, büyüme koşulları, moleküler yapısı ve uygulanan çürütme işlemlerine bağlıdır. Keten liflerinin elde edilmesi, su ayırma, nem tutma ve enzimatik ayrıştırma gibi farklı çürütme yöntemleriyle yapılabilir. Çürütmenin amacı, teknik lif demetlerinin odunsu dokudan ayrılarak gövdenin çekirdeğine bağlanan pektinin çözülmesidir.



Şekil 5. Keten lifinin şematik (Küresel Isınma ve 2015 BM Paris İklim Zirvesi (COP21))

Doğal keten hücre duvarını yaklaşık %70-75'i selüloz, %15'i yarı selüloz ve %10-15'i pektin malzeme, yaklaşık %2'si linyin ve %2'si kadarı bal mumundan oluşur. Keten lifleri 200 °C'nin üzerinde ısıl olarak bozunurlar(Bismarck et al. 2005). Keten, seyreltik zayıf asitlere ve alkalin solüsyonlara karşı dirençlidir, ancak sıcak seyreltik asitler veya soğuk yoğunlaştırılmış asitler ve UV ışını yapısını bozar. Keten lifinin bolluğu, yenilenebilirliği ve biyolojik olarak bozunabilirliliği gibi özellikleri kullanım alanını genişletmektedir. Keten lifleri halı, havlu, ip, kumaş gibi geleneksel keten lif uygulamalarının yanı sıra, kompozit malzeme yapımında da takviye elemanı olarak kullanılırlar. Otomobiller için dış zemin paneli üretmek için keten lifi takviyeli polipropilenkompozitler kullanılmış olup keten lifi içeren biyokompozit çalışmaları giderek artmaktadır (Bhattacharyya et al. 2015; Kilinç et al. 2017).

Kenevir Lifi

Kenevir bitkisi (Cannabissativa), Avrupa, Kanada, Çin ve diğer ılıman iklimlerde yetişen tek yıllık bir bitkidir. Keten bitkisi 4 ± 20 mm gövde çapı ile yaklaşık 140 ± 145 günde 4.5 m (1.2 ± 5 m) yüksekliğe kadar büyür(Pickering 2008). Kenevir ve kenevir çeşitlerinin yaprakları, esrar gibi afyon içeren reçine salgıladıkları için üretimleri kontrol altındadır. Kenevirin böcek ve mantar ilaçlarına ve gübreye neredeyse hiç ihtiyacı yoktur. Kenevir çeşitleri tekstil, selüloz ve kâğıt endüstrisi tarafından tercih edilmektedir (Bismarck et al. 2005). Kenevir, çürütme ile elde edilen ince, açık renkli, parlak ve güçlü bir sak lifidir. Aynı zamanda, keten lifi gibi benzer otomotiv uygulamalarında da kullanılır (Bhattacharyya et al. 2015)

Şekil 6. Kenevir bitkisi görünümü

Beyazımsı sarıdan sarıya çalan kenevir lifleri 50 mm uzunluğa kadar olabilir, yüksek derecede suya dayanıklıdır ve iyi bir gerilme mukavemetine sahiptir. Kenevir lifleri keten ile karşılaştırıldığında daha kabadır ve ağartılması zordur. Lifler mükemmel bir nem direncine sahiptir ve suda çok yavaş çürür. Kenevir lifleri yüksek mukavemete (ketenden yaklaşık %20 daha yüksek) ancak kopmada düşük uzamaya sahiptir. Sepe ve arkadaşları(Sepe et al. 2018), alkali işlenmiş kenevir lifini epoksi matrise takviye ederek üretilen kompozitin ara yüzey bağı üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Şekil 6'da kenevir bitkisinin yeşil hali verilmektedir.

Hint Keneviri Lifi

Hint keneviri, Malvaceae ailesinin Corchorus türüne ait olup neredeyse 100 farklı cinsi vardır. Hint keneviri en ucuz liflerden biri olup pamuktan sonra en çok üretilen ikinci doğal liftir. Hint keneviri 120 ± 150 günde yetişir ve ılık ve nemli iklimlerde ortalama metre kareden 0.17 kg lif elde edilebilir ve bitki boyu 2.5 m ile 4.5 m arasında değişebilir, bitki kalınlığı 2-3 cm olabilir (Pickering 2008). Hint keneviri liflerinin elde edilmesi, çürütme için en yaygın yöntem olan su ayırma ile yapılabilir.

Şekil 7. Hint keneviri gövdesi görünümü (Kilinç et al. 2017)

Ağırlıkça çıkarılan kuru lifler, yeşil mahsulün yaklaşık %4 - %4.5'idir ve lifler 1,5–3 m uzunluğa sahiptir (Kilinç et al. 2017). Hint kenevir lifleri dayanıklıdır ancak kırılgandır ve kopana kadar ki uzamaları düşüktür. Yapısındaki, %20'ye varan linyin içeriği liflerde kırılganlığa neden olur. Asitlere gün ışığına ve neme karşı dayanımları düşüktür. Hint keneviri liflerinin yanmaya ve ısıya karşı dirençlerinin iyi olması moda, seyahat, otomotiv, mobilya, halı ve diğer zemin kaplamaları gibi çeşitli alanlarda kullanım yeri bulmasını sağlamıştır. Ayrıca, Hint keneviri takviyeli, termoplastikmatrislikompozitler, Alman otomotiv kapı paneli endüstrisinde önemli bir pazar yeri bulmaktadır. Jiang ve arkadaşları (Jiang et al. 2020), PLA matris içerisine kısa jüt lifleri takviye ederek otomobil iç parçası için kompozit üretmişlerdir. Şekil 7'de kompozit malzeme yapımında kullanılmak üzere hasat edilmiş Hint keneviri gövdeleri görülmektedir.

Kenaf Lifi

Hibiscus türünden olan Kenaf, Güney Asya, Hindistan, Bangladeş, Tayland ve Afrika'nın bazı bölgelerine ve ılıman iklimlerde yetişen tek yıllık bir bitkidir. Kenaf lifi, üçüncü dünya ülkelerinde yetiştirilen önemli bir bitki olarak ortaya çıkmış ve endüstriyel bir ürün olarak kabul edilmiştir. Cam lifi gibi sentetik elyafın yerini almak için büyük bir potansiyele sahiptir. Kenaf lifi kullanımı, sentetik liflerden daha hafiftir, çevre dostudur ve sentetik lifler ile karşılaştırılabilecek çekme dayanımı gibi mekanik özelliklere sahiptir (Rahman andPutra 2018). Uzun sak elyaf türü, kompozit levhalar, tekstil, kâğıt hamuru ve kâğıt yapmak için kullanılır. Bastkenaf lifi, çekirdek lifinden daha iyi mukavemet özelliklerine sahiptir; dolayısıyla yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanımı daha uygundur (Hao et al. 2018). Elsaid ve arkadaşları (Elsaid et al. 2011), yapmış oldukları çalışmada, beton kompozitin özelliklerini düz betonla karşılaştırmak için kenafbast lifini güçlendirmek için kullandı. Elde

ettikleri sonuçlar, beton kompozitin mekanik özelliklerinin düz beton numunesi ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir. Dahası, beton kompozit yüksek tokluk göstermiştir. Bu nedenle beton kompozitin inşaat uygulamaları için potansiyel malzeme olduğunu bildirmişlerdir. Bitki odunsu bir kaide ile 1.5 ± 3.5 m boyunda büyür. Bitkinin büyüme süresi 150 ± 180 gündür. Sapları 1 ± 2 cm çapındadır ve genellikle dallıdır. Şekil 8'de kenaf bitkisine ait resim verilmektedir.

Şekil 8. Kenaf bitkisi genel görünümü (Kilinç et al. 2017)

Rami Lifi

Rami, Endonezya, Japonya, Hindistan ve Çin'e özgü bir ısırgan otu olan Bochmerianivea'nın (Urticaceae) saplarından üretilir. Sıcak ve nemli iklimlerde 45 ± 55 günde olgunlaşan çok yıllık bir bitkidir (Şekil 9). 7 ± 15 cm uzunluğunda ve 6 ± 12 cm genişliğinde kalp şeklinde yaprakları olan 1 ± 2.5 m uzunluğa kadar büyüyebilir (Pickering 2008). Sapın dış kısmından elde edilen lifler en uzun ve en güçlü tekstil liflerindendir. Genelde lifin çapı 10 ila 25 µm arasında değişir. Ham haldeki lifler eğrilmeden önce çıkarılması gereken %25-35 bitki sakızı ve az miktarda parankim hücresi ihtiva eder. Bitki yeşilken kesilir elle yaprakları dökülür ve odunsu gövdeden sak şeritleri çıkarılır. Rami lifleri düz ve düzensizdirler, kalın hücre duvarına sahiptirler. Birincil hücre duvarı genellikle odundandır ve bu durum liflerin düşük higroskopik özellik göstermesine neden olur. Rami lifleri çok ince ve ipeğe benzer, doğal olarak beyaz renktedir ve yüksek parlaklığa sahiptir. Rami lifleri, bakteri, küf ve böcek saldırısına karşı iyi dirençtir. Lifler alkali ortamda kararlıdırlar ve hafif asitlerden zarar görmez. Ancak, büyük ölçüde üretim bölgeleri ve ticari açıdan önemli diğer sak liflerinden gerekenden daha kapsamlı ön işlem gerektirmektedir.

Şekil 9. Rami bitkisi genel görünümü (Netravali 2004)

Mükemmel lif özellikleri nedeniyle rami lifleri, polimer kompozitler için takviye elamanı olarak kullanılmaktadırlar. TaoYu ve arkadaşları (Yu, Jiang, andLi 2014), rami lifini PLA matris içerisine takviye ederek kompozit malzeme üretmişlerdir. Kompozit yaparak PLA'nın ısıl kararlılığı ve mekanik özelliklerinde artı sağlanmıştır.

Sonuç

Son yıllarda biyokompozitlerin mekanik özelliklerinde yaşanan ilerlemelerden dolayı kullanım alanları önemli ölçüde arttı. Bu nedenle fiber seçimi oluşturulacak kompozitin mukavemet, sertlik ve darbe dayanımı gibi özelliklerini etkilediğinden çalışmada sıklıkla kullanılan doğal liflerin temel özellikleri verildi. Jüt, keten, kenevir, muz, sisal vb. gibi çeşitli yaygın olarak kullanılan liflerin fiziksel özelikleri ve kimyasal bileşimleri tablolar şeklinde verildi. Ayrıca, CO2 salınımlarının ve fiyatlarının sentetik liflere göre uygunluğu cam ve karbon lifle kıyaslandı.

Bitkisel liflerin iyi özgül modüldeğerleri, düşük yoğunluğu, kayda değer tokluk özellikleri, geri dönüştürülebilirliği, doğada bol bulunabilir olmaları, toksik olmamaları gibi başlıca özellikleri, en yakın rakibi cam lifi ile kıyaslandığında öne çıkan avantajlarıdır. Bunun yanı sıra yanma ve su tutma dayanımının düşük olması, ara yüzey bağının iyileştirilmeye muhtaç olması ve lif özelliklerinin bitkinin kaynağına ve yaşına bağlı olarak dalgalanması kompozit üretimindeki ana kısıtlarıdır.

Teşekkürler

Bu çalışma Ali AVCI'nın Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği İmal Usulleri Programında hazırlamış olduğu "Otomotiv Sektöründe Kullanılmak Üzere Çevre Dostu Yeni Nesil Doğal Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi" adlı tezinden türetilmiştir. Yıldız Teknik Üniversitesi BAP birimi, FDK_3401_2018 numaralı ve Otomotiv Sektöründe Kullanılmak Üzere Çevre Dostu Yeni Nesil Doğal Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi, başlıklı proje ile çalışmayı desteklemiştir.

KAYNAKÇALAR

1. Akdoğan, Anil, and Ali Serdar Vanlı. 2020. "Natural Fiber ThermoplasticComposites in Terms of New Production Technologies: A Review." *Pamukkale UniversityJournal of EngineeringSciences* 26(1):30–36. doi: 10.5505/pajes.2019.04864.
2. Bhattacharyya, Debes, ArunaSubasinghe, and Nam Kyeun Kim. 2015. *Natural Fibers: TheirCompositesandFlammabilityCharacterizations*. ElsevierInc.
3. Bismarck, Alexander, SupriyaMishra, and Thomas Lampke. 2005. *PlantFibers as ReinforcementforGreenComposites*. Vol. 6.
4. Chegdani, Faissal, BehrouzTakabi, Mohamed el Mansori, Bruce L. Tai, andSatish T. S. Bukkapatnam. 2020. "Effect of Flax Fiber Orientation on MachiningBehaviorandSurfaceFinish of Natural Fiber ReinforcedPolymerComposites." *Journal of ManufacturingProcesses*54:337–46. doi: 10.1016/J.JMAPRO.2020.03.025.
5. Co, Mt. 2021. "Sera Gazı Emisyon İstatistikleri , 1990-2019." 2018–20.
6. El-Abbassi, Fatima Ezzahra, MustaphaAssarar, RezakAyad, AlainBourmaud, andChristopheBaley. 2020. "A Review on Alfa Fibre (StipaTenacissima L.): FromthePlant Architecture totheReinforcement of PolymerComposites." *CompositesPart A: AppliedScienceandManufacturing* 128(June 2019):105677. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105677.
7. Elsaid, A., M. Dawood, R. Seracino, and C. Bobko. 2011. "MechanicalProperties of Kenaf Fiber ReinforcedConcrete." *Construction andBuildingMaterials* 25(4):1991–2001. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.052.
8. Gholampour, Aliakbar, and Togay Ozbakkaloglu. 2020. *A Review of Natural Fiber Composites: Properties, ModificationandProcessingTechniques, Characterization, Applications*. Vol. 55. Springer US.
9. Hao, L. C., S. M. Sapuan, M. R. Hassan, and R. M. Sheltami. 2018. *Natural Fiber ReinforcedVinylPolymerComposites*. Elsevier Ltd.
10. Jiang, Ning, YaominLi, YuankunLi, Tao Yu, Yan Li, DiLi, JiachuanXu, CuipingWang, andYingShi. 2020. "Effect of ShortJuteFibers on theHydrolyticDegradationBehavior of Poly(LacticAcid)." *PolymerDegradationandStability* 178. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109214.
11. Kilinç, Ahmet Çağri, Cenk Durmuşkahya, and M. Özgür Seydibeyoğlu. 2017. "Natural Fibers." *Fiber Technologyfor Fiber-ReinforcedComposites* 209–35. doi: 10.1016/B978-0-08-101871-2.00010-2.

12. Koronis, Georgios, andArlindoSilva, eds. 2018. *GreenCompositesfor Automotive Applications*. 1st ed. Kidlington,:Woodhead Publishing.
13. Lotfi, Amirhossein, HuaizhongLi, DzungVietDao, andGangadharaPrusty. 2021. "Natural Fiber–ReinforcedComposites: A Review on Material, Manufacturing, andMachinability." *Journal of ThermoplasticCompositeMaterials* 34(2):238–84. doi: 10.1177/0892705719844546.
14. Mohanty, Amar K., Lawrence T. Drzal, and Francis Group. 2005. *NATURAL FIBERS , BIOPOLYMERS , AND BIOCOMPOSITES EditedBy*.
15. Netravali, Anil N. 2004. *Ramie Fiber Reinforced Natural Plastics*. Boston, MA: Springer.
16. Pickering, K. L. 2008. *PropertiesandPerformance of Natural-FibreComposites*.
17. Pickering, K. L., M. G. AruanEfendy, and T. M. Le. 2016. "A Review of RecentDevelopments in Natural FibreCompositesandTheirMechanicalPerformance." *CompositesPart A: AppliedScienceandManufacturing*83:98–112. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.
18. Rahman, Rozyanty, andSyedZhaferFirdausSyedPutra. 2018. *Tensile Properties of Natural andSynthetic Fiber-ReinforcedPolymerComposites*. Elsevier Ltd.
19. Ramesh, M. 2019. "Flax (LinumUsitatissimum L.) FibreReinforcedPolymerCompositeMaterials: A Review on Preparation, PropertiesandProspects." *Progress in MaterialsScience* 102(December 2018):109–66. doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.12.004.
20. Sepe, R., F. Bollino, L. Boccarusso, and F. Caputo. 2018. "Influence of ChemicalTreatments on MechanicalProperties of Hemp Fiber ReinforcedComposites." *CompositesPart B: Engineering* 133:210–17. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.030.
21. Sparnins, Edgars. 2009. *Thèse_2009_Mechanical Properties of FlaxFibers.Pdf*.
22. Syduzzaman, Md, Md Abdullah Al Faruque, Kadir Bilisik, and Maryam Naebe. 2020. "Plant-Based Natural FibreReinforcedComposites: A Review on Fabrication, Propertiesand Applications." *Coatings* 10(10):1–34. doi: 10.3390/coatings10100973.
23. Thakur, Vijay Kumar, ManjuKumariThakur, andRaju Kumar Gupta. 2014. "Review: Raw Natural Fiber-BasedPolymerComposites." *International Journal of Polymer Analysis andCharacterization*.

24. Yan, Libo, NawawiChouw, andKrishnanJayaraman. 2014. “FlaxFibreandItsComposites - A Review.” *CompositesPart B: Engineering*56:296–317. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014.
25. Yu, Tao, NingJiang, and Yan Li. 2014. “Study on ShortRamie Fiber/Poly(LacticAcid) CompositesCompatibilizedbyMaleicAnhydride.” *CompositesPart A: AppliedScienceandManufacturing*64:139–46. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.05.008.

SİLİKA NANOPARTİKÜL ÜRETİMİNDE BADEM KABUĞUNUN KULLANIMI

Doç.Dr. Başak MESCİ OKTAY[1]
Prof. Dr. Feza GEYİKÇİ [2]

[1]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1204-0195
[2]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Kimya Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4789-1026

1. GİRİŞ

Silisyum dioksit, silika olarak bilinen bir silisyum ve iki oksijen atomundan oluşan ve kimyasal formülü SiO_2 olan bir bileşiktir. Genellikle doğada kuvars, kuvarsit, kumtaşı, granit ve çakıl olarak bulunur ve silis ana bileşendir [1-2]. Silisyum dioksit (SiO_2) birçok dikkat çekici özelliğe sahiptir. Kontrol edilebilir gözenek boyutu, değiştirilebilir yüzey, güçlü mekanik özellikler ve nispeten inert bir kimyasal bileşime sahip olması çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir. [3].Ayrıca hücre duvarlarının içinde veya dışında farklı biyolojik organizmalarda diyatomlar olarak bulunabilir [4]. Elektronik bileşenler, döküm kalıpları, ısı yalıtımı gibi çok çeşitli alanlarda yaygın kullanım alanına sahip olup, cam ve seramik hammaddesi, beton, harç, kompozit ve kauçukta dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. [5-6].Güvenli ve toksik olmayan bir yapıya sahip olması sebebiyle gıda ve tıbbi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [7].Silika aynı zamanda hidrofobik özelliklerinden dolayı ticari epoksi reçine ve kaplama malzemesinde katkı maddesi olarak uygulanmaktadır [8].

Nanomalzemeler, nano ölçekte malzeme modelleme, ölçme, görüntüleme ve tasarlamadaki yeni işlevleri nedeniyle mühendislik, teknoloji ve bilimin tüm alanlarında dikkat çekmiştir. Aynı maddenin toplu bir bileşeninden daha iyi fizikokimyasal, mekanik ve biyolojik özellikler göstermektedir [9]. Bu nedenle, nano ölçekli madde, malzemelerin benzersiz özelliklerini geliştirerek ileri teknolojilerde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Son zamanlarda, uyarlanabilir özelliklerine sahip nano-silika parçacıkları, adsorpsiyon, biyomedikal, polimer doldurucu, katalizör ve optik cihazları içeren geniş ve gelişmekte olan uygulama alanları nedeniyle yaygın ilgi görmüştür [10]. Genel olarak, nano-silika parçacıkları ticari olarak pahalı ham (alkoksisilan bileşikleri) malzemelerden karmaşık işlemlerle hazırlanmaktadır. Son yıllarda nano boyutlu malzemeler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar büyük gelişmeler göstermektedir [11].

Bu arada, hızlı ekonomik büyüme, tarım, sanayi, belediye ve madencilik alanlarından çok büyük atıkların oluşmasına yol açmıştır [12]. Atık, çoğunlukla endüstriyel ve evsel faaliyetler dahil olmak üzere insan faaliyetleri yoluyla üretilen fazlalık bir üründür. Artan nüfus ve yaşam standardı ile miktarı sürekli artmaktadır [13]. Bu atık, kirlilik (hava, su ve toprak), sönümleme sorunları ve hastalıkların yayılması dahil olmak üzere çevre için çok sayıda sorun yaratır. Bu nedenle, yönetimi daha fazla dikkatle esastır [14]. Tarımsal atıklar kompozit malzemeler [15-16], dolgu maddeleri [17], adsorbanlar [18], çimento katkı maddeleri [19] ve silika içerikli ürünler [20] gibi ürünlerin imalatı için kaynak olarak kullanılan bileşikler içermektedir. Son on yılda, nanosilikayı sentezlemek için atık bileşenlerin yeni işleme metodolojileriylekullanılması konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş, daha iyi saflık, gözeneklilik, kontrol şekli, boyutu ve ekstraksiyon

verimlerinde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Üretilen nano malzemeler için maliyeti düşürmek açısından doğal materyaller kullanılmaktadır. Pirinç kabuğu, şeker kamışı, buğday kabuğu, pirinç kabuğu külü gibi çok sayıda silis açısından zengin atıklar bol miktarda mevcuttur [21-22]. Badem kabuğu literatürde sınırlı araştırması olan doğal materyallerden biridir. Bu ürünler, hem üretim maliyetlerini düşürmekte hem de çevre kirliliğini azaltmaktadır [23].

Bu atıkların değerlendirilmesi üzerinde durulması gereken bir konudur. Bu nedenle, bu atıklardan yararlanarak silis elde etmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmadaki amaç badem kabuğu külünden, magnezyum, kalsiyum, baryum, çinko ve alüminyum gibi çeşitli silikatların üretiminde kullanılan nano boyutta, gözenekli ve amorf yapıdaki sodyum silikatın üretimini ve karakterizasyonu yaparak, tarımsal atıkların kullanılabilirliğini sağlamaktır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyaller

Yapılan çalışmada Datça yöresinde yetişen bademler temin edilmiş ve kabukları ayrılarak analizlere hazırlanmıştır. Halkalı değirmenlerde öğütülerek elek analizi yapılmış tane boyutuna ayrılmıştır. Badem kabuklarının ve elde edilen silikanınSEM, X-Ray ve FT-IR analizleri yapılarak içerisindeki maddeler tayin edilmiş ve görüntüleri alınmıştır.

2.2 Metod

Kül fırını, halkalı değirmen, manyetik karıştırıcı, Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FT-IR), Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri (SEM), X-RD, Termogravimetrik Analiz Cihazı (TGA) kullanılarak deneyler ve karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

2.2.1. Badem Kabuğundan Silika Eldesi

Baden kabuğundan silika üretiminde, badem kabuğunu yakma sıcaklığının etkisini gözlemlemek için üç farklı sıcaklıkta inceleme yapılmıştır. Halkalı değirmende öğütülen badem kabukları elek analizi yapılmış 2mm büyüklüğündeki parçalar deneysel çalışmalar için hazırlanmıştır.Daha sonra kabuklar krozeler içerisinde 450°C, 700 ^{o}C ve 900 ^{o}C ‘de kül fırınında yakılmıştır.

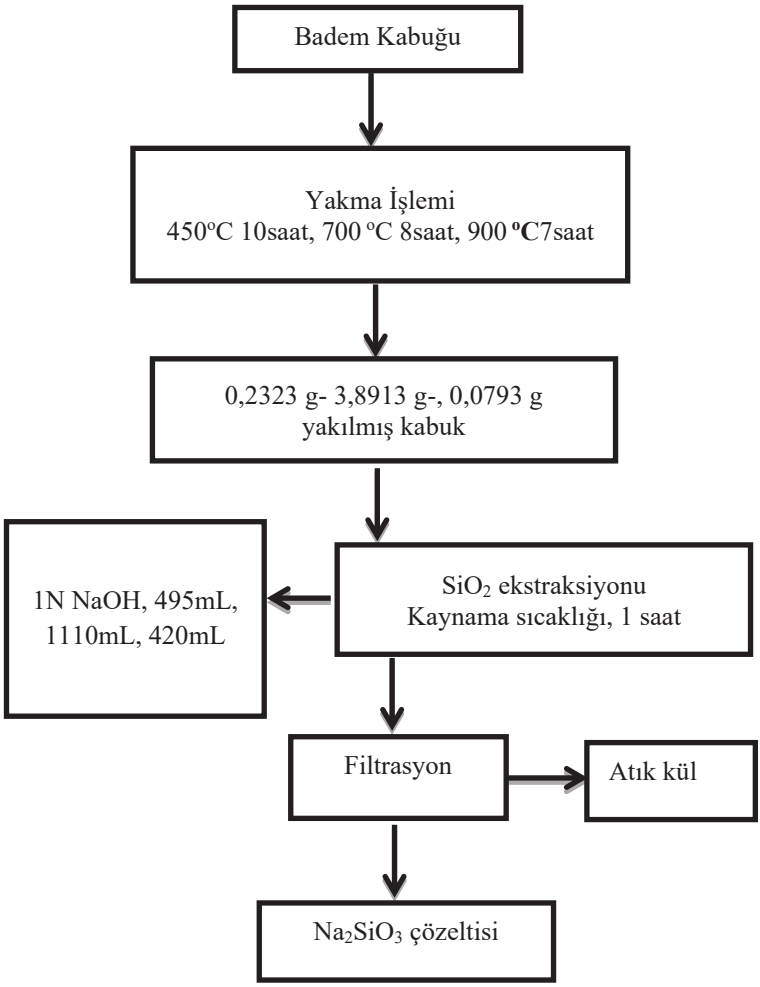
2.2.2. Sodyum Silikat Eldesi

Badem kabuğu külünden silisin ekstraksiyonu için 1 M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Bu amaçla literatür araştırmalarından elde edilen bilgiye göre 40 gr badem kabuğuna 600 mL 1 N NaOH çözeltisi ilave edilip, ısıtıcılı bir manyetik karıştırıcı üzerinde karışım 1 saat süre kaynatılarak ekstraksiyon işlemi

gerçekleştirilmiştir. Böylece yapıdaki silis içeriği Na_2SiO_3 çözeltisi halinde elde edilmiştir. Karıştırma hızı tüm deneylerde 400 rpm olarak çalıştırılmıştır. Kaynatma işlemi sırasında sodyum hidroksit ve amorf silika arasındaki reaksiyon şu şekildedir:

$$nSiO_{2\,(katı)} + 2NaOH_{(çöz.)} \rightarrow Na_2.nSiO_{3\,(çöz.)} + H_2O \quad (1)$$

Daha sonra karışım soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen karışım adi süzgeç kâğıdı kullanılarak vakum altında süzülmüş ve ekstrakte olmayan karbon atığından ayrılmıştır. Kül daha sonra yeteri kadar sıcak su ile yıkanmıştır. Bu sayede çözeltiden karbon atığı uzaklaştırılmıştır. Elde edilen silikat çözeltisi kapaklı plastik kaplarda saklanmıştır. Şekil 1' de üretim şeması görülmektedir.



Şekil 1. Badem kabuğundan Na_2SiO_3 Çözeltisinin üretim şeması

2.3. Analiz Yöntemleri

2.3.1. Badem Kabuğunun Nem İçeriğinin Belirlenmesi

Badem kabuklarının nem içeriğini belirlemek için buğday kabukları sabit tartıma gelinceye kadar 110°C' de kurutulmuştur. Aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$\boldsymbol{nem} = \frac{\boldsymbol{orjinal\ numune\ ağırlığı - kurutmadan\ sonraki\ ağırlık}}{\boldsymbol{orjinal\ numune\ ağırlığı}} * \mathbf{100} \qquad (2)$$

2.3.2. Badem kabuğunun kül içeriğinin belirlenmesi

Farklı miktarlardaki badem kabuğu seramik krozeye alınarak farklı sıcaklıklarda, farklı sürelerde yakılmış, sıcaklık 300°C' ye düşene kadar beklenilmiştir. Alınan numuneler desikatörde soğumaya bırakılmıştır.Aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$\boldsymbol{Kül\ içeriği} = \frac{\boldsymbol{kül\ eldesinden\ sonraki\ ağırlık - krozenin\ darası}}{\boldsymbol{orjinal\ numune * kuru\ madde\ katsayısı}} * \mathbf{100} \qquad (3)$$

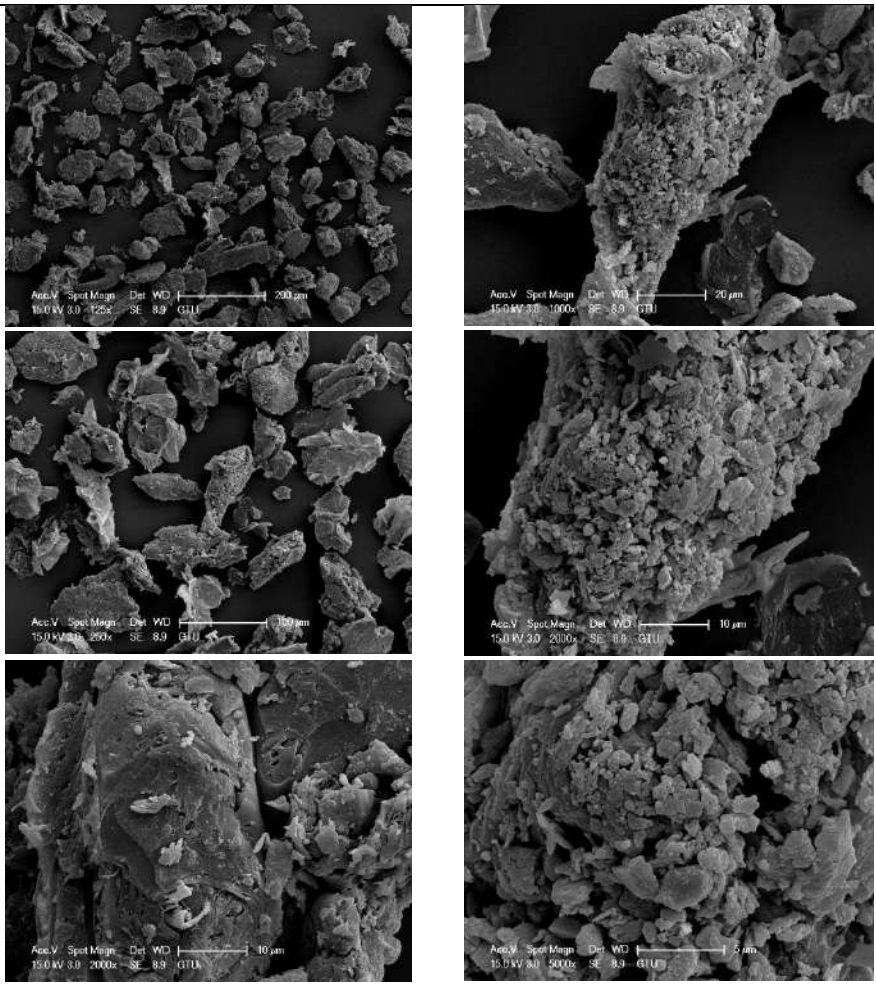
3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Badem Kabuklarının Karakterizasyonu

Denklem 2' ye göre hesaplanarak badem kabuğunun nem içeriği %2,29 bulunmuştur. Nem içeriği % 2,29 olan buğday kabuğunun kuru madde katsayısı 0,229' dir. Badem kabuğunun kül içeriği Denklem 3' e göre hesaplanarak %22,9 olarak bulunmuştur.

3.1.1. Badem kabuklarının SEM görüntüleri

Şekil 2' de badem kabuğunun SEM mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Badem kabuğu lifleri köşeli yuvarlak şekle sahiptir. Bir kesite büyütmeyle bakıldığında düz kısmın yüzeyinde dağınık dairesel kısımlar gözlemlenmektedir. Ayrıca büyütme yapının lifli yapı olduğu gözlemlenmektedir. Badem kabuğunun yapısındaki amorf halde bulunan silisin dış kabuktaki tüm tümsekliklerde yer aldığı bilinmektedir.

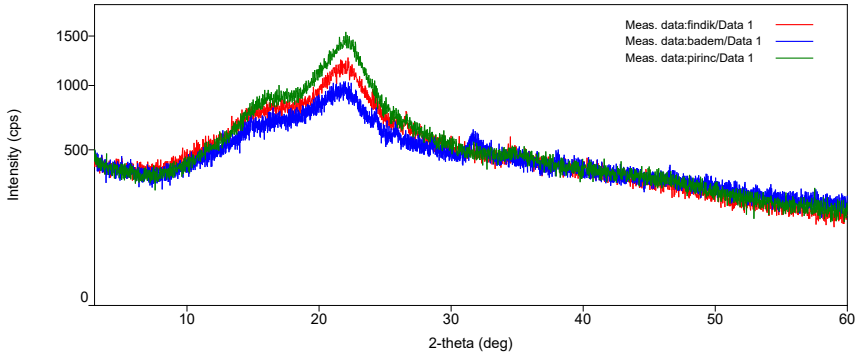


Şekil 2. Badem kabuğu SEM görüntüleri

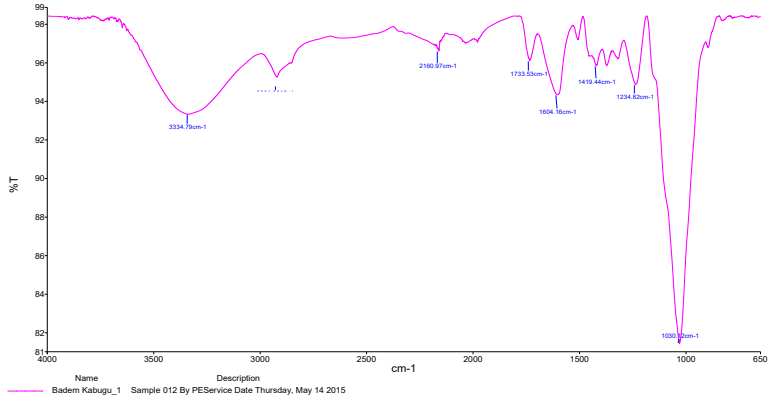
3.1.2. Badem Kabuklarının XRD ve FT-IR Analizi

Şekil3'tebadem kabuğunun halkalı değirmende öğütülerek elde edilen toz numunenin X-Ray grafiği verilmektedir. Bu spektrumda silisyumun amorf yapıda olduğu görülmektedir. Grafik üzerinde silisyuma ait 3 pike rastlanmıştır.

Bu çalışmayla birlikte yürütülen fındıkkabuğu ve pirinç kabuğu külün karşılaştırmalı XRD analizi de yapılmıştır. Şekil 3 incelendiğinde en yüksek pikin pirinç kabuğuna en düşük pikin ise badem kabuğuna ait olduğu saptanmıştır.



Şekil 3. Badem kabuğu, pirinç kabuğu ve fındıkkabuğunun XRD grafiği



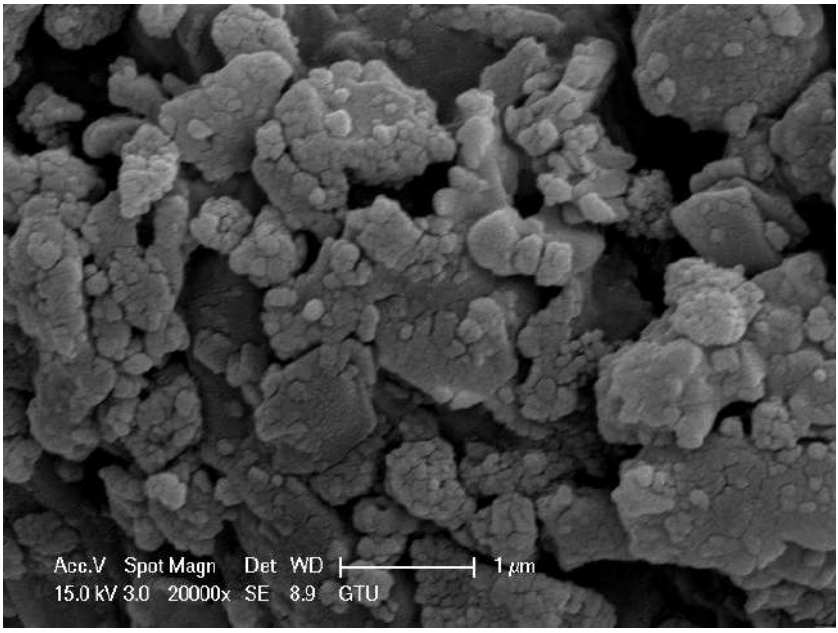
Şekil 4. Badem kabuğunun FT-IR grafiği

3.2. Elde Edilen Silikanın Karakterizasyonu

Farklı sıcaklıklarda elde edilen silika incelendiğinde 450°C' de elde edilen ürünün rengi açıkken, 700°C' de renk koyulaşmakta, çok daha yüksek sıcaklık olan 900°C 'de ise renk giderek açılmaktadır.

3.2.1. Elde edilen Silikanın SEM görüntüleri

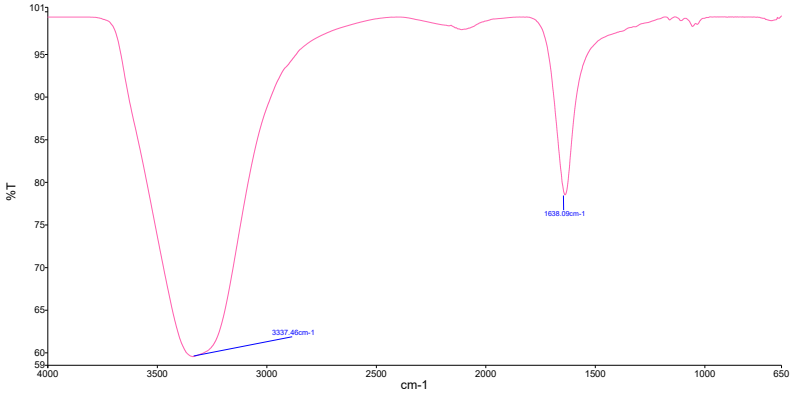
Badem kabuğundan elde edilen sodyum silikatın SEM görünsüsü Şekil 5'te verilmektedir. Yapıda stabil silikat yapısı gözlenmiştir. Gözenekli yapı gözlenmemiştir.



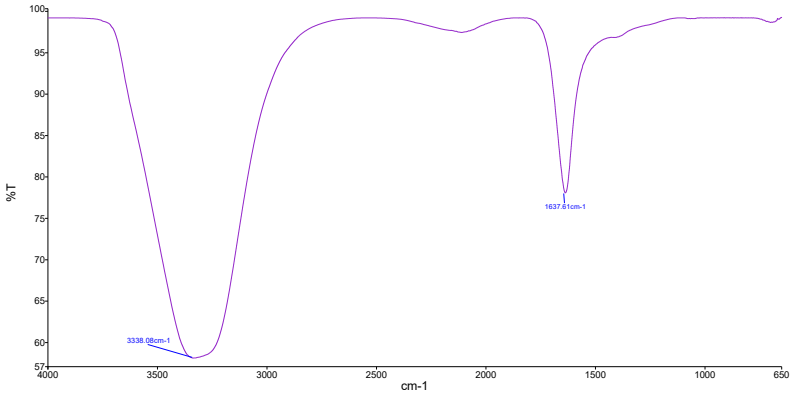
Şekil 5. Badem kabuğundan elde edilen silikanın SEM görüntüsü [25]

3.2.2. Elde Edilen Silikanın FTIR analizi

Çalışma koşullarına bağlı olarak farklı sıcaklıklarda, farklı yanma süreleri sonucu elde edilen silikanın IR Prestige 21 model SHIMADZU (Amerika) cihazı ile elde edilen FTIR spektrumu Şekil6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir. Silika FTIR spektrumunda, sırasıyla 1030,12 cm^{-1} ve 1030,32'de görülen pikler O-Si-O bantlarını temsil etmektedir.



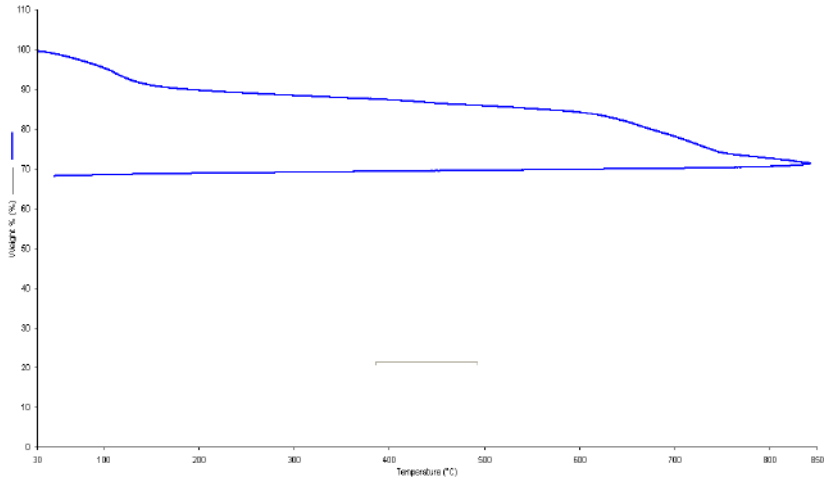
Şekil 6. 450°C' de yakılan badem kabuğunun (silika) FT-IR spektrumu



Şekil 7. 700ºC' de yakılan badem kabuğunun (silika) FT-IR spektrumu

3.2.3. Elde edilen Silikanın TGA analizi

Üretilen silikatların ısıya karşı dayanımlarını tespit etmek amacıyla ayrıca TGA analizleri yapılmıştır. TGA analizlerinde 200ºC /dk ısıtma hızı ile 1200ºC'ye kadar çıkılarak üretilen silikatların sıcaklık karşısındaki ağırlık kayıpları tespit edilmiştir.



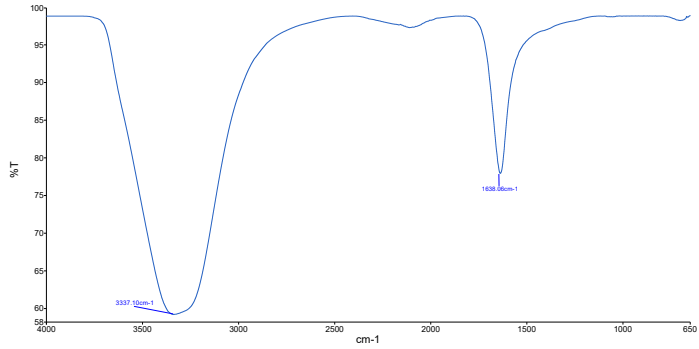
Şekil 8. Baden Kabuğunun 700ºC' de yakılmasıyla elde edilen silikanın TGA grafiği

Silikatların TGA analizleri göz önüne alındığında ilk olarak tümünde bir nem kaybının meydana geldiği görülmektedir. Nem kayıpları 100-1050ºC aralığında oluşmaktadır. Bu nem kayıplarından sonraki ağırlık kayıplarıyla birlikte yapılarında değişmeler olmuştur. Yapı değişikliklerinin olduğu sıcaklıklar her silikat için farklıdır. Ağırlık kayıpları dolayısıyla bozunmalar söz

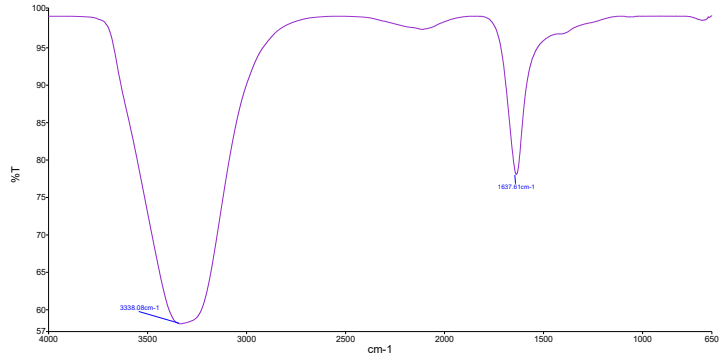
konusudur. Dolayısıyla silikatların yüzey alanı ölçümü işlemlerinde sıcaklık 1000ºC'yi geçmemelidir. Çünkü sıcaklığın artmasıyla yüzey alanında bir düşüş söz konusu olabilmektedir.

3.3. Badem kabuğundan elde edilen sodyum silikat çözeltilerinin FTIR analizi

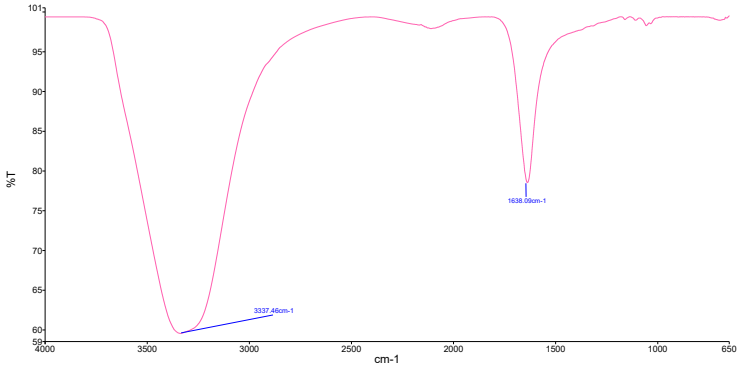
Badem kabuğundan elde edilen sodyum silikat çözeltilerinin silis içeriğini belirlerken her sıcaklık için alınan FTIR görüntüsü Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmektedir. Silisik asit görüntüleri birbirine çok benzemekte ve Si-O-Si piki 1638.06 cm^{-1}, 1637.61 cm^{-1}, 1638.09 cm^{-1}' de görülmektedir.



Şekil 9. 900^0C'de yakılan badem kabuğundan elde edilen silikanın FT-IR spektrumu



Şekil 10. 700^0C'de yakılan badem kabuğu külden elde edilen nano silikatın FT-IR spektrumu



Şekil 11. 450^{0}C' de yakılan badem kabuğu külünden elde edilen nano silikatın FT-IR spektrumu

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada badem kabuğunun yakılması ile elde edilen külün sodyum hidroksit çözeltisi ile ekstraksiyonu ile sodyum silikat eldesi amaçlanmıştır. Çalışmanın birinci kısmında öncelikle badem kabuğunun karakterizasyonu yapılmıştır. Kabuğun SEM görüntüleri incelendiğinde dağınık dairesel kısımlar görülmüştür. Aynı zamanda kabuğun lifli bir yapıya sahip olduğu da söylenebilir.

Çalışmanın ikinci aşamasında badem kabuğunun, 450-700-900 °C sıcaklıklarda yanması ile elde edilen külün karakterizasyon çalışması yapılmıştır. 450°C'de amorf yapının mevcut olduğu, 700 °C' de kuartz yapıyla birlikte az da olsa kritobalit yapının başladığı ve sıcaklık arttırıldığında 900 °C' de tamamen kristobalit yapıya dönüştüğü görülmüştür. Silika eldesinde kullanılan badem kabuğunun 700ºC' deki yanmasıyla elde edilen kül verimi % 6,28 olarak bulunmuştur.

Üçüncü aşamada ise badem kabuğu külünün sodyum hidroksit çözeltisi ile ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. Sodyum silikat veriminde sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Sentezlenen sodyum silakatın FT-IR grafikleri incelendiğinde silisik asit görüntüleri birbirine çok benzediği görülmekte ve Si-O-Si piki 1638.06 cm^{-1}, 1637.61 cm^{-1}, 1638.09 cm^{-1}' de görülmektedir. Elde edilen silikatlar doğrudan çimento üretiminde kullanılabilir. Literatürde badem kabuğu ve külü ile ilgili çalışmalar sınırlı olduğundan bu çalışmada elde edilen sonuçların literatüre bilimsel bir katkısı olacaktır.

Teşekkür:

Bu çalışmanın ön denemeleri Fourth International Conference on Advances in Bio-Informatics and Environmental Engineering - ICABEE 2016, (Rome, Italy) adlı konferansta sunulmuştur.

KAYNAKLAR:

1. Lavender, M.D. (1999). The importance of silica to the modern World Indoor. Built Environ., 8 , 89-93, 10.1159/000024618.
2. Patel, B.H.& Patel, P.N. (2012).Synthesis and application of nano sized SiO_2 to textiles: a review. Int. Dyer., 35-39.
3. Chen, L., Liu, J., Zhang, Y., Zhang, G. Kang, Y., Chen, A., Feng, X. & Shao, L. (2018). The toxicity of silica nanoparticles to the immune system. Nanomedicine, 13, 1939–1962, https://doi.org/10.2217/nnm-2018-0076.
4. Laskowski, L., Laskowska, M., Vila, N., Schiowski, M.& Walcarius, A. (2019). Mesoporous silica-based materials for electronics-oriented applications Molecules, 24, 2395, 10.3390/molecules24132395
5. Hoek, J.W., Heideman, G., Noordermeer, J.W.M.& Dierkes, A. (2019). Blume Implications of the use of silica as active filler in passenger car tire compounds on their recycling options.Materials, 12, 725.
6. Hossain, S.S., Bae, C.&Roy, P.K.(2022).Recent progress of wastes derived nano-silica: Synthesis, properties, and applications.Journal of Cleaner Production, 377, 134418.
7. Seisenbaeva, G.A., Ali, L.M.A., Vardanyan, A., Gary-Bobo, M., Budnyak, T.M., Kessler, V. G. &Durand, J.O. (2021). Mesoporous silica adsorbents modified with amino polycarboxylate ligands – functional characteristics, health and environmental effects. J. Hazard. Mater., 406, 124698, https://doi.org/10.1016/j. jhazmat.2020.124698.
8. Buyuknalcaci, F.N., Polat, Y., Negawo, T.A. Doner, E., Alam, M.S., Hamouda, T. & Kilic, A. (2018). Carbon nanotube-based nanocomposites for wind turbine applications: Polymer-based Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, Woodhead Publishing,635–661, https://doi.org/10.1016/B978-0-08- 102262-7.00024-6.
9. Xia, C., Jin, X., Garalleh, H.A., Garaleh, M., Wu, Y., Hill, J.M.& Pugazhendh, A. (2023).Optimistic and possible contribution of nanomaterial on biomedical applications: A review.Environmental Research,218, 114921.
10. El-Kady, M.M., Ansari, I., Arora, C., Rai, N., Soni, S.,Verma, D.K., Singh, P.& Mahmoud, A.E.D. (2022).Nanomaterials: A Comprehensive Review of Applications, Toxicity, Impact, and Fate to Environment. Journal of Molecular Liquids, 121046.
11. Fadeel, B. (2022). Nanomaterial characterization: Understanding nano-bio interactions. Biochemical and Biophysical Research Communications,Volume 633, Pages 45-51.

12. Ashrafi, M., Nasrollahzadeh, B., Jeh, M., Sajjadi& Ghafur, H. (2022). Biowaste- and nature-derived (nano)materials: biosynthesis, stability and environmental applications. Adv. Colloid Interface Sci., 301, 102599.
13. Nasrollahzadeh, M., Bidgoli, N.S.S., Shafiei, N., Soleimani, F., Nezafat, Z. & Luque, R. (2020). Low-cost and sustainable (nano)catalysts derived from bone waste: catalytic applications and biofuels production Biofuels. Bioprod. Bioref., 14, 1197-1227, 10.1002/bbb.2138
14. Heydari, H., Taleizadeh, A.A.&, Jolai, F. (2023). Financing a two-stage sustainable supply chain using green bonds:Preventing environmental pollution and waste generation. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 117, 105583.
15. J. Sarkar, D. Mridha, J. Sarkar, J.T. Orasugh, B. Gangopadhyay, D. Chattopadhyay,T. Roychowdhury,& K. Acharya, (2021) Synthesis of nanosilica from agriculturalwastes and its multifaceted applications: A review, Biocatal. Agric. Biotechnol.37(2021)102175, https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102175.
16. Bahrami, A., Soltani, N., Pech-Canul, M.I., Soltani, S. González, L.A., Gutiérrez, C.A., Tapp, J., Möller, A. &Gurlo (2018). A. Bilayer graded Al/B 4 C/rice husk ash composite:wettability behavior, thermomechanical, and electrical properties, J. Compos.Mater., 52, 27, 3745–3758, https://doi.org/10.1177/
17. Pongdong, W., Kummerlöwe, C., Vennemann, N., Thitithammawong, A.&Nakason, C. (2018). A comparative investigation of rice husk ash and siliceous earth asreinforcing fillers in dynamically cured blends of epoXidized natural rubber(ENR) and thermoplastic polyurethane (TPU), J. Polym. Environ. 26, 3, 1145–1159, https://doi.org/10.1007/s10924-017-1022-5.
18. Tang, M., Zhang,R. & Pu, Y.(2018). Wheat Straw Modified with Palmitic Acid as anEfficient Oil Spill Adsorbent, Fibers Polym. 19, 5, 949–955.
19. F.F. Ataie, K.& Riding, A.(2016). Influence of agricultural residue ash on early cementhydration and chemical admiXtures adsorption, Construct. Build. Mater. 106274–281, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.091.
20. Soltani, N., Simon, U., Bahrami, A., Wang, X., Selve, S., Epping, J.D., Pech-Canul, M. I., F.Bekheet, M.F. Gurluo, A. (2017). Macroporous polymer-derived SiO2/SiOC monoliths freezecast from poly siloxane and

amorphous silica derived from rice husk. J. Eur.Ceram. Soc., 37, 4809–4820.https://doi.org/ 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.06.023.
21. Singh, S.P. & Endley. N. (2020). Fabrication of Nano-Silica from Agricultural Residue and Their Application. Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications, 107-134. 10.1016/B978-0-12-817852-2.00005-6
22. Carmona, V.B., Oliveira, R.M., Silva, W.T.L., Mattoso, L.H.C.,& Marconcini, J.M. (2013). Nanosilica from rice husk: Extraction and characterization. Industrial Crops and Products,Volume 43, 291-296.
23. Karumanchi, M., Nerella, R.& Mikkili, I.(2022). An integrated approach on extraction methodologies of nanosilica fromcultivated agricultural wastes and microstructural characteristics – A review. Materials Today: Proceedings Materials Today: Proceedings, 62, 2883–2891.
24. Geyikci, F. (2016). Synthesis and characterization of silica prepared by thermal method. Fourth International Conference on Advances in Bio-Informatics and Environmental Engineering - ICABEE 2016, Rome, Italy, 31 – 33.

BİYOBOZUNUR METAL VE ALAŞIMLAR

Dr. Öğr. Üyesi Bekir YAVUZER

Beykent Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0001-8984-774x

Giriş

Kalıcı olarak vücutta bulunan cihaz ve implantlar, uzun süreli fiziksel tahrişe ve kronik iltihaplanmalara neden olmakta,bununla birlikte büyüyen dokuya uyum sağlayamamaktadırlar. Ayrıca görevini yerine getiren implantların alınması için ikinci bir ameliyat gerekmektedir. Bu olumsuzluklar, belirli bir süre vücutta kalarak görevini tamamlayan malzemelerin, daha sonra vücut tarafından çözülerek kullanımı ile giderilebilmektedir. Bunu sağlayan malzeme grubu, "biyobozunur malzemeler" olarak adlandırılmaktadır.

Biyobozunur malzeme konusunda genel olarak üç terim kullanılmaktadır. Bunlar, biyobozunur (biodegradable), biyosoğrulabilir (bioabsorbable) ve biyoemilebilir (bioresorbable) terimleridir. Bu terimler birbirleri yerine kullanılabilmektedir.Liu vd. bu terimlerin kullanımını şu şekilde açıklamıştır:Biyobozunur metal, enzimatik ve hücresel işlemler gibi mekanizmalar nedeniyle biyolojik olarak bozunan bir malzemedir.Biyobozunur terimi yalnızca vücuttaki malzemelerin bozunmasını değil, doğada biyolojik olarak meydana gelen bozunma olayları için de kullanılabilir.(Bu bölümdeki "Biyobozunur metal/alaşım/malzeme" terimi, tıbbi uygulamalar için kullanılan ve vücutta biyolojik olarak parçalanabilen metaller için kullanılmaktadır.)Biyosoğrulabilir terimi, vücudunbozunma ürünlerinden olumsuz etkilenmeden, malzemenin vücudun içinde biyolojik olarak parçalanması olarak açıklanabilir. Bu nedenle "biyosoğrulabilir" terimi daha çok çözünme ürünlerinin vücut tarafından nasıl soğrulduğu üzerine odaklanır. Biyoemilebilirteriminde ise bir metal canlı vücudunda (in vivo olarak)bozunur ve hücresel aktivite yada farklı işlemlerle uzaklaştırılır.Liu vd. vücutta güvenli bir şekilde çözünmesi beklenen implantlar için en uygun terimin "soğrulabilir (absorable)" olduğunu öne sürmüştür (Liu, Zheng, & Hayes, 2017). Bu terim standartlar (ASTM, ISO) tarafından benimsenmiştir ve tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak Mg, Fe veZn esaslı biyometalleri tanımlamak için genel olarak biyobozunur terimi tercih edilmektedir (Venezuela & Dargusch, 2019).

Metalik biyomalzemelerde korozyonu en aza indirebilmek için uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Ancak bir dizi metalin, bozunarak da kullanılabileceği fikri son yıllarda yerleşmiş ve bu alanda araştırmalar artmıştır.

Biyobozunurmalzemlerde,bozunan ürünlerin vücut tarafından kullanımı da önemsenmektedir. Örneğin, insan kemiğinde önemli bir bileşendir ve Ca'un kemiğe katılması için magnezyum gereklidir. Bu bilgilerden yola çıkılarak Mg-Ca alaşımının biyobozunur malzeme olarak kullanımı düşünülmüş ve yapılan testler sonucunda uygun olduğu rapor edilmiştir (Li, Gu, Lou, & Zheng, 2008).

Vücutta bozunmadan önce istenen sürede mekanik olarak işlevini yerine getirmesi bu malzemelerden beklenen bir diğer özelliktir. Örneğin biyobozunurmalzeme, kırık kemik dokusunun iyileşme sürecinde 12-18 hafta mekanik bütünlüğünü korumalıdır. Bu süreden önce bozunacak olursa, görevini yerine getiremeyecektir.

Biyobozunur malzemelerin, biyolojik güvenliği sağlaması için toksik eleman içermemeli ve bozunma sonrası ürün/ürünlertoksik etkiler göstermemelidir. Örneğin Al, nörotoksik bir madde olarak bilinmekte ve Al birikiminin demans, yaşlılık bunaması ve Alzheimer hastalığını neden olduğu öne sürülmektedir (El-Rahman, 2003). Ce, Sr ve Y'nin de sağlık üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu rapor edilmiştir (Nakamura, Tsumura, Tonogai, Shibata, & Ito, 1997).

Bu çalışmadaliteratürde bulunan bilgiler derlenerek,biyobozunur metal ve alaşımları sınıflandırılmış vebozunma mekanizmaları açıklanmıştır.

1. Biyobozunur Malzemeler

Geleneksel bakış açısıyla, biyomalzeme olarak kullanılacak olan metallerin vücutta korozyon dirençlerinin yüksek olması istenmektedir. Ancak biyolojik olarak parçalanabilen metallerin kullanılabileceği fikri, yenilikçi bir fikir olarak ortaya çıkmıştır.Biyobozunur metal için bir tanımlama yapılmak istenirse: "Biyobozunur metaller, kademeli olarak korozyona uğradıklarında ortaya çıkan ürünlerin vücut tarafından uygun bir tepkiyle karşılaşması, doku iyileştirme görevini yerine getirdikten sonra ise herhangi bir kalıntı olmadan vücut tarafından tamamen çözünmesi beklenen malzemelerdir" denebilir. Bu tanımdan yola çıkarak, bu metal ve alaşımlarının uygun bir bozunmahızında vücutta çözülmesi gerekmektedir.Zheng vd. (Zheng, Gu, & Witte, 2014)biyobozunur metalleri, saf metaller, biyobozunur alaşımlar ve biyobozunur metal matris kompozitler olarak üç grupta sınıflandırmıştır. Saf metaller, ticari tolerans limitleri dahlinde, eser miktardasafsızlıklara seviyelerine sahip metalleri içeren gruptur. Bu gruptaki biyobozunur metallerin korozyon oranları, içerdikleri safsızlıklardan etkilenmektedir.Biyobozunur alaşımlar ise bir veya birden fazla alaşım elementine sahip biyolojik olarak parçalanabilen metal esaslıbiyomalzemelerdir.Biyobozunur alaşımların birden fazla element içermesi, birbirleri arasında oluşturacakları bileşikler veya ortaya çıkan korozyon ürünlerinin toksik etkilere neden olması endişesini doğurmaktadır. Ayrıca bu grupta camsı veya tek kristalli insan vücudunda biyolojik olarak parçalanabilen metaller de bulunmaktadır.Biyobozunur metal matris kompozitler grubunda ise kompozit malzemeyi oluşturan tüm bileşenlerin, vücutta toksik bir etki oluşturmadan biyolojik olarak bozunabilir olması gerekmektedir.

Biyobozunur metalik malzemeler için gerekli mekanik ve korozyon özellikleri kullanım amaçlarında göre farklılık göstermektedir. Kemik plakaları ve vidalar gibi ortopedik kemik sabitleme uygulamalarında 3-6 ay boyunca, biyomalzemenin mekanik dayanımını koruması gereklidir (Tong, ve diğerleri, 2020). Kemik sabitleme implantlarında ise korozyon hızının 37 °C'de yapay vücut sıvısında 500 μm/yıl'dan az ve mukavemetinin 200 MPa'dan büyük ve uzama miktarının da %10'dan fazla olmalıdır (Erinc, Sillekens., Mannens, & Werkhoven, 2009).

Bu malzeme grubunun belirli klinik uygulamalar için ayarlanabilir mekanik özelliklere sahip olması istenmektedir. Ortopedik uygulama için biyomalzemelerin, kemik kaybına ve cihaz implantasyonunun başarısız olmasına neden olabilecek "stres kalkanı etkisinden kaçınması için düşük "Young Modülüne" sahip olması gerekmektedir (Zhao, Niinomi, Nakai, Miyamoto, & Furuhara, 2011).Kardiyovasküler uygulamalar için ise yeterli radyal kuvvet ve esneklik başarılı bir stentimplantasyonu için gereklidir (Burt & Hunter, 2006).

1.1. Biyobozunur metallerde bozunma mekanizması

Biyobozunur malzemelerdeki bozunma mekanizması bir korozyon olayıdır. Korozyon, elektrolit ile elektrokimyasal bir reaksiyona giren malzemelerin genellikle oksitler, hidroksitler, hidrojen gazı ve diğer bileşikler ürettikleri bir olaydır. Zayıf alkali fizyolojik ortamda (pH 7,4), bu metaller elektrokimyasal korozyon ile biyolojik olarak bozunmaktadır (Eliaz, 2019).Vücutta gerçekleşen olası korozyon reaksiyonları metalin anodik çözünmesini ve indirgeme reaksiyonunu içerir (Wang, Venezuela, & Dargusch, 2021).

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^{-} \text{ (Anodik reaksiyon)} \quad (1)$$

$$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-} \text{ (Mg için-Katodik reaksiyon)} \quad (2)$$

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \text{ (Fe için -Katodik reaksiyon)} \quad (3)$$

$$M^{n+} + nOH^{-} \rightarrow M(OH)_n \text{ (ürünler)} \quad (4)$$

Burada M, Fe veya Mg olabilir. Vücut sıvısı ile temas ettikten hemen sonra biyobozunur metal anodik reaksiyonun ardından metal katyonlarına oksitlenir (Eşitlik 1). Biyobozunur metallerde üretilen elektronlar katodik reaksiyon tarafından tüketilir ve Mg esaslı metallerde su ve Fe esaslı metallerde çözünmüş oksijen indirgenmiş olur (Eşitlik 2). Bu reaksiyonlar biyobozunur malzeme ile

vücut sıvısının temas ettiği tüm yüzeylerde meydana gelmektedir. Metal matris, intermetalik faz ve tane sınırlarının farklı potansiyellere sahip olmasından dolayı galvanik çift farklı bölgelerde farklı şekillerde oluşmaktadır. Vücutta bulunan diğer moleküllerde metal yüzey üzerine etkilerde bulunarak biyobozunur metalin çözünmesini etkileyecektir. Ayrıca ortamda bulunan inorganik iyonlar (Xin, Huo, Tao, Tang, & Chu, 2008), tamponlama sistemi (Xin, Hu, & Chu, 2011), organik moleküller (Yamamoto & Hiromoto, 2009), çözünmüş oksijen (Revie & Uhlig, 2008) ve gerilim (Gu, ve diğerleri, 2010) bu malzemelerin bozunma davranışlarını etkilemektedir.

1.2. Bozunma Oranlarının Belirlenmesi

Biybozunur malzemelerde bozunma oranlarının belirlenmesi in vitro (laboratuvar ortamında) ve in vivo (canlılarda) olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir.

1.2.1. Invitro testler

Her ne kadar biyobozunur malzemeler canlılar üzerinde kullanılan malzemeler olsa da tüm testlerin canlılar üzerinde yapılması canlılara zarar verip, zahmetli ve yüksek maliyetliolmakla birlikte uzun zaman da almaktadır. Bu nedenle laboratuvar ortamında yapılan bozunma/korozyon testleri, bu malzemelerin bozunma oranlarını tahmin etmek için kolay ve kullanışlıdır (Kokubo & Takadama, 2006). Bu testlerde kullanılan ortam, vücut sıvısına benzer aşındırıcı etkiler gösteren yapay vücut sıvılarıdır.Invitro korozyon hızının belirlenmesinde elektrokimyasal yöntem ve daldırma (ASTM G31-72) testi yaygın olarak kullanılmaktadır.Korozyon, anot ve katot arasındaki elektron akışını tanımlayan kimyasal bir süreçtir. Elektron akışının izlenmesi korozyon sürecinin kinetiğini değerlendirme imkânı vermektedir.Potansiyodinamik polarizasyon ve empedans ölçümü korozyon oranını belirlemek için kullanılır. Korozyon akım yoğunluğu, potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden Tafelekstrapolasyonu kullanılarak tahmin edilebilmektedir.Stern-Geary denklemi kullanılarak empedans ölçümlerinden bozunma oranı hesaplanabilmektedir (Eşitlik 5).

$$CR = K_1 \frac{i_{corr} W}{n\rho} \qquad (5)$$

Burada; CR bozunma oranı, K_1 =3,27x10^{-3} mm g μA^{-1} cm^{-1} yr^{-1}, i_{corr} korozyon akım yoğunluğu, ρ metalin yoğunluğu, W elementin atom ağırlığı ve n ise elementin valans değerini ifade etmektedir.

Daldırma testinde hem ağırlık kaybı hem de çözeltiye geçen metal iyanlarının miktarı ölçülebilir. Bu durumda korozyon oranı Eşitlik 6'da verilen denklem ile hesaplanabilir (Witte F. , ve diğerleri, 2006).

$$CR = \frac{W}{At\rho} \qquad (6)$$

Burada; CR korozyon oranı, W hesaplanmış ağırlık kaybı, A maruz kalan alan, t daldırma süresi ve ρ ise yoğunluktur.

Invitro daldırma testlerinde bozunma oranı Eşitlik 7'ye göre hesaplanmaktadır (Fiocchi, ve diğerleri, 2021).

$$DR = \frac{8{,}76 \cdot 10^4 \cdot W}{At\rho} \qquad (7)$$

Burada; W kütle kaybı, A numune yüzey alanı, t vücut sıvısına maruz kalma süresi ve ρ malzemenin yoğunluğudur.

1.2.2. Invivo testler

Bir implantıncanlı hayvan vücudundaki (in vivo)bozunma hızı, alınan malzemede meydana gelen hacim kaybı ölçümü ile belirlenebilir. Ancak bu yöntemde numune alınmadan önçe test hayvanları kurban edilmelidir. Ayrıca temizleme işlemi sırasında implant zarar görebilir ve sonuçların doğruluğunu etkileyebilir.Invivo testlerde korozyon oranı eşitlik 7 ile hesaplanmaktadır (Witte F. , ve diğerleri, 2010).

$$CR = \frac{\Delta V}{At} \qquad (7)$$

Burada ΔV hacim kaybı, A implantın yüzey alanı ve t ise implantasyon süresidir.

2. Demir Esaslı Biyobozunur Alaşımlar

Demir, insan vücudunda enzimatik kataliz ve oksijen taşınması için gerekli olduğundan insan yaşamı için büyük önem taşımaktadır (Papanikolaou & Pantopoulos, 2005). Demir esaslı biyobozunur malzemeler, Mg ve Zn esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında daha üstün mekanik özelliklere ve iyi işlenebilirliğe sahiptir. Ayrıca bu malzeme grubu, Mg esaslı biyobozunur malzemelerde görülen hidrojen gazı oluşumu meydana gelmeden bozunmaktadır (Babacan, ve diğerleri, 2021).

Demir esaslı biyobozunur malzemelerde oluşan korozyon ürünleri de in vivo olarak tamamen bozunmamaktadır. Bu nedenle saf demirin fizyolojik ortamda toksik etki gösterdiği düşünülmektedir (Peuster, ve diğerleri, 2006). Ayrıca bu malzemeler manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ile uyumsuzluk göstermektedir (Liu, ve diğerleri, 2022).Demir esaslı biyobozunur malzemelerin bu olumsuz etkilerini giderebilmek için bozunma hızını arttırıcı çalışmalar yapılmaktadır (Schinhammer, Hänzi, Löffler, & Uggowitzer, 2010) (Hermawan, Alamdari, Mantovani, & Dubé, 2008) (Hermawan, Dubé, & Mantovani, Development of Degradable Fe-35Mn Alloy for Biomedical Application, 2007). Fe bazlıbiyomalzemelerin biyolojik bozunmasını hızlandırmak için alaşım elementleri katot olarak alaşımlandırılarak mikrogalvanik korozyon aktive edilmektedir. Mikro galvanik çiftler, genel korozyon kinetiğini geliştirerek, demir matrisinde yüksek korozyon akımı yoğunluğuna neden olmaktadır. Mikro galvanik korozyon oluşumu, korozyon potansiyellerindeki fark nedeniyle meydana gelmektedir. Buradaki korozyon hızı ise galvanik hücrenin elektrik direnci, katot/anot alan oranı ve pasif filmlerin kararlığı tarafından belirlenmektedir (Li, Mo, Gao, Shuai, & Peng, 2022).

Demir esaslı biyobozunur malzemelerde bu güne kadar yapılan çalışmaların çoğunluğunu, Fe-Mn esaslı alaşım sistemi oluşturmaktadır. Demire mangan ilavesi ile çözünme hızının arttırılabileceği yapılan araştırmalar sonucunda keşfedilmiştir. Mn (standart elektrot potansiyeli -1,18 V) ile alaşımlanan Fe'nin elektrot potansiyeli (-0,44 V) azaldığı için biyolojik bozunma hızı artmaktadır (Feng, ve diğerleri, 2017). Ayrıca Mn ilavesi ile anti-ferromanyetik fazlar olan östenit ve martenzit oluşumunu destekleyerek MRI uyumluluğunu arttırmaktadır (Schinhammer, Hänzi, Löffler, & Uggowitzer, 2010). Mn, kemik yapısı için gerekli olmakla birlikte enzimlerin işlevinde önemli bir rol oynamaktadır (Venezuela & Dargusch, 2020).Hermawan vd. yapmış oldukları çalışma sonucunda, %30 Mn içeriğinin Fe-Mn ikili alaşım sisteminde en uygun değer olduğu sonucuna varmıştır (Hermawan, Purnama, Dube, Couet, & Mantovani, 2010).

Kaplama yaparak (PLA ile) saf demirin çözünme hızı arttırılabilmektedir (Qi, Li, He, Zhang, & Ding, 2019). Kaplama malzemesi olarak kullanılan PLA ilk olarak çözünmekte ve oluşturduğu asidik ortam demirin bozunmasını hızlandırmaktadır. Demirin korozyon hızını düşürmek için kullanılan bir başka yüzey modifikasyon yöntemi ise iyon implantasyonudur. İyon implantasyon yöntemiyle saf demirin yüzeyinde, kalınlığı 40-60 nm derinliğindeZn'ce zengin bir katman oluşturulabilir. Bu katmanın çözünme hızı, saf demire göre daha yüksektir (Wang, Zheng, Li, & Jiang, 2017). Ancak bu yöntem ile

sadecemodifiye edilmiş katmanın çözünme hızı arttırılabilmekte, bu katmanın çözünmesiyle demirin korozyon hızı tekrar azalmaktadır.

3. Magnezyum Esaslı Biyobozunur Alaşımlar

Saf magnezyum, iyileşme sürecinde hızlı bir şekilde bozunduğu ve hızla okside olduğu için ideal bir implant malzemesi olarak hizmet edemez. Bu nedenle, diğer elementler kullanılarak alaşımlanması gerekmektedir. Magnezyum esaslı biyobozunur malzemeler, iyi mekanik özellikleri ve biyouyumlulukları nedeniyle implant uygulamaları için uygun olarak görülmektedir (Li, Zheng, & Qin, 2014). Magnezyum implantlarının ilk kullanımı 1900 yılında yapılan hayvan deneylerinde olmuştur.Daha sonra Lambotte yaptığı çalışmalarda magnezyumun vücut içinde çözüldüğü keşfetmiş ve malzemeyi insanlar üzerinde de kullanmıştır (Witte F. , The history of biodegradable magnesium implants: A review, 2010).

Biyobozunur metalik malzemeler (Fe, Mg ve Zn esaslı)içinde, en yüksek bozunma hızı, Mg esaslı biyobozunur malzemelerdedir. Bu durum ise özellikle ortopedik uygulamalarda, dokunun iyileşmeden implantın mekanik özelliklerini yitirmesine neden olmaktadır (Xie, ve diğerleri, 2021).Mg'ninbozunması ile kemiklerin iyileşmesini olumsuz etkileyen hidrojen gazı (H_2) oluşumu da görülmektedir. Ancak magnezyum iyonlarının kas-iskelet sisteminde, iskeletin normal fizyolojik işlevini sürdürmesi için gerekli olması ve magnezyum bozunma ürünlerinin kemik kırık iyileşmesini desteklemesi, Mg esaslı malzemelerin kullanımı için teşvik edici olmaktadır (Vormann, 2003). Ayrıca magnezyum esaslı implantlar, metalik implantların "stres kalkanı" etkisini azaltma özelliğine de sahiptirler(Xie, ve diğerleri, 2021).

Mg esaslı biyobozunur alaşım sistemleri Mg-Ca (Liu, Curioni, Dong, & Liu, 2022), Mg-Zr (Kiani, ve diğerleri, 2022), Mg-Sr, Mg-Zn (Wang, ve diğerleri, 2021), Mg-Si, Mg-Sn, Mg-Mn, Mg-Zn ve Mg-Ag'dir. Mikro yapı gelişimi, mekanik özellikleri, bozunma davranışları, iyon salınımı, in vitro, in vivo testleri ve klinik deneylerde geniş çaplı araştırılmış ve son yıllarda da araştırılmaya devam edilen bir malzeme grubudur (Zerankeshi & Alizadeh, 2022) (Liu, Curioni, Dong, & Liu, 2022).

Saf Mg'nin çekme dayanımı 87 MPa iken, farklı alaşım elementleri ilave edilerek veya sıcak ekstrüzyon, eşit kanallı açısalpresleme ve sıcak haddeleme gibi yöntemler kullanılarak çekme dayanımı 300 MPa değerine kadar arttırılabilmektedir.Sn, Si, Zr ve Zn ilavesi ile bu malzemeleri hem çekme dayanımları hem de gerinim değerleri iyileştirilebilmektedir.Ca, Sr ve Mn elementlerinin ilavesi ise süneklikte düşüşe neden olduğu bildirilmiştir (Li, Zheng, & Qin, 2014). Ayrıca Al, Si, Sn, Zn ve Zr'nin çekme dayanımını

arttırdığı bilinmektedir (Gu, Zheng, Cheng, Zhong, & Xi, 2009).Ag ilavesi ile birlikte Mg alaşımında tane inceltme ve çökelti oluşumu olmakta ve bu sayede dayanım artışı meydana gelmektedir (Zerankeshi & Alizadeh, 2022).

Mg esaslı biyobozunur malzemeler vücut sıvısında istenenden daha hızlı bozunmaktadır. Bu da Mg esaslı malzemeden üretilmiş implantınkısa sürede mekanik bütünlüğünü yitirmesine neden olmaktadır. Biyolojik bozunma oranının kontrolünü sağlamak için alaşım elementleri ilave edilmekte veya yüzey modifikasyonu yöntemleri kullanılmaktadır.Bu alaşımlara ilave edilen gümüş miktarının artması Mg matris ve Ag'ce zengin fazlar arasında mikro-galvanik korozyonu hızlandırdığı belirtilmiştir. Al, In, Mn, Zn ve Zr'nin ikili Mg alaşımının korozyon oranını düşürdüğü bilinmektedir (Gu, Zheng, Cheng, Zhong, & Xi, 2009).

Mg esaslı biyobozunur alaşımların bir diğer olumsuz özelliği ise bozunma ürünü olan hidrojen gazıdır.Invivo testler sırasında hidrojen kabarcıkları implant çevresinde birikebilir ve dokuların ve doku katmanlarının ayrılmasına neden olabilir. Invitro testlerde ise hidrojen hazının doğrudan atmosfere kaçağından, testler sırasında oluşan H_2, test sonuçlarını etkilememektedir (Gu, Zheng, Cheng, Zhong, & Xi, 2009).

4. Çinko Esaslı Biyobozunur Alaşımlar

Biyomalzemeleralanında en popüler çalışma konularından biri Zn esaslı biyomalzemelerdir.Çinkoyu, biyobozunur metal olarak kullanmayı hedefleyen (Zn-Mg) araştırmalar, ilk olarak 2007 yılında başlamıştır (Xiang, Lu, Li, li, &Zheng, 2007). 2013 yılında ise saf çinko kullanılarak fareler üzerinde yapılan testler sonucunda, bu metalinstentler için uygun bir malzeme olduğu rapor edilmiştir (Bowen, Drelich, &Goldman, 2013).

Mg esaslı biyobozunur malzemelerin bozunma hızı istenenden hızlı, Fe esaslı biyobozunur malzemelerin bozunma hızı ise istenenden çok daha yavaştır.Zn ise vücutta Fe'den daha hızlı, Mg'den daha yavaş çözünmektedir. Çinko insan vücudu için vazgeçilmez temel bir besin elementidir ve 50'den fazla farklı enzim için katalizördür. Kemik oluşumunu uyarır ve büyümede önemli bir rol oynar. Ayrıca kardiyovaasküler hastalıklar için önemli bir elementtir. Çinko esaslı biyobozunur alaşımların yeterli derecede biyouyumluluk göstermesi biyogüvenliği güvence altına almaktadır (Li, Shi, & Wang, 2020).Zn'nin ise hem insan vücudu için gerekli bir element olması hem de uygun hızda bozunuyor olması son on yılda bu malzeme üzerinde yapılan araştırmaların katlanarak artmasına neden olmuştur. Ayrıca Zn esaslı biyobozunur malzemelerin bozunma ürünleri tamamen biyolojik olarak emilebilmekte vebozunma sonucu hidrojen gazı oluşmamaktadır.

Çinko esaslı biyobozunur malzemeler döküm, haddeleme, ekstrüzyon, çekme ve dövme gibi geleneksel birçok yöntem ile üretilebilmekle birlikte çoklu plastik deformasyon ve eklemeli imalat gibi ileri üretim yöntemleri ile de üretilmektedir (Li Z. , ve diğerleri, 2019) (Zhao, ve diğerleri, 2017) (Li, Shi, & Wang, 2020). Üretim yöntemlerinin bu kadar çeşitli oluşu, farklı biyomedikal uygulamalar için uygun özelliklere sahip malzeme üretimini kolaylaştırmaktadır.

Üretim ve işleme yöntemlerinin çeşitliliği ve biyouyumluluk göstermesi ile Zn esaslı biyobozunur alaşımlar, kemik kırığı sabitleme pimleri, vidalar, plakalar, antibakteriyel biyomedikal cihazlar, kardiyovaskülerstentler gibi birçok uygulama alanında aday malzeme olarak ön plana çıkmıştır. Ayrıca pH, protein içeriği ve stres değişimi gibi uyaranlara karşı duyarlı olması nedeniyle biyosensör olarak da kullanımı düşünülmektedir (Li, Shi, & Wang, 2020).

Üstün özelliklerine rağmen saf Zn'nin mekanik özellikleri nispten zayıftır (Çekme dayanımı>200 MPa, Kopma dayanımı<300 MPa, kopma uzaması: < %15-18) (Bowen, ve diğerleri, 2016) (Mostaed, Sikora-Jasinska, Drelich, & Vedani, 2018). Farklı elementlerle (Mg, Li, Mn, Cu, Ca, Ag, Al, Fe, Mn, Sr, Ti ve Zr)alaşımlama yapılarakZn'nin mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir (Zhuo, ve diğerleri, 2022). Ayrıca düşük ergime sıcaklığı, oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya ve sürünmeye neden olmaktadır. Doğal yaşlanma ile çekme ve akma mukavemeti azalmaktadır.Zhu vd. 2019 yılında yayınlamış oldukları bir çalışmada Zn-0,1Li alaşımının 37 °C'de sürünme davranışlarını incelemiş ve 0,4 akma mukavemet değerinde alaşımın kayda değer bir sürünme deformasyonu gösterdiğini rapor etmişlerdir (Zhu, Wu, Li, Zheng, & Nie, 2019). Bu alaşım grubunun daha fazla uygulamada kullanılabilmesi, sürünme ve doğal yaşlanma davranışlarının geliştirilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. İnsan vücudunun korozif ortamından dolayı korozif yorulma ve stres korozyon kırılmalarına karşı da bu malzeme grubunun dayanımının geliştirilmesi gerekmektedir.Ayrıca insan vücudunda kullanılacak malzemelerin biyo-tribokorozyon ve biyo-triboloji davranışlarının da bilinmesi gerekmektedir. Bu alaşım grubunun daha yaygın uygulamalarda kullanılabilmesi için bu konular üzerinde daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmalar, insan vücudunda kullanılan ve doku iyileşmelerine yardımcı olacak ve bu işlevin yerine getirilmesinden sonra biyolojik olarak parçalanabilen metal ve alaşımlarının kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir.

Biyobozunur metallerin bozunma mekanizmaları bir korozyon olayıdır. Vücuda yerleştirilen biyobozunur malzemeden üretilmiş parça, vücut sıvısına maruz kalarak korozyon ilebozunmaya başlar. Korozyon sonucu ortaya çıkan ürünlerin ise toksik etki göstermemesi önemlidir.Laboratuvar ortamında (in vitro) ve canlılar üzerinde (in vivo) yapılan testler ile bu malzemelerin bozunma hızları belirlenmeye çalışılmaktadır.

Günümüzde üzerinde en fazla araştırma yapılan biyobozunur metaller Fe, Mg ve Zn esaslı alaşımlardır. Bu üç biyobozunur malzeme grubu birbiri ile mukayese edildiğinde en yüksek dayanım Fe esaslı, en düşük dayanım ise Zn esaslı alaşımlarda elde edilmiştir. Ancak bozunma hızları dikkate alındığında, vücut için en uygun bozunma hızına Zn esaslı alaşımların sahip olduğu rapor edilmektedir.

Bu üç biyobozunur malzeme grubunun da üstün ve zayıf özellikleri bulunmaktadır. Ancak son yıllarda yapılan çalışmaların bozunma oranı istenene en yakın olan Zn esaslı malzemelere yoğunlaştığı görülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Babacan, N., Kochta, F., Hoffmann, V., Gemming, T., Kühn, U., Giebeler, L., . . . Hufenbach, J. (2021). Effect of silver additions on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of biodegradable Fe-30Mn-6Si. *Materials Today Communications, 28*, 102689. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102689
2. Bowen, P. K., Drelich, J., & Goldman, J. (2013). Zinc Exhibits Ideal Physiological Corrosion Behavior for Bioabsorbable Stents. *Advanced Materials, 25*(18), 2577-2582. doi:https://doi.org/10.1002/adma.201300226
3. Bowen, P. K., Shearier, E. R., Zhao, S., II, R. J., Zhao, F., Goldman, J., & Drelich, J. W. (2016). Biodegradable Metals for Cardiovascular Stents: from Clinical Concerns to Recent Zn-Alloys. *Advanced Healthcare Materials, 5*(10), 1121-1140. doi:https://doi.org/10.1002/adhm.201501019
4. Burt, H. M., & Hunter, W. L. (2006). Drug-eluting stents: A multidisciplinary success story. *Advanced Drug Delivery Reviews, 58*(3), 350-357. doi:https://doi.org/10.1016/j.addr.2006.01.014
5. Eliaz, N. (2019). Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review. *Materials*, 407. doi:https://doi.org/10.3390/ma12030407
6. El-Rahman, S. S. (2003). Neuropathology of aluminum toxicity in rats (glutamate and GABA impairment). *Pharmacological Research, 47*(3), 189-194. doi:https://doi.org/10.1016/S1043-6618(02)00336-5
7. Erinc, M., Sillekens., W., Mannens, R., & Werkhoven, R. (2009). Applicability of existing magnesium alloys as biomedical implant materials. *Magnesium Technology*, 209-214. https://www.researchgate.net/publication/264737591_Applicability_of_existing_magnesium_alloys_as_biomedical_implant_materials adresinden alındı
8. Feng, Y., Gaztelumendi, N., Fornell, J., Zhang, H., Solsona, P., Baró, M., . . . Sort, J. (2017). Mechanical properties, corrosion performance and cell viability studies on newly developed porous Fe-Mn-Si-Pd alloys. *Journal of Alloys and Compounds, 724*, 1046-1056. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.112
9. Fiocchi, J., Lemke, J., Zilio, S., Biffi, C., Coda, A., & Tuissi, A. (2021). The effect of Si addition and thermomechanical processing in an Fe-Mn alloy for biodegradable implants: Mechanical performance and degradation behavior. *Materials Today Communications, 27*, 102447. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102447

10. Gu, X., Zheng, Y., Cheng, Y., Zhong, S., & Xi, T. (2009). In vitro corrosion and biocompatibility of binary magnesium alloys. *Biomaterials, 30*(4), 484-498. doi:https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.10.021
11. Gu, X., Zhou, W., Zheng, Y., Cheng, Y., Wei, S., Zhong, S., . . . Chen, L. (2010). Corrosion fatigue behaviors of two biomedical Mg alloys – AZ91D and WE43 – In simulated body fluid. *Acta Biomaterialia, 6*(12), 4605-4613. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.07.026
12. Hänzi, A. C., Metlar, r., Schinhammer, M., Aguib, H., Lüth, T. C., Löffler, J. F., & Uggowitzer, P. J. (2011). Biodegradable wound-closing devices for gastrointestinal interventions: Degradation performance of the magnesium tip. *Materials Science and Engineering: C, 31*(5), 1098-1103. doi:https://doi.org/10.1016/j.msec.2011.03.012
13. Hermawan, H., Alamdari, H., Mantovani, D., & Dubé, D. (2008). Iron-manganese: New class of degradable metallic biomaterials prepared by powder metallurgy. *Powder Metallurgy*, 38-45. doi:10.1179/174329008X284868
14. Hermawan, H., Dubé, D., & Mantovani, D. (2007). Development of Degradable Fe-35Mn Alloy for Biomedical Application. *Advanced Materials Research, 15-17*, 107-112. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.15-17.107
15. Hermawan, H., Purnama, A., Dube, D., Couet, J., & Mantovani, D. (2010). Fe–Mn alloys for metallic biodegradable stents: Degradation and cell viability studies. *Acta Biomaterialia, 6*(5), 1852-1860. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.11.025
16. Kiani, F., Lin, J., Vahid, A., Munir, K., Wen, C., & Li, Y. (2022). Mechanical and corrosion properties of extruded Mg–Zr–Sr alloys for biodegradable implant applications. *Materials Science and Engineering: A, 831*, 142192. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142192
17. Kokubo, T., & Takadama, H. (2006). How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? *Biomaterials, 27*(15), 2907-2915. doi:https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.01.017
18. Li, H., Shi, Z., & Wang, L. (2020). Opportunities and challenges of biodegradable Zn-based alloys. *Journal of Materials Science & Technology, 46*, 136-138. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.12.014
19. Li, H., Zheng, Y., & Qin, L. (2014). Progress of biodegradable metals. *Progress in Natural Science: Materials International, 24*(5), 414-422. doi:https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.08.014

20. Li, S., Mo, Y., Gao, C., Shuai, C., & Peng, S. (2022). A dual redox system for enhancing the biodegradability of Fe-C-Cu composite scaffold. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 213*, 112431. doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112431
21. Li, Z., Gu, X., Lou, S., & Zheng, Y. (2008). The development of binary Mg–Ca alloys for use as biodegradable materials within bone. *Biomaterials, 29*(10), 1329-1344. doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961207010514
22. Li, Z., Shi, Z.-Z., Hao, Y., Li, H.-F., Liu, X.-F., Volinsky, A. A., . . . Wang, L.-N. (2019). High-performance hot-warm rolled Zn-0.8Li alloy with nano-sized metastable precipitates and sub-micron grains for biodegradable stents. *Journal of Materials Science & Technology, 35*(11), 2618-2624. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.06.009
23. Liu, P., Wu, H., Liang, L., Song, D., Liu, J., Ma, X., . . . Baker, I. (2022). Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of additively-manufactured Fe–Mn alloys. *Materials Science and Engineering: A, 852*, 143585. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143585
24. Liu, Y., Curioni, M., Dong, S., & Liu, Z. (2022). Understanding the effects of excimer laser treatment on corrosion behavior of biodegradable Mg-1Ca alloy in simulated body fluid. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1004-1023. doi:https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.11.011
25. Liu, Y., Zheng, Y., & Hayes, B. (2017). Degradable, absorbable or resorbable—what is the best grammatical modifier for an implant that is eventually absorbed by the body? *Science China Materials, 60*, 377-391. doi:10.1007/s40843-017-9023-9
26. Mostaed, E., Sikora-Jasinska, M., Drelich, J. W., & Vedani, M. (2018). Zinc-based alloys for degradable vascular stent applications. *Acta Biomaterialia, 71*, 1-23. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.03.005
27. Nakamura, Y., Tsumura, Y., Tonogai, Y., Shibata, T., & Ito, Y. (1997). Differences in Behavior among the Chlorides of Seven Rare Earth Elements Administered Intravenously to Rats. *Fundamental and Applied Toxicology, 37*(2), 106-116. doi:https://doi.org/10.1006/faat.1997.2322
28. Papanikolaou, G., & Pantopoulos, K. (2005). Iron metabolism and toxicity. *Toxicology and Applied Pharmacology, 202*(2), 199-211. doi:https://doi.org/10.1016/j.taap.2004.06.021
29. Peuster, M., Hesse, C., Schloo, T., Fink, C., Beerbaum, P., & Schnakenburg, C. v. (2006). Long-term biocompatibility of a corrodible

peripheral iron stent in the porcine descending aorta. *Biomaterials, 27*(28), 4955-4962. doi:https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.05.029

30. Qi, Y., Li, X., He, Y., Zhang, D., & Ding, J. (2019). Mechanism of Acceleration of Iron Corrosion by a Polylactide Coating. *CS Applied Materials \& Interfaces, 11*(1), 202-218. doi:10.1021/acsami.8b17125
31. Revie, R., & Uhlig, H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control.* New Jersey: Wiley & Sons.
32. Schinhammer, M., Hänzi, A. C., Löffler, J. F., & Uggowitzer, P. J. (2010). Design strategy for biodegradable Fe-based alloys for medical applications. *Acta Biomaterialia*, 1705-1713. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.07.039
33. Tong, X., Zhang, D., Lin, J., Dai, Y., Luan, Y., Sun, Q., . . . Wen, C. (2020). Development of biodegradable Zn–1Mg–0.1RE (RE = Er, Dy, and Ho) alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia, 117*, 384-399. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.09.036
34. Venezuela, J., & Dargusch, M. (2020). Addressing the slow corrosion rate of biodegradable Fe-Mn: Current approaches and future trends. *Current Opinion in Solid State and Materials Science, 24*(3), 100822. doi:https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100822
35. Venezuela, J., & Dargusch, M. S. (2019). The influence of alloying and fabrication techniques on the mechanical properties, biodegradability and biocompatibility of zinc: A comprehensive review. *Acta Biomaterialia, 87*, 1-40. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.01.035
36. Vormann, J. (2003). Magnesium: nutrition and metabolism. *Molecular Aspects of Medicine, 24*(1), 27-37. doi:https://doi.org/10.1016/S0098-2997(02)00089-4
37. Wang, H., Zheng, Y., Li, Y., & Jiang, C. (2017). Improvement of in vitro corrosion and cytocompatibility of biodegradable Fe surface modified by Zn ion implantation. *Applied Surface Science, 403*, 168-176. doi:https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.158
38. Wang, W., Blawert, C., Zan, R., Sun, Y., Peng, H., Ni, J., . . . Zhang, X. (2021). A novel lean alloy of biodegradable Mg–2Zn with nanograins. *Bioactive Materials, 6*(12), 4333-4341. doi:https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.04.020
39. Wang, Y., Venezuela, J., & Dargusch, M. (2021). Biodegradable shape memory alloys: Progress and prospects. *Biomaterials, 279*, 121215. doi:https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.121215

40. Witte, F. (2010). The history of biodegradable magnesium implants: A review. *Acta Biomaterialia, 6*(5), 1680-1692. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.02.028
41. Witte, F., Fischer, J., Nellesen, J., Crostack, H.-A., Kaese, V., Pisch, A., . . . Windhagen, H. (2006). In vitro and in vivo corrosion measurements of magnesium alloys. *Biomaterials, 27*(7), 1013-1018. doi:https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.07.037
42. Witte, F., Fischer, J., Nellesen, J., Vogt, C., Vogt, J., Donath, T., & Beckmann, F. (2010). In vivo corrosion and corrosion protection of magnesium alloy LAE442. *Acta Biomaterialia, 6*(5), 1792-1799. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.10.012
43. Xiang, W., Lu, H.-M., Li, X.-L., li, l., & Zheng, Y. (2007). Effect of cooling rate and composition on microstructures and properties of Zn-Mg alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17*, 122-125. http://www.cqvip.com/qk/85276x/2007a01/25959132.html adresinden alındı
44. Xie, K., Wang, L., Guo, Y., Zhao, S., Yang, Y., Dong, D., . . . Hao, Y. (2021). Effectiveness and safety of biodegradable Mg-Nd-Zn-Zr alloy screws for the treatment of medial malleolar fractures. *Journal of Orthopaedic Translation, 27*, 96-100. doi:https://doi.org/10.1016/j.jot.2020.11.007
45. Xin, Y., Hu, T., & Chu, P. (2011). In vitro studies of biomedical magnesium alloys in a simulated physiological environment: A review. *Acta Biomaterialia, 7*(4), 1452-1459. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.12.004
46. Xin, Y., Huo, K., Tao, H., Tang, G., & Chu, P. K. (2008). Influence of aggressive ions on the degradation behavior of biomedical magnesium alloy in physiological environment. *Acta Biomaterialia, 4*(6), 2008-2015. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.05.014
47. Yamamoto, A., & Hiromoto, S. (2009). Effect of inorganic salts, amino acids and proteins on the degradation of pure magnesium in vitro. *Materials Science and Engineering: C, 29*(5), 1559-1568. doi:https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.12.015
48. Zerankeshi, M. M., & Alizadeh, R. (2022). Ag-incorporated biodegradable Mg alloys. *Materialia*, 101445. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101445
49. Zhao, S., Seitz, J.-M., Eifler, R., Maier, H. J., Guillory, R. J., Earley, E. J., . . . Drelich, J. W. (2017). Zn-Li alloy after extrusion and drawing: Structural, mechanical characterization, and biodegradation in abdominal

aorta of rat. *Materials Science and Engineering: C, 76*, 301-312. doi:https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.02.167

50. Zhao, X., Niinomi, M., Nakai, M., Miyamoto, G., & Furuhara, T. (2011). Microstructures and mechanical properties of metastable Ti–30Zr–(Cr, Mo) alloys with changeable Young's modulus for spinal fixation applications. *Acta Biomaterialia, 7*(8), 3230-3236. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.04.019
51. Zheng, Y., Gu, X., & Witte, F. (2014). Biodegradable metals. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 77*, 1-34. doi:https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.01.001
52. Zhu, S., Wu, C., Li, G., Zheng, Y., & Nie, J.-F. (2019). Creep properties of biodegradable Zn-0.1Li alloy at human body temperature: implications for its durability as stents. *Materials Research Letters, 7*(9), 347-353. doi:https://doi.org/10.1080/21663831.2019.1610106
53. Zhuo, X., Wu, Y., Ju, J., Liu, H., Jiang, J., Hu, Z., . . . Xue, F. (2022). Recent progress of novel biodegradable zinc alloys: from the perspective of strengthening and toughening. *Journal of Materials Research and Technology, 17*, 244-269. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.004

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE VERİM ARTTIRMAYA YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Muhammed ŞULE[1],
Can COŞKUN[2],
Zuhal OKTAY[3]

[1] İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, muhammed_sule2000@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0001-7987-5181
[2] İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com,
https://orcid.org/ 0000-0003-4100-0296
[3]İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com,
https://orcid.org/ 0000-0001-6167-7048

1. GİRİŞ

Dünyada nüfusun artış göstermesinin bir sonucu olarak enerji tüketiminde ’deartış yaşanmaktadır.Gelişmekte olan ülkelerde, sanayi sektöründeki yatırımlar enerji tüketimini arttırmaktadır (Bozkurt,A.U.,2008).Fosil yakıtlar insanlık için günümüze değin enerji kaynağı olarak yaygın bir biçimde kullanılmıştır.Kömürün sanayide, petrolün ulaştırmada kullanılması insan hayatını kolaylaştırmış ve yaşam kalitesini arttırmıştır.Fakat fosil yakıtların çevreye verdiği zararın artması ülkeleri, enerji üretimi noktasında farklı alternatifler aramaya itmiştir.Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları yavaş yavaş fosil yakıtların yerini almaya başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları isminden de anlaşılabileceği gibi kendini yenileyebilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından bazıları; güneş enerjisi,rüzgâr enerjisi,jeotermal enerji,biyokütle,hidrolik enerjisi olarak sayılabilir. Rüzgâr enerjisi teknolojisi,rüzgârın türbin kanatlarını döndürmesi sonucu mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesi esasına dayanır. Rüzgâr türbininin kurulacağı yerin rüzgâr potansiyeli,verimli bir biçimde elektrik üretimi açısından çok önemlidir.Türbinlerde kullanılan jeneratör tipi, kanat aerodinamiği ve kanat sayısı da verimi etkileyen diğer önemli bir faktördür.Elektrik üretim verimini arttırabilmek için jeneratör teknolojileri üzerinde çalışmalar sürmektedir.Aerodinamik verim üzerine yapılan çalışmalar içerisinde kanat yapısı ve sayısı üzerine yoğunlaşılmıştır.Yapılarındaki farklılık sebebiyle türbin tiplerine göre verimler farklılaşmaktadır. Denizlere kurulan rüzgâr türbinleri,karaya kurulan kara rüzgâr türbinlerine göre daha verimli çalışmaktadır. Türbinler eksenlerine göre yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri olarak sınıflandırılabilmektedirler.Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme ekseni rüzgâr yönüne paralel olarak konumlandırılmaktadır.Dikey eksenli rüzgâr türbininde ise dönme ekseni rüzgâr yönüne dik olarak konumlandırılmaktadır.Şenel ve Erdem (Şenel,M.C.,Erdem,K.O.C., 2015) yapmış oldukları çalışmada rüzgar potansiyelinin verimi etkilediğini ifade etmişlerdir.Şenel ve Erdem, Dünya üzerindeki her bölgenin farklı rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olmasının verim üzerinde farklılaşmaya neden olduğunu dile getirmişlerdir. Rüzgâr enerjisi potansiyelinin en yüksek olduğu bölgeler sırasıyla; Kuzey Amerika,Doğu Avrupa,Rusya,Güney Amerika,Batı Avrupa,Asya ve Okyanusya’dır. Rüzgâr türbini kurulu gücü incelendiğinde, kurulu gücü en fazla olan ülkenin Çin olduğu görülmektedir.Çin’i sırasıyla ABD ve Almanya takip etmektedir. Ülkemizde kurulu güç bölgelere göre farklılık göstermektedir. En çok rüzgâr türbinin kurulduğu bölge Ege Bölgesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Coğrafi koşullar rüzgâr enerjisi potansiyelini etkilemektedir. Rüzgâr türbinlerinde bakım maliyetleri nispeten

düşüktür.Ayrıca kapladığı alanın az olması da arazideki yer kayıplarınıazaltmaktadır. Birçok avantajının yanında dezavantajlarına da dikkat çekmekte fayda vardır.Yerleşim yerlerine yakın mesafede olan türbinler gürültüye sebep olabilmektedir.Ayrıca deniz üstürüzgâr türbinlerinde oluşan bir arıza durumunda ulaşım ve müdahalede bazı zorluklar yaşanabilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Atmaca (Atmaca , Ö., 2017) yapmış olduğu çalışmada, rüzgar enerjisinden elektrik üretimi için sabit ve değişken hızlı rüzgar türbinlerini incelemiştir.Bu iki çeşit rüzgâr türbini arasında çeşitli kıyaslamalarda bulunmuştur.Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde maksimum güç izleme yöntemlerinden faydalanıldığı için sabit hızlı rüzgâr türbinlerinden daha verimli olduğu sonucuna ulaşmıştır. Değişken hızlı rüzgâr türbininde, jeneratör tarafında bulunana evirici sistem ile maksimum güç belirlenmiştir.Şebekeden yana olan evirici ise doğru akım barasının sabit tutulmasını sağlamıştır.Bu sayede sistem verimiolarak değişken hızlı türbinin daha iyi bir performans gösterdiği ortaya konmuştur. Bu çalışmada ayrıca doğrudan sürülen türbinlerde arızanın daha az olması,mekanik dizaynın basit olması ve bakımının daha seyrek zamanlarda yapılması, doğrudan sürülen türbinlerinrediktörlü türbinlere göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

Bilgili (Bilgili,M., 2021) yapmış olduğu çalışmada Türkiye'de 2013 yılında elektrik üretiminde kurulu güç üst sınırının 500 kW yerine 1000 kW'a çıkarılması sonucunda küçük ölçekli mekanların elektrik ihtiyacını karşılayabilecek vedüşük rüzgar hızında verimli olabilecek türbinler hakkında incelemeler yapmıştır.Yapmış olduğu çalışmada serbest haldeki rüzgâr akış hızı 10 m/s olarak belirlenmiştir.Bu hızla incelenen türbinden sağlanan güç 246.17 W olarak ölçülmüştür. Yeni bir difüzör sistemi kullanılarak rüzgâr akış hızı artırılmış ve üretilen güç 333,2W değerine çıkarılmıştır.

Keleş ve arkadaşları(Keleş ve ark., 2013) yapmış oldukları çalışmada rüzgar türbini verimi için hesaplamalar ve önemli çıkarımlarda bulunmuşlardır.Rüzgâr türbini tasarımı yaparken türbinden elde edilebilecek güç değerine göre kanatlar için hesaplamalar yapmışlardır.Tasarımı yapılacak kanadın performansının kanat için malzeme seçimi ile bağlantılı olduğuna dikkat çekmişlerdir.Bundan dolayı kanat malzemesi olarak poliester seçmişlerdir.Kanadın içi boş ve rotora bağlandığı bölgeyi içi dolu şekilde tasarlamışlardır.Ayrıca rotorun hareketi dişli kutusuna iletilirken rotor,rotor miline göre 90 derece açı ile bağlanmıştır.Sonuçlar, 90 derece açı ile bağlantı yapılmadığı takdirde rotor yatağında kısa sürede tahribatlar olduğunu ve bunun sonucunda verimde kayıplar gerçekleştiğini göstermiştir. Yapmış oldukları çalışmada bu sorunun

önüne geçebilmek için mil ve rotora kaynak yapılmış ve alın flanşı mil ile yekpare olarak tasarlanmıştır.

Schubel ve Crossley(Schubel,P.J.,Crossley,R.J.,2012) yapmış oldukları çalışmada dikey ve yatay eksenli rüzgar türbinleri üzerine inceleme ve kıyaslamalarda bulunmuşlardır.Çalışmaları sonucunda yatay montajlanmış ve üç kanatlı türbinlerin dikey eksenli türbinlerden daha verimli olduğu belirtilmiştir.Kanat yapısına da değinilen bu çalışmada, ince kanat yapısının kalın kanat yapısına göre aerodinamik performans açısından daha verimli olduğu da tespitinde bulunulmuştur.

Vitale ve Rossi (Vitale, A.J.,Rossi,A.P.,2008) yaptıkları çalışmada rüzgar türbini tasarımı için geliştirilmiş Zeus Disenador algoritması üzerine incelemelerde bulunmuşlardır.Kanat sayısını,eğrileri ve rüzgâr hızının bu algoritma ile belirtilebileceği açıklamıştır.Böylece türbin rotor verimliliği için uygun bir değerlerin bu yazılım sayesinde bulunabileceği tespiti yapılmıştır.

Pasupulative arkadaşları (Pasupulati ve ark., 2005) yapmış oldukları çalışmada EnergyUnlimitedInc şirketinin uzunluğu değişebilen özellikte rüzgar türbini kanat tasarımı üzerine incelemeler yapmışlardır.Kanatlar düşük şiddettekirüzgârlarda uzayıp daha yüksek şiddetteki rüzgarlardakısalmakta olduğu belirtilmektedir.Böylece rüzgâr şiddeti az olduğu durumlarda daha yüksek enerji üretilebilmiştir.Bu sayede verimin artırılması sağlanabilmiştir.Ayrıca şiddetli rüzgârlarda türbine binen mekanik yükü azaltan bu sistem enerji üretimini %25 oranlarında arttırmıştır.Tasarlanan bu rüzgâr türbini ile yüksek hızlarda da üretim yapılabilmiştir.Bunun yanında rüzgâr hızının az olduğu noktalarda da üretim sağlanabilmiştir.

Saulescu ve arkadaşları (Saulescu ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada aynı diferansiyel gezegensel hız arttırıcı (kaçış hızı) vasıtasıyla, geleneksel veya ters dönen elektrik jeneratörlerini entegre edebilen, ters yönde dönen rüzgar rotorlarına sahip yeni bir rüzgar sistemleri konsepti üzerine analiz incelemeler yapmışlardır. Mekanik gücün girişten çıkışa paralel olarak iletimi, seri bağlantıya kıyasla daha yüksek bir verimlilik sağlayacağı ifade edilmiştir. Çalışmada konvansiyonel, sabit statorlu bir jeneratöre karşı ters dönen bir elektrik jeneratörünün ortaya koyduğu enerji kazancını belirlemek için, aynı bileşenlere (rüzgâr rotorları, hız arttırıcı ve elektrik jeneratörü) sahip iki rüzgâr türbininin karşılaştırmalı çalışması sunulmuştur.Çeşitli senaryolar üzerinde çalışmalarda bulunmuşlar ve şu sonuçlara ulaşmışlardır: zıt dönüşlü jeneratörlü rüzgâr sistemlerinin, geleneksel jeneratörlü sistemlere kıyasla daha verimlidir ve daha yüksek amplifikasyonkinematik oranına sahiptir.

Neagoe ve arkadaşları (Neagoe ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada jeneratör rotoru (GR)'ye giden güç akışında mekanik bir hız arttırıcıyı ve

jeneratör statoru (GS)'nin doğrudan bağlantısını sağlayan ters dönen DC jeneratörlü tek rotorlu bir rüzgar türbininin mekanik sisteminin genelleştirilmiş bir dinamik modelleme yaklaşımı üzerine incelemeler yapmışladır. İki ters dönen rotorlu ya da ters dönen bir jeneratörlü rüzgar türbinlerinde kullanılan paralel veya bölünmüş güç aktarımlarının, verimlilik açısından seri aktarımlardan daha fazla değere sahip olduğu sonucuna dikkat çekmişlerdir.Rüzgar rotoru tarafından üretilen güç, jeneratör rotoru ve statoruna dallanır. Geleneksel rüzgar türbinlerine (sabit statorlu) kıyasla çeşitli avantajlar getiren bir çözümdür.Bu çözüm, yüksek mekanik verimlilik, daha kompakt bir hız arttırıcıya sahiptir (daha düşük kinematik oran ile). Ayrıca çalışırken kendi kendini dengeleyen elektrik jeneratörüdür. Dinamik modelleme, değişken rüzgar koşulları altında gerçekleştirilir. Sabit eksenli dönme hareketi (mekanik atalet momentleri, kinematik aktarım oranları ve silindirik dişli takımının verimliliği) ile rijit gövdelerle ilgili klasik denklemleri, hem doğru akım için mekanik özelliklerle ilişkili lineer denklemlerle birleştirir.Rüzgar rotorunun mekanik karakteristiğinin lineer denklemleri, rüzgar hızının fonksiyonları olarak ifade edilir. Dinamik rejimdeki hareket ve verimlilik denklemleri, genelleştirilmiş teorik modeli doğrulayan sayısal sonuçlar olan 10kWrüzgar türbini durum çalışması için analitik olarak tanımlanır ve simüle edilmiştir.

Njiri ve Söffker (Njiri, J. G.,Söffker, D. 2016) yapmış oldukları çalışmada rüzgar türbininin boyutunun verim üzerindeki etkisine dikkat çekmişlerdir.Rüzgâr türbinin boyutun büyümesinin yorulma stresinin arttırması ve bunun sonucunda da daha kısa sürede arızaya yol açacağını belirtmişlerdir.Üretim maliyetlerinin düşürülmesini de türbininoptimum verimde çalıştırmasıyla sağlanabileceği belirtilmiştir. Maliyetin azaltılmasıve verimin artırılmasındaki bir diğer faktörün olan boyut ve güç derecesinin artırılmasını olarak vurgulanmıştır.

Kiranoudis ve Maroulis (Kiranoudis, C. T.,Maroulis, Z. B.,1997) yapmış oldukları çalışmada rüzgar türbini santrallerindeki verimliliği incelemişlerdir. Rüzgar türbini santrallerindekiverimliliği etkileyen faktörlerin rüzgar hızı (büyüklük ve yön), rüzgar türbini tipi ve özellikleri ve bireysel türbinlerin konumu ve aralığı ile ilgili olduğunu açıklamışlardır.

Rüzgar türbinlerinde verimi arttırabilmek için daha verimli jeneratörler üzerinde çalışılmaktadır. Booker ve arkadaşları (Booker ve ark., 2010) yaptıkları çalışmada doğrudan tahrikli kalıcı mıknatısa (PM) vurgu yapılmışlardır.Booker ve arkadaşları doğrudan tahrikli radyal PM jeneratörü üzerine testler ve incelemeler yapılmışlardır. Jeneratöründüşük başlangıç torku, dişli kutularının ortadan kaldırılması, düşük bakım, düşük gürültü ve titreşim

özelliğine ve çok yüksek elektriksel ve mekanik verimliliğe sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Buckney ve arkadaşları (Buckney ve ark., 2013) yapmış oldukları çalışmada rüzgâr türbini kanatlarının iyileştirilmesi ve alternatif yapısal yerleşimleri konusunda araştırmalarda bulunmuşlardır.Tasarım, yoluyla ağırlık azatlımı ve enerjisi maliyetinin düşürmesi amaçlanmıştır.Geliştirilen sistemde bıçağın uzunluğu boyunca dönüşen bir yapı tasarlamıştır.Arka kenar kütlesi, ofset yedekli bir tasarımla kapaklar uca doğru yapılmıştır.Şekil faktörleri, arka kenar takviyesinin ve ofset direğin kapak topolojisi hem sertliği en üst düzeye çıkarmada hem de stresi en aza indirmede verimli sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.Ayrıca rüzgar türbini boyutunun artması anma gücünü arttırmakta olup bu durum KW başına maliyeti düşürmüştür.Ayrıca bu çalışmada ağırlık azaltımı yapılarak kanat maliyeti azaltılmaya çalışılmıştır.

Zemamou ve arkadaşları (Zemamou ve ark., 2017) yapmış oldukları çalışmada savonius rüzgar türbini üzerine çalışmışlardır. Savonius rotorunun yeni tasarımlarının performansı hakkında yayınlanmış makalelerin çeşitli sonuçlarını karşılaştırmayı amaçlamışlardır.Bu türbin çeşidi, düşük çalışma hızı ve bağımsız rüzgar yönleri olmasından dolayı tercih sebebi olmaktadır.Ancak düşük verimlilik ve yüksek negatif tork dezavantajlarından bazılarıdır.Savonious rotoru için güç katsayısı 0.1 ile 0.25 değerleri arasında değişmektedir.Bu katsayının iyileştirebilmek için rotor performansının iyileştirilmesi gerekmektedir.Rotor performansını iyileştirmek için Savonius rotor kanadının şeklinin geliştirilmesinin mümkün olduğu ve kanat sayısı tatmin edici bir performans seviyesine ulaşmak için engel kalkanı, perde veya konveyör saptırıcı gibi ekstra bir set eklenmesi Savonius'un performansını artırabileceği sonucuna varılmıştır.Bu yenilikler ile normalrotora göre %27.3 performans sağlanabileceği ortaya çıkmıştır.

Eminoğlu (Eminoğlu,U.) yapmış olduğu çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde çıkış gücünün hesaplanabilmesi için yeni bir model tavsiye etmektedir.Tavsiye edilen bu model rotor verimine gerek kalmadan güç hesabını yapabilmesini mümkün kılmaktadır.Çalışmada yapılan analizler neticesinde bu modelin gerçekleştirilebileceği ve değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin çıkış gücünün bulunmasında faydalı sayılabileceği ortaya konmuştur.Bu modelin diğer üstünlüklerine bakıldığı zaman, türbin rotor çapı ve hava yoğunluğu dikkate alınmadan sadece nominal rüzgar hızına bakılıp çıkış gücünün ortaya çıkarılmasının mümkün kılmaktadır.Sonuç itibari ile az tasarım verisi ile en makul türbin kurulu gücünün rahatlık ile tespit edilmesi bu çalışma ile sunulmuştur.

Kekezoğlu (Kekezoğlu, B., 2013) yapmış olduğu çalışmada bir rüzgar enerji sisteminin dizaynı ve protopit bir şekilde üretimini yapmıştır.Farklı kanat sayıları ve dişli adeti bu çalışmadaincelenen parametreler olmuştur. Kent ortamında binaların üzerlerine takılan bu küçük ölçekteki türbinler ile yakın mesafeden dolayı enerji iletimindeki kayıpların en aza indirilecek şekilde kullanımı amaçlanmıştır.Kanat sayısının azaltılıp artırılabildiği ve dişli miktarının da ayarlanabildiği bu türbinlerde, bulundukları hava koşuluna göre hareket edilebilmektedir.Bu değişikliklere imkan sağlayan tasarım sayesinde türbinin yüzey alanı arttırılarak elde edilecek mekaniksel güç de arttırılmaktadır.Dişli sayısındaki artışlar mekanik gücün ve tork'unartmasını sağlamaktadır. Kanat sayısının arttırılması da gücün artmasına olanak vermektedir.Yapılan testler sonucunda türbin için en uygun jeneratörün 650W gücüne sahip 750 rpm devir sağlayan sabit mıknatıslara sahip doğru akımlı jeneratör olduğu tespit edilmiştir.

Ömeroğlu (Ömeroğlu, Ö., 2012)yapmış olduğu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbininde enerji üretimi noktasında türbin boyutun önemi üzerinde durmuştur.Çark çapının,kanat profilinin ve kule yüksekliğinin elde edilecek güç ile ilişkili olduğu sonucuna ulaşmıştır.Yapmış olduğu çalışmada 15 m çark çapına sahip türbin için kule boyu 30 metre ve 150 metre olmak koşuluyla ortaya çıkacak güçleri karşılaştırılmıştır.Bu güç karşılaştırmasına göre kule boyunun 30 metreden 150 metreye çıkartılması gücün 2.5 kat yükselmesine sebebiyet vermektedir.Bir diğer uygulamada ise çark çapına göre bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir.Bu sefer kule yüksekliği 150 metre olarak belirlenip değiştirilmemiştir.Çark çapı 120 metre ve 15 metre olarak varsayılıp elde edilen gücün çark çapının arttırılması ile hemen hemen 64 kat arttığı tespit edilmiştir.

Dilmaç (Dilmaç, E., 2019) yapmış olduğu bir çalışmada rüzgar türbini kanadı ve kanat profili tasarımının önemine vurgu yapmıştır.Bu doğrultuda NACA 4415 kanat profilinin firar kenarında değişiklikler yapıp bu değişikliğin türbin performansına etkisini analiz etmişlerdir.QBlade programı yardımıyla NACA 4415 kanat profilinin çıkış kenarı simetrik biçimli % 1, % 2, % 4, % 7 ve % 10 değerlerinde, bir kanat profilinin hücum ve firar kenarlarından geçen doğru olarak bilinen veterçizgisisinin yalnızca alt veya üst kısmında % 0.5, % 1, % 2, % 3.5, % 4 ve % 5 olacak şekilde kalınlaştırılmış ve en verimli küt firar kenarlı kanat profili tespit edilmiştir.Uygulanan analizler neticesinde 10 derece hücum açısı kanat profilinin alt kısmında yüzde 2 oranında kalınlaştırma uygulanıp bu profilin aerodinamik verimi yüzde 5 oranında yükseltilmiştir.Hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniği ile 3d analizler yapılmış sonuç olarak da küt kenar firar kenarlı kanattan 5.12 Nmtork alınmıştır.

NACA4415 kanat profilinden ise 4.42Nm tork alınmıştır.Elde edilen yeni kanadın daha verimli olduğu ortaya konmuştur.

Ünal (Ünal, A., 2021) yapmış olduğu çalışmada yerleşim yerlerinde tercih edilen mini Delta tipindeki dikey eksenli darrieus rüzgar türbininin düşey haldeki kanat açıları ve uç açıklığının değiştirilmesiyle oluşan verimlilik değişimi üzerine araştırma gerçekleştirmiştir.Türbinin kanat profili olarak NACA0018 profili üretilmiştir.Kanatçıklar ise ikili,dörtlü ve üçlü olarak kanatçıkların düşey açıları deneyler ile değiştirilip türbin veriminin bu durumla olan ilişkisi gözlemlenmiştir.Sonuç olarak kanatlardaki düşey kanat açılarının azaltılması ile beraber verimlilikte düşüş yaşandığı belirlenmiştir.

Özdil Kaçan (Özdil Kaçan, Y., 2014) yapmış olduğu çalışmada 4 metre çapa sahip yüksek aerodinamik performanslı NACA 4412 kanat profili ile kompozit kanat tasarımı yapmayı amaçlamıştır.Yapmış olduğu çalışmada ANSYS programından faydalanmıştır.Tasarlanan kanat on kısma ayrılmıştır.Her kısım için değişik kalınlık ve farklı fiber oryantasyonlar uygulanıp rüzgar hızının az olduğu yerlerde aktif olabilecek derecede hafif,rüzgar hızının fazla olduğu şartlara karşı mukavemetli kompozit kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir.Sonuç olarak kanadın hafifliğinden kaynaklı olarak kanadın ilk dönmesi,rüzgâr hızının az olduğu koşulda sağlanacak ve bu sayede elektriğin üretimi artmış olacaktır. Dolayısıyla yüksek elektrik üretimi verimi sağlanabilecektir.

Gültekin (Gültekin, Y., 2020) yapmış olduğu çalışmada muhtelif hücum açılarına göre kanatta optimizasyon incelemesi yapmıştır.Bu çalışma için ANSYS programından faydalanılmıştır.Çalışmada simetrik kanat ve paralel olan akış koşulu denenmiştir. Farklılık gösteren şartlarda verim değerini oluşturan kaldırma kuvvet/direnç kuvvet katsayısı oranı, Cl/Cd, 13.205625 değerinde sabit halde tutulmuştur.10 derece hücum açısı 5m/s hızından 4 derece hücum açısı 20m/s hız şartı için verimde yükselme olmuştur.Ayrıca kaldırma kuvveti katsayısı da artmıştır.Kanat profili için verimli olan 4 derece hücum açısı ve 25 m/s hız referans olarak alınmış olup kanat verimleri bu referansa göre ele alınmıştır.4derece hücum açısı 30m/s şartından aynı derecede hücum açısı 50m/s şartına kadar olan aralıkta ise kanat profili kaldırma kuvvetini ve kaldırma kuvveti katsayısını emniyet sebeplerinden dolayı azaltarak kendisini güncellemiştir.Şeklini değiştirebilen rüzgâr türbini kanadından yararlanılarak emniyet faktörleri sebebi ile rüzgâr türbininin enerji üretmesiperdovites ile önlenebilirken rüzgâr türbinlerinin enerji üretebileceği rüzgâr hızı toleransı arttırılıp türbinin kapasite faktörü ve yıllık enerji üretiminde yükselme elde edilebilecektir.

Gençoğlu ve Yıldırım (Gençoğlu, M.U.M.T., Yıldırım, S.) yapmış oldukları çalışmada türbin jeneratörleri üzerinde bir incelemede bulunmuşlardır.Senkron

jeneratörlerin sürekli rüzgarın olduğu konumlarda kullanıldığı asenkron ve doğru akım jeneratörlerinin ise rüzgar hızının sabit olmadığı değiştiği şartlarda kullanıldığını açıklamışlardır.Türbin performansının kullanılan jeneratör tipinden etkilendiğini de belirtmişlerdir.Küçük ve orta güçlü türbinlerde sincap kafesli asenkron jeneratörler ve daimi mıknatıslı senkron jeneratörlerin kullanılması gerektiği,güçlü rüzgar güç sistemi olan durumlarda ise çift beslemeli asenkron jeneratörlerin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Yılmaz ve arkadaşları(Yılmaz ve ark., 2016) yapmış oldukları çalışmada farklı üç kanat profilinin(S826, NACA 4415, NACA 63-415) 6 ,7 ve 8m/s hızlarında ve -4 ile 26 derece hücum açılarında deneylerini gerçekleştirmişlerdir.Deney sonuçlarına göre NACA 63-415 kanat profilinin 4° ile 12° hücum açısı şartlarında CL/CD değeri 7 iken öteki kanat profillerinin aynı hücum açılarında yaklaşık olarak 4'tür.12 derece hücum açısından sonra NACA 63-415 kanat profilinin CL/CD değeri düşüş gösterse de 21° hücum açısına kadar avantajı vardır. Geniş toleranslı hücum açılarında rüzgâr hızının az olduğu yerler için NACA 63-415 kanat profilinin verim açısından daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır.

Aygen (Aygen, U. A., 2019) yapmış olduğu çalışmada kanat profili yapısından kaynaklı performansın kanat yapısında değişiklikler yapılarak arttırılabileceğinin mümkün olduğu doğrultusunda kanat modeli tasarımı yapmışlardır. Daha düşük hızlarda daha fazla güç üretilebilmesinin olasılığının olduğu bilincinde hareket etmişlerdir.Tasarladıkları kanat 1 metre uzunluğunda kord 'a sahip olup kanat modeli uzunluğu da 1 metre olarak belirlenmiştir.Kanat üst yüzeyini kanat boyuna 30 derece, 90 derece,45 derece ve 60 derecelik açılar olacak şekilde konumlandırılan türbülatörlerintesiri hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı yardımıyla analiz edilmiştir.Neticede kanat üstünde oluşan basınç farklarının en büyük değeri 60 derece türbülatörlükanat'ta oluştuğu gözlemlenmiştir. Basınç farkının ez az olduğu açı ise 90 derece olan türbülatörlü kanatta olmuştur. ANSYS programı yardımıyla 5 m/s 10 m/s ve 15 m/s hızlarındaki basınç ve hız dağılımları gözlemlenmiştir.Bu gözlemler sonucunda ise eş yüksekliğe sahip türbülatörlü kanatlarda hızın artması sonucu basınç farkının azaldığı tespit edilmiştir.

Johansen ve arkadaşları(Johansen ve ark., 2009) yapmış oldukları çalışmada üç kanatlı bir rüzgar türbini rotorunun tasarımını, sadece maksimum aerodinamik verimliliği hesaplayarak ve yapısal ve tasarım dışı sorunları dikkate almadan anlatmışlardır.Rotor, kanat açıklığının çoğu için sabit indüksiyon varsayılarak tasarlanmıştır, ancak uç bölgesinin yakınında sabit bir yük varsayılmıştır.Rotor tasarımı bir aktüatör diski modeli kullanılarak elde edildi ve daha sonra hem serbest uyanma kaldırma hattı yöntemi hem de tam bir

3-D Navier-Stokes çözücü kullanılarak doğrulanmıştır. Üç model kullanılarak mükemmel bir uyum sağlanmıştır.Sonuç olarak da yerel indüksiyon faktörü, uca yaklaştıkça hafifçe artmıştır; buna sabit tasarım Ct ve iz genişlemesinin etkisi neden olmuştur. Bunu, eksenel hız serbest akış hızına yaklaştığı için en uçta bir azalma meydana gelmiştir.

Jackson ve arkadaşları (Jackson ve ark., 2005) yapmış oldukları çalışmada rüzgar türbinleri için 50 m'lik gelişmiş bir kanat için ön tasarım çalışmasını yapmışlardır (1–10 MW boyut aralığı.). İki değişik kanat tasarımı üzerinde kıyaslamalar yapmışlardır.Birinci kanat tasarımı için cam elyaf tasarlanmış olup, ikinci kanat için ise karbon elyafı kullanılması düşünülmüştür.Karbon ilavesi, görece düşükmaliyet artışlarıyla sonuçlanmıştır. Ancak özellikle kanat sapması açısından önemli faydalar sağlamıştır.İç elemanların yapımını basitleştirmek için kesitlerin kalınlığının uyarlanması, her iki kanat tasarımının yapısal verimliliğini büyük ölçüde geliştirmiştir.İç kanatlarda özelleştirilmiş kalın kör arka kenar kanatları (düz arka kanatlar olarak adlandırılır) bulunurken, dıştan takmalı motorlarda daha geleneksel keskin arka kenar yüksek kaldırma kanatları kullanılır.Kanatlı kanatların aerodinamik performans özellikleri, kör arka kenar akışlarını uygun şekilde simüle eden hesaplama teknikleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Kalın düz sırtlı aerofoillerin mükemmel kaldırma özelliklerine sahip olduğu ve eşit kalınlıktaki geleneksel keskin arka kenarlı aerofoillere göre yüzey kirlenmesine karşı çok daha az hassas olduğu gösterilmiştir.50 m kanatlı rotorun performansı, temiz ve kirli kanat yüzey koşullarına göre tahmin edilmiştir. Rotorun, bu boyuttaki son teknoloji bıçaklardan önemli ölçüde daha düşük bıçak ağırlıklarında mükemmel performans sağladığı gösterilmiştir.

Soltani ve arkadaşları (Soltani ve ark., 2016) yapmış oldukları çalışmada 660 kW rüzgar türbini kanadının bir bölümünün hem sabit hem de kararsız aerodinamik performansları üzerindeki serbest akım türbülans yoğunluğunun etkisini araştırmak için kapsamlı rüzgar tüneli testleri yapmışlardır.Testler, farklı Reynolds sayılarında pürüzlülük ve türbülans etkilerinin incelenmesini içermiştir.Testlerdeüç Reynolds sayısında (0,43, 0,85 ve 1,3 milyon)sabit ve kararsız bir koşul altında parametreler kullanılmıştır.Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün kesit aerodinamik verimini ve kaldırma katsayısını azalttığını, ancak tüm Reynolds sayıları için sürükleme katsayısını arttırdığını göstermiştir.Pürüzlülük uygulaması, üst yüzey basınç katsayısını azaltmıştır.Tünel türbülans yoğunluğunun arttırılması maksimum kaldırma katsayısının artmasına yol açmıştır.Türbülans yoğunluğu, kanadın tahmin edilen güç çıkışını etkilemiştir.

Ali ve arkadaşları (Ali ve ark.,2015) yapmış oldukları çalışmada güç üretim verimliliğini artırmak için farklı kanat ucu konfigürasyonlarına sahip Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin (HAWT) aerodinamik özelliklerini araştırmışlardır.Uçtaki akış davranışını anlamak ve uç girdabından kaynaklanan sürüklenmeyi azaltmak için, üç farklı kanat konfigürasyonu (rüzgar üstü kanatçık, rüzgar yönünde kanatçık ve kanatçıksız kanatçık) tasarlanmış, üretilmiş ve çeşitli rüzgar hızları ve sapma açıları altında test edilmiştir. Sonuç olarak rüzgara karşı kanatçıksız düz bir pala ile karşılaştırıldığında, rüzgara karşı kanatçık ile kaldırma-sürükleme oranında yaklaşık %26'lık bir artış gösterirken, rüzgar yönündeki kanatçık, kaldırma-sürükleme oranında yaklaşık %27'lik bir azalma olduğu ortaya çıkmıştır.

Hand ve arkadaşları (Hand ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada dikey eksenli rüzgar türbinlerinde aerodinamik verimliliğini etkileyen aerodinamik tasarım parametreleri üzerine tartışmışlardır.Sonuç olarak dikey eksenli rüzgar türbinlerinde iki kanatlı sistemin üç kanatlı türbin sistemine göre daha verimli olduğu açıklanmıştır.Dikey eksenli rüzgar türbinleri yüksek uç hızı oranlarında sürtünme kayıplarına karşı hassastırlar.Bundan dolayı bıçak payandaları aerodinamik profil kesiti özelliği göstermelidir.Bir akış artırma cihazının türbine uygulanması, daha yüksek aerodinamik verimlilik sağlamaktadır.

Erkan ve arkadaşları(Erkan ve ark., 2020)yapmış oldukları çalışmada bir rüzgar türbini kanat profili olan NACA 63-415 etrafındaki aerodinamik yükleri ve akış mekanizmasını incelemişlerdir.Sonuçta türbinlerdeki bıçakların yüzey pürüzlülüğü,hücum açısı,erozyon ve buzlanmanın verimi etkilediği doğrulanmıştır.Bundan dolayı genelde ticari olarak kullanılmakta olan NACA63-415 kanat profili bu çalışma için kullanılmıştır.Kaldırma kuvvetini ve kanat profiline tesir eden sürüklenme kuvvetini karakterize eden kaldırma katsayısı ve sürtünme katsayısı değişik Reynolds sayılarında farklı hücum açıları için incelenmiştir.Türbülanslı akışı simüle etmek için kesme gerilimi taşıma (SST-K) modeli kullanılmıştır.Kaldırma ve sürtünme katsayısının ikisi de hücum açısının artmasıyla artış göstermiştir.Fakat kritik hücum açısının 12 ve 15 derece arasında olmasından dolayı bu aralıktan sonra kaldırma katsayısında bir azalma meydana gelmiştir.

Shen ve arkadaşları (Shen ve ark., 2016) yapmış oldukları çalışmada küçük yatay eksenli rüzgar türbinleri sadece kiriş ve burulma açısının dağılımı bakımından değil aynı zamanda 3 boyutlu istifleme hattı ile optimize etmişlerdir. Çalışmada aerodinamik model olarak serbest iz modeli ile bir kaldırma yüzeyi yöntemi kullanılmıştır.Optimizasyon amacı olarak da yıllık enerji üretimi ve başlangıç performansı seçilmiştir.Sonuç olarak hem maksimum yıllık enerji üretimi (AEP)hedefinin hem de küçük rüzgar

türbinlerinin daha iyi başlangıç davranışının kanat geometrisi üzerinde doğrudan olarak bir tesire sahip olduğu gösterilmiştir.Maksimum yıllık enerji üretimi'ninkök kirişinin daha büyük olması,daha büyük koniklik ve daha küçük kök büküm açısı ile elde edilebildiği açıklanmıştır. Kök büküm açısının azalmasıyla daha küçük aerodinamik başlangıç mili torkuna yol açtığı ve daha kötü başlangıç davranışına sebep olduğu sonucuna varılmıştır.Bıçak boyunca daha kısa kiriş uzunluğunun bıçaklara düşük atalet momenti aktardığı açıklanmıştır.Büküm açının büyük olması düşük uç hız oranında yüksek torku meydana getirmiştir ve bıçağa daha iyi başlangıç performansı sağlamıştır.

Khalfallah ve arkadaşları (Khalfallah ve ark., 2007) yapmış oldukları çalışmada rüzgar türbinlerinin güç çıkışını iyileştirmek için çeşitli yöntemler ile deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir.Rotor dönüş hızının değiştirilmesinin yatay eksenli rüzgâr türbininin güç performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Rüzgâr türbini rotorunun aerodinamik performansında eğim açısının değişmesinden dolayı meydana gelen değişim, deneysel olarak araştırılmıştır.Ayrıca bıçak veya uç bıçak parçasının düşük basınçlı yüzeyi üzerine girdap üreteçleri konularak türbin kanat performansının iyileştiği gösterilmiştir.Çalışma sonucunda aerodinamik verimin (Cp), rüzgâr türbininin dönme rotor hızının (RPM) arttırılmasıyla iyileştiği açıklanmıştır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgârdan enerji elde edebilmek için rüzgâr türbinlerinden yararlanılmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için rüzgâr türbinlerinin veriminin arttırmasına yönelik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. İncelenen çalışmalar sonucunda verimi arttırabilmenin çeşitli yolları belirlenmiştir. Türbinlerdeki verimi arttırabilmeye yönelik yöntemler ve çözüm yolları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde güç izleme sistemi gibi bir takip sistemi ile sabit hızlı rüzgâr türbinlerinden daha verimli türbinlerdir.
- Rüzgâr türbinlerinde rüzgâr akışını hızlandıran difüzör sistemi kullanılabilir.Böylece küçük rüzgâr hızlarında bile verimlilik elde edebilme imkânı vardır.
- Jeneratör tipi türbin veriminde önemli bir yere sahiptir. Verimli bir türbin modeli için zıt dönüşlü jeneratör sistemi kullanılabilir. Bu jeneratör tipi normal jeneratör sistemlerine göre daha verimlidir.
- Kanat profili ve yapısı verimlilik bakımından türbin performansını etkileyen önemli bir parametredir. Yapılan çalışmalar sonucunda uzunluğu rüzgâr hızına göre değişebilen rüzgâr kanatları tasarlanmıştır. Kanat uzunluğunun değişmesi türbinin bulunduğu

ortama kendisini adapte etmesini ve maksimum güç almayı sağlayabilir.

- Türbinlere doğrudan tahrikli kalıcı mıknatısa sahip bir jeneratör adapte edilip verimin yükseltilmesi sağlanabilmektedir.
- Türbinlerde verimlilik açısından boyut önemli bir etkendir.Boyut arttırıldığı zaman anma gücünde de artış olmaktadır.Ayrıca eğer kanat maliyetinin düşürülmesi isteniyor ise ağırlık azaltılarak bir avantaj meydana gelebilir.
- Verim, rotor performansından etkilenmektedir. Rotor ise türbinin güç katsayısı ile ilişkilidir. Rotor kanadının performansını yükseltebilmek içintürbine engel kalkanı gibi ilave bir düzenek eklenebilir.
- Dişli sayısı ve kanat sayısı verimi etkileyen faktörlerdendir.Eğer dişli sayısı arttırılırsa türbinden önceki durumuna göre daha fazla verim alabilmek mümkün hale gelebilmektedir. Kanat sayısının arttırılması da verimi olumlu yönde etkileyen bir faktördür. Genelde yatay eksenli türbinler kullanılmaktadır ve kanat sayısı olarak bakılırsa üç kanatlı rüzgâr türbinleri tercih edilmektedir.
- Sürüklenme katsayısının kaldırma katsayısına olan oranı (CL/CD) kanat performansını etkileyen bir parametredir. Farklı kanat profillerinde aynı hücum açısında bu oran yani CL/CD oranı farklılık gösterebilmektedir.
- Rüzgâr hızı toleransı artarsa türbinin kapasite faktörü ve senelik enerji üretiminde artış olmaktadır.

KAYNAKÇA

1. Ali, A.,Chowdhury, H., Loganathan, B., Alam, F. (2015). An aerodynamicstudy of a domesticscalehorizontalaxiswindturbinewithvaried tip configurations. ProcediaEngineering, 105, 757-762.
2. Atmaca, Ö. (2017). Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin tasarımı ve denetimi (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi).
3. Aygen, U. A. (2019). Rüzgâr türbini kanatlarında türbülatör kullanımının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizi (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
4. Bozkurt, A. U. (2008). Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi (Doktora tezi, DEÜ Sosyal Bilimleri Enstitüsü).
5. Bilgili, M. Küçük Kapasiteli, Yatay Eksenli ve Akış Hızlandırıcılı Rüzgar Türbinlerinin Performans Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(1), 17-26.
6. Booker, J. D.,Mellor, P. H., Wrobel, R., Drury, D. (2010). A compact, highefficiencycontra-rotatinggeneratorsuitableforwindturbines in the urban environment. RenewableEnergy, 35(9), 2027-2033.
7. Buckney, N.,Pirrera, A., Green, S. D., Weaver, P. M. (2013). Structuralefficiency of a windturbineblade. Thin-WalledStructures, 67, 144-154.
8. Dilmaç, E. (2019). Naca 4415 rüzgâr türbini kanat profilinde firar kenarı etkisinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi).
9. Erkan, O., Özkan, M., Karakoç, T. H., Garrett, S. J., Thomas, P. J. (2020). Investigation of aerodynamicperformancecharacteristics of a wind-turbine-bladeprofileusingthefinite-volumemethod. Renewableenergy, 161, 1359-1367.
10. Eminoğlu, U. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini Sistemlerinin Çıkış (Güç) Karakteristiğinin Modellenmesi. https://www.emo.org.tr/ekler/462bff07f47cfd6_ek.pdf
11. Gençoğlu, M.U.M.T., Yıldırım, S. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri. https://www.emo.org.tr/ekler/fa1e107c6469daf_ek.pdf
12. Gültekin, Y. (2020). Profil değiştirilebilen rüzgâr türbin kanadı tasarımı (Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
13. Hand, B.,Kelly, G., Cashman, A. (2021). Aerodynamicdesignandperformanceparameters of a lift-typeverticalaxiswindturbine: A comprehensivereview. RenewableandSustainableEnergyReviews, 139, 110699.
14. Jackson, K. J.,Zuteck, M. V., Van Dam, C. P., Standish, K. J., Berry, D. (2005). Innovativedesignapproachesforlargewindturbineblades. WindEnergy:

An International JournalforProgressand Applications in WindPower Conversion Technology, 8(2), 141-171.
15. Johansen, J.,Madsen, H. A., Gaunaa, M., Bak, C., Sørensen, N. N. (2009). Design of a windturbine rotor formaximumaerodynamicefficiency. WindEnergy: An International JournalforProgressand Applications in WindPower Conversion Technology, 12(3), 261-273.
16. Keleş, D., Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, İ., Barış, B. O. R. U., Tufan, K.O.Ç. (2013). Bir rüzgar türbini tasarımı ve geliştirilmesi. Sakarya UniversityJournal of Science, 17(2), 207-216.
17. Kekezoğlu, B. (2013). Yeni bir rüzgar enerji üretim sisteminin optimal tasarımı, gerçeklenmesi ve performans iyileştirmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
18. Khalfallah, M. G.,Koliub, A. M. (2007). Suggestionsforimprovingwindturbinespowercurves. Desalination, 209(1-3), 221-229.
19. Kiranoudis, C. T.,Maroulis, Z. B. (1997). Effectiveshort-cutmodelling of wind park efficiency. RenewableEnergy, 11(4), 439-457.
20. Neagoe, M.,Saulescu, R., Jaliu, C., Neagoe, I. (2021). Dynamicanalysis of a single-rotor windturbinewithcounter-rotatingelectricgeneratorundervariablewindspeed. AppliedSciences, 11(19), 8834.
21. Njiri, J. G.,Söffker, D. (2016). State-of-the-art in windturbinecontrol: Trendsandchallenges. RenewableandSustainableEnergyReviews, 60, 377-393.
22. Ömeroğlu, Ö. (2012). Yatay eksenli rüzgâr türbini dizaynında kule boyu, çark çapı ve kanat profili seçiminin analizi ve Eskişehir ili için bir uygulama (Yüksek Lisans tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü).
23. Özdil Kaçan, Y. (2014). Derecelendirilmiş kompozit malzemeden rüzgar türbin kanadı tasarımı ve teknik bilgi paketi hazırlanması (Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
24. Pasupulati, S. V., Wallace, J., Dawson, M. (2005, June). Variablelengthbladeswindturbine. In IEEE PowerEngineeringSociety General Meeting, 2005 (pp. 2097-2100). IEEE.
25. Schubel, P. J.,Crossley, R. J. (2012). Windturbinebladedesign. Energies, 5(9), 3425-3449.
26. Saulescu, R.,Neagoe, M., Jaliu, C., Munteanu, O. (2021). A comparativeperformanceanalysis of counter-rotatingdual-rotor windturbineswithspeed-addingincreasers. Energies, 14(9), 2594.

27. Soltani, M. R.,Askari, F., Sadri, V. (2016). Roughnessandturbulenceeffects on theaerodynamicefficiency of a windturbinebladesection. ScientiaIranica. Transaction B, MechanicalEngineering, 23(3), 927.
28. Shen, X.,Yang, H., Chen, J., Zhu, X., Du, Z. (2016). Aerodynamicshapeoptimization of non-straightsmallwindturbineblades. Energy Conversion and Management, 119, 266-278.
29. Şenel, M. C., Erdem, K.O.Ç. (2015). Dünyada ve Türkiye'de rüzgar enerjisi durumu-Genel değerlendirme. Mühendis ve Makina, 56(663), 46-56.
30. Vitale, A. J.,Rossi, A. P. (2008). Computationalmethodforthedesign of windturbineblades. International journal of hydrogenenergy, 33(13), 3466-3470.
31. Ünal, A. (2021). Küçük delta tipi darrieus rüzgâr türbini verimine farklı düşey kanat açısı ve uç açıklıklarının etkisinin deneysel olarak araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi).
32. Yılmaz, İ., Ömer, Ç.A.M., Taştan, M., Karcı, A. (2016). Farklı rüzgar türbin kanat profillerinin aerodinamik performansının deneysel incelenmesi. Politeknik dergisi, 19(4), 577-584.
33. Zemamou, M.,Aggour, M., Toumi, A. (2017). Review of savoniuswindturbinedesignandperformance. EnergyProcedia, 141, 383-388.

TEKSTİL İŞLETMELERİNDE RİSK ANALİZİ UYGULAMALARI

Dr. Öğr. Üyesi Celal Güngör[1]
Pınar Coşkun[2]

[1]Orman Endüstri Mühendisliği,
Orman Fakültesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9882-6393

[2]İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı,
Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2969-5622

1. Giriş

Tekstil sektörü giyinme gibi birçok temel ihtiyacımızı karşılayacak ürünler üretmektedir. Tekstil ve hazır giyim sanayi imalat sanayi içerisinde istihdam, üretim ve ihracat bakımından önemli bir yere sahiptir. İplikten başlayarak yapılan üretim kapasitesinde, Türkiye'nin dünya ölçeğinde payı oldukça büyüktür. Türkiye İstatistik Kurumu'nun standart uluslararası ticaret sınıflaması verilerine göre (TÜİK, 2022) tekstil ürünleri (iplik, kumaş, yer kaplamaları, hazır eşya) (#65 SITC, Rev.4) 2021 yılında 15 milyar 177 milyon ile ülkenin tüm ihracatının %6,74'ünü gerçekleştirmiştir. Aynı yıl 6 milyar 448 milyon dolar ile ülkenin tüm ithalatının %2,38'ini oluşturmuştur.

Sosyal Sigortalar Kurumu (SGK) 4-1/a kapsamındaki iş yerleri ve zorunlu sigortalı istatistiklerine göre (*SGK*, 2021) Tekstil Ürünleri İmalatında (13 nolu NACE Faaliyet Grubu Rev.2 Sınıflandırmasına Göre) 2021 yılında 19.515 işyeri bulunmakta ve bu işyerlerinde toplam 499.596 sigortalı çalışmaktadır. Giyim Eşyaları İmalatında (14 nolu NACE Faaliyet Grubu Rev.2 Sınıflandırmasına Göre) ise aynı yılda 39.973 işyeri bulunmakta ve toplam 677.395 kişiye iş imkânı sağlamaktadır. Toplamda 60 bine yakın işyeri ve 1,2 milyon çalışanı ile tekstil ürünleri ve giyim eşyaları imalatı sektörleri ülke ekonomisinde önemli yer almaktadır. Ülkedeki tüm 4-1/a kapsamındaki iş yerlerinin%2,85'i ve zorunlu sigortalı sayısının %7,28'i tekstil ürünleri ve giyim eşyaları imalatı sektörlerindedir.

Tekstil ürünleri ve giyim eşyaları imalatı sektörlerinde çalışma ortam şartlarından kaynaklanan ve çalışan sağlığını ve güvenliğini olumsuz yönde etkileyen birçok risk etmeni bulunmaktadır. İş kazaları ve meslek hastalıklarına neden olabilen bu etkiler fiziksel, biyolojik, kimyasal, psikolojik ve ergonomik etmenler olarak sınıflandırılabilir. Bu tehlikelerinproaktif iş güvenliği yaklaşımı ile iş kazalarına veya meslek hastalıklarına dönüşmeden önce kontrol altına alınması gerekir. Proaktif iş güvenliği çalışmalarının en önemlisi risk değerlendirmeleridir. Risk değerlendirmeleri ile riskler/tehlikeler tespit edilebilmekte ve gerekli kontrol önlemleri alınabilmektedir.

2021 yılı SGK istatistiklerine göre(*SGK*, 2021), tekstil ürünleri (NACE kodu 13) imalatı yapan işyerlerinde toplamda 28.816 iş kazası gerçekleşmiş olup bunun 22.047'si erkek 6.769'u kadındır. İş kazaları sonucunda 28 erkek 4 kadın hayatını kaybetmiştir. Ayrıca aynı yılda 18'i erkek 9'u kadın olmak üzere toplamda 27 meslek hastalığı kaydedilmiştir. Giyim eşyaları imalatında (NACE kodu 14) ise toplamda 7.877 iş kazası gerçekleşmiş olup bunun 3.671'i erkek 4.206'sı kadındır. İş kazalarının 6'sıerkek 3'ü kadın olmak üzere 9'u ölümle sonuçlanmış. Ayrıca aynı yılda 8'i erkek 20'si kadın olmak üzere toplamda 28 meslek hastalığı kaydedilmiştir.

Tekstil ürünleri imalatı ve giyim eşyaları imalatı sektörlerini birlikte değerlendirdiğimizde yaklaşıkotuz yedi binin üzerinde iş kazası gerçekleştiğini görmekteyiz. Bu kadar çok iş kazasının görüldüğü sektörde iş sağlığı ve güvenliğini artırmak amaçlı çalışmaların gerekliliği açıktır.Bu kapsamda,bir tekstil firmasında, meydana gelebilecek iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önlemeye yönelik ayrıntılı risk değerlendirme yapılması bu çalışmanın amacıdır. Bu çalışmada Manisa Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir işyerinin imalat akışı incelenerek, tüm süreçleri kapsayan bir risk değerlendirmesi hazırlanmıştır.

2. Tekstil İşletmelerinde Tehlikeler

Tekstil sektörü geçmişten bugüne insanların giyinme ihtiyacını karşılamaktadır. Her geçen gün ortaya çıkan teknolojik yöntem ve yenilikler üretim hızlarını arttırmakta buna bağlı olarak da rekabeti güçlendirmektedir. Tekstil sektöründe en sık karşılaşılan iş sağlığı ve güvenliği tehlikeleri gürültü, titreşim, tozlar ve mekanik tehlikeler gibi fiziksel tehlikeler, boyalar ve kimyasal çözücüler gibi kimyasal tehlikeler ve çok sık karşılaşılan ergonomik tehlikelerdir.

a. Fiziksel Tehlikeler

Gürültü

Seslerin düzensiz bir biçimde üst üste gelmesi sonucunda gürültü ortaya çıkar. İşyerlerinde gürültü ölçümü yaparken özelliğine dikkat etmek gerekmektedir. İşe alımlar sırasında gerekli sağlık kontrolleri yapılmalı ve işitme kaybı olan çalışanların gürültülü iş alanlarında çalıştırılmalarından kaçınılmalıdır. Gürültü, insanlarda işitme kaybına (geçici veya kalıcı) neden olmaktadır. Gürültü ayrıca stres, yorgunluk, uykusuzluk ve sinir gibi pek çok psikolojik etkiye de sebep olabilmektedir. Gürültü, çalışanların işteki verimliliğini de etkilemektedir. Gürültülü işlerde ses yalıtımı ve ses titreşimlerini önleyici malzeme kullanılarak gürültü seviyesinin azaltılması sağlanabilir.

Çalışanların Gürültü ile ilgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmeliğe göre maruziyet sınırı 87 dB(A)'yı geçmemelidir(Gürültü Yönetmeliği, 2013). Yapılan bazı çalışmalarda (Konuklar, 2016; Öz, 2019; Özüm, 2014; Soylu &Gökkuş, 2016)maruziyet sınır değerinin aşıldığı kaydedilmiştir. Gürültünün önlenebilir olması için ilgili mevzuata uyulması veya çeşitli kontrol önlemleri alınması sonucunda kabul edilebilir seviyeye indirilmesi gerekmektedir(Sandıkçı et al., 2021).

Titreşim

Titreşimler, şiddeti ve frekansı olan dalgalar olarak tanımlanmaktadır. Titreşim frekansı hertz (Hz) ile gösterilmektedir. Titreşim insanlara farklı yollardan nüfuz edebilir. Örneğin titreşim ayaktaki bir insanın ayaklarından, sırtını dayanmışsa sırtından geçebilmektedir. Çalışma ortamlarında ise kullanılan alet ve makinelere göre değişiklik olmaktadır. Maden işleri, inşaat işleri, hava kompresörlü aletler, motorlu testere vb. kullanan çalışanlarda titreşim el ve kollara geçmektedir. Bu aletlerin frekansları genellikle 8−1.000 Hz arasında olmaktadır. Titreşim ile ilgili sorunlar tekstil sektöründe genellikle kesim ve dikim işlemi uygulayan çalışanlarda görülmektedir. Titreşim ile ilgili sorunların önüne geçmek için titreşimlerin analiz edilmesi ve makine tasarımının titreşim problemini önleyecek şekilde yapılması gerekmektedir(Yılmaz, 1989).

Tozlar

Tekstil sektöründe işyeri ortamından kaynaklanan tozlar, kumaş tozları, pamuk tozları, iplik tozları çok yaygındır. Tekstil sektöründe tozlardan kaynaklı iki farklı meslek hastalığına rastlanmaktadır. Bunlarbissinoz ve silikozistir. Bissinoz, tekstil sektöründe yaygın mesleki akciğer hastalığıdır. Genel olarak, keten, kenevir, kendir, pamuk gibi tozlara maruz kalınması sonucu oluşmaktadır. Diğer bir hastalık olan silikozisi ise, mineral tozun akciğerde birikmesi ve dokunun bu birikime verdiği reaksiyon olarak tanımlanır.

Tekstil işletmelerinde ortaya çıkan bu tozlar çalışan üzerinde fiziksel ve zihinsel yorgunluğa neden olur. Çalışanların yaptıkları işten yakınmalarına, çalışma performanslarını olumsuz yönde etkilenmesine ve buna bağlı olarak iş gücü kaybına neden olabilir (Kodaloğlu & Karakan Günaydın, 2021; Taşoluk, 2011). İşlemler sırasında ortaya çıkan tozun gerekli havalandırmalar ile ortama yayılmasını engellemek gerekmektedir. Çalışanların kişisel koruyucu donanımları kullanması sağlanmalıdır.Çalışanların periyodik sağlık kontrollerinin yapılması gerekmektedir. İşletmede doğal havalandırma ya da uygun havalandırma sistemlerinin kurulması gerekmektedir.

Mekanik Tehlikeler

Tekstil sektöründe kullanılan temel ekipmanlar, dikiş makinesi, overlok makinesi, fitil makinesi ve iğne, makas, zımba, buharlı ütü, kesim tezgâhları gibi doğrudan üretimi ilgilendiren ekipmanlar ile birlikte üretimi destekleyen diğer ekipmanlardır. Bu ekipmanlar ile çalışırken iş kazaları ortaya çıkmaktadır. Konfeksiyon işlerinde çalışanlar için önemli risklerden birisi parmak kopmasıdır. Bunun için gerekli kontrol önlemleri alınmalıdır ve gerektiğinde çelik örgü eldivenler gibi kişisel koruyucu donanımlar kullanılmalıdır.

b. Kimyasal Tehlikeler

Kimyasallar tekstil sektöründe sıklıkla karşılaşılan ve sağlık açısında önem arz eden tehlikelerdendir (Ay, 2014; Benli, 2022). Tekstil sektöründe hidrojen peroksit, bazlar (kostik soda), tuzlar, organik ve anorganik asitler, polivinil asetat ve hidrojen gibi çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Tekstil işletmelerinde genellikle boya terbiye işlemlerinde kimyasal madde kullanımı söz konusudur. Tehlikeli kimyasallardankaynaklanan tehlikelere karşı çeşitli önlemler önerilebilir. Örneğin, boya terbiye işlerinde en çok tercih edilen kimyasallar, asitler, boyar maddeler, bazlar ve çözücülerdir. Çözücüler genelde organik kimyasallar olarak adlandırılır. Bu kimyasal maddeler suda çözünmeyen gres ve yağ gibi diğer kimyasalları çözümleyebilme etkisine sahip olduğundan tekstil sektöründe tercih edilmektedir. Bu kimyasal çözücüler normal sıcaklık derecelerinde alev alma olasılığına sahiptir ve kolayca buharlaşabilir. Kimyasal çözücülerin buharlarının hava akımıyla hareket etmesi halinde uzakta olan bir ısı kaynağı tarafından bile alev alma olasılığı bulunmaktadır. Organik çözücülerin deri yolu ve solunum yolu ile vücuda girmesi mümkündür. Çözücülerin insan sağlığı üzerindeki etkisi, suda çözünürlüğüne ve buharlaşabilme oranına bağlıdır. Çözücülerin ortaya çıkardığı tehlike buharın havadaki yoğunlaşmasına bağlıdır. Yün boyamada asit boyar maddeler, polyester boyamada dispers boyar maddeler ve pamuklu boyamada reaktif boyar maddeler kullanılmaktadır. Boyar maddeler genellikle toz halindedir. Boyar maddeler çözeltiye ilave edilmektedir. Çalışanın bu kimyasal maddeleri solumaması için gerekli tedbirlerin alınması gerekir.

c. Ergonomik Tehlikeler

Ergonomi, çalışanlarınfiziksel ve bilişsel özelliklerini araştırarak, bu özelliklerine uyumlu işler tasarlamak için çalışan bir bilimdir. Ergonomi tüm sektörler için önemli bir kavramdır. Emek yoğun sektörlerde ise ergonomi daha çok önem kazanmaktadır. Örneğin tekstil sektöründe oturma gibi statik duruşlar altında çok uzun süreler için çalışma söz konusudur (Aksüt et al., 2021). Tekrarlı işlerin yapıldığı ve statik duruşun çok yoğun olduğu tekstil sektöründe sırt ağrısı, bel ağrısı, boyun ağrısı gibi kas ve iskelet sistemi rahatsızlıklarının oldukça sık olduğu bilinmektedir(Avcıbaşı & Dindar, 2022; Ay, 2014; Taşoluk, 2011). Sağlık yönünden avantajlarının yanı sıra çalışma koşullarının ergonomik analizlerinin yapılması ve sonrasında iyileştirilmesi işletmeye önemli bir verimlilik artışı sağlamaktadır(Demirkol Akyol, 2022).Bu çalışmanın amacı tekstil işletmelerinde risk analizi gerçekleştirerek ortaya çıkanriskleri/tehlikeleri kontrol altına almaktır.

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmanın amacı L Tipi Matris kullanılarak tekstil işletmelerinde bulunabilecek potansiyel tehlikelerin ve bunlara ilişkin risklerin belirlenmesi ve risklerin kontrol altına alınmasıdır. Bu çalışma için Manisa Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyetini sürdüren bir tekstil işletmesi seçilmiştir. Çalışan sayısının fazla oluşu, işlerinin çeşitliliği ve yoğunluğu nedenleri ile bu işletme tercih edilmiştir.

İşletmelerdeki risk değerlendirmeleri, güvensiz durumları (güvensiz olmayan çalışma ortamı, güvenli olmayan ekipmanlar, güvenli olmayan kişisel koruyucu donanımlar vb.), güvensiz davranışları (hatalı depolama, kişisel koruyucu donanımların kullanılmaması vb.) ve diğer etkenleri (doğal afetler, atık ve çevre yönetimi vb.) kapsayacak risk değerlendirme yöntemlerinden L Tipi Matris (5×5 Matris Diyagramı) yöntemi bu çalışmada tercih edilmiştir. Yöntemin yaygın olarak tekstil sektöründe kullanılıyor olması (Ay, 2014; Kabakulak, 2019; Karaman & Kayış Topaksu, 2020)ayrıca diğer bir sebeptir.

L Tipi Matris (5×5 Matris Diyagramı) Yöntemi

Bu yöntemde, tespit edilen her risk faktörü için risklerin gerçekleşme olasılığı ve riskin gerçekleşmesi halinde şiddet düzeyi yönünden değerlendirmeler yapılır ve puanlama yapılır. Yapılan değerlendirmeler sonrası olasılık (O) ve şiddet (Ş) puanlarının çarpımı ile risk puanı (R) elde edilir (Formül 1).

Risk Puanı = Olasılık Puanı × Şiddet Puanı (1)

Olasılık ve Şiddet puanlarının anlamları Tablo 1'de sunulmaktadır. Risk puanı 5 seviyeli olasılık ve 5 seviyeli şiddet puanlarının çarpılması ile 1'den 25 puana kadar değer alabilir. Risk puanlarının anlamları ise Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Olasılık ve Şiddet Puanları ve Anlamları

Olasılık		Şiddet	
Puan	Anlamı	Puan	Anlamı
1	Çok küçük olasılık	1	Çok hafif şiddet
2	Küçük olasılık	2	Hafif şiddet
3	Orta seviyede olasılık	3	Orta seviyede şiddet
4	Yüksek olasılık	4	Ciddi şiddet
5	Çok yüksek olasılık	5	Çok ciddi şiddet

Tablo 2. Risk Puanları ve Anlamları

Risk	
Puan aralığı	Anlamı
1–5	Kabul edilebilir risk
6–10	Orta seviyede risk
11–16	Önemli Risk
17–25	Çok önemli risk

4. Bulgular

Toplamda 37 adet risk değerlendirilmiştir. Riskler için risk puanları hesaplanmış ve kontrol altına alabilmek için gerekli tavsiyeler sunulmuştur. İşletmesinde gerçekleştirilen riskler değerlendirmesi bulguları sırası ile inceleyecek olursa; yaralanma, elektrik çarpması veya ölüm ile sonuçlanabilecek **donanımsız ve bakımsız elektrik panoları**riski 5 Şiddet ve 4 Olasılık puanı ile 20 risk puanı almış ve çok önemli risk olarak kabul edilmiştir. Panoda işlem yapan çalışanların kaçak akıma maruz kalmamaları için yalıtkan malzemeyle panolar kaplanmalı ve böylece çalışanların elektrik ile teması önlenmelidir. Ayrıca, elektrik panoların anahtarları ilgili mühendis ya da teknikerde olmalı, yetkilisi olmayan çalışanların elektrik panolarında işlem yapmamaları sağlanmalı, pano çevresi korkulukla çevrilmelidir.

Yaralanma, elektrik çarpması veya ölüm ile sonuçlanabilecek **elektrik ile çalışan cihazların kaçak akımına maruz kalma** riski 5 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 15 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Elektrik aletlerinin topraklamaları yapılmalı, iletkenlik ölçümlerinin yapılması sağlanmalı, fenni muayene raporunun hazırlanması sağlanmalıdır.

Ağır yaralanma veya ölüm ile sonuçlanabilecek **yıldırım düşme** riski 5 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 15 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. İş yerine paratoner kurulmalı, her yıl düzenli direnç ölçümleri yapılmalı, muayene raporları hazırlanmalıdır.

Ezilme veya boğulmaya neden olabilecek acil çıkıp kapılarındaki **kapılarda yığılma** riski 5 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 10 risk puanı almış ve orta seviyeli risk olarak değerlendirilmiştir. Düzenleyici ve önleyici faaliyetler olarak; kolayca tahliye edilebilmeyi sağlamak için acil çıkış kapıları dışa açılır olmalı, acil çıkış kapısının önü her zaman açıktutulmalı, acil çıkış yolları fosforlu ışıklı uyarı levhaları ile belirtilmeli ve çalışanlar için acil eylem planı hazırlanmalıdır.

Ağır yaralanma veya ölümle sonuçlanabilecek **yük asansörlerinin fazla yüklenmesi sonucu düşmesi** riski 5 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 10 risk puanı almış ve orta seviyeli risk olarak değerlendirilmiştir. Makina mühendisleri tarafından belirliperiyotlarla (üç ayda bir) gerekli kontroller yapılmalıdır.

Belirlenmiş kapasitenin üstünde yük taşınmamalıdır. Asansör sadece yük taşıma için kullanılmalıdır.

Çarpma ve yaralanmalara neden olabilecek **transpaletlerin güvenli kullanılmaması** riski 4 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 8 risk puanı almış ve orta seviyeli risk olarak değerlendirilmiştir. Unutulmaması gerekir ki transpaletler sadece tasarlandıkları iş için kullanılmalıdır ve başta lastikleri olmak üzere çeşitli aksamları periyodik olarak kontrol edilmelidir.

Ağır yaralanma veya ölümle sonuçlanabilecek **forkliftten düşme ve forklift çarpması** riski 5 Şiddet ve 4 Olasılık puanı ile 20 risk puanı almış ve çok önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Tüm forkliftlerde dikiz aynası ve sesli uyarıcılar bulunmalıdır. Operatörün görüşünü kısıtlayacak aşırı yüklenmeden kaçınılmalıdır. G–sınıfı ehliyete sahip operatörler işlendirilmelidir. Forklift insan taşıması için uygun değildir, bu nedenle çatallarında veya gövdesinden çalışanların binmesine/oturmasına izin verilmemelidir. Ayrıca forkliftlerin fenni muayenelerinin yapılması sağlanmalıdır.

Ağır yaralanma veya ölümle sonuçlanabilecek **istif makinesi üzerinden düşme** riski 5 Şiddet ve 4 Olasılık puanı ile 20 risk puanı almış ve çok önemli risk olarak değerlendirilmiştir. İstif makinesini kullanan çalışanın görüşünü kısıtlayacak yüklemelerden kaçınılmalıdır. Çalışanların istif makinesi ile kaldırılan paletlere binmesi önlenmelidir. Fenni muayenelerinin yapılması sağlanmalıdır.

El ve parmak kesilmelerine neden olabilecek sabit veya seyyar kumaş kesim makinelerinin **bıçaklarının korumalığının olmayışı** riski 4 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 12 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Makinelerde koruyucular bulundurulmalıdır. Bıçaklı alanlar ile teması engelleyebilmek için gerekli kontrol önlemleri alınmalıdır. Kumaş kesim alanında hızar motoru veya kesme motoru uzuv kaybına neden olabileceği için (5 Şiddet ve 5 Olasılık puanı ile 25 risk puanı) gerekli mühendislik kontrolleri alınmalı ayrıca kesim motoru ve hızar kullanımında çalışanlar çelik eldiven kullanmalıdır.

Elektrik çarpması ve ağır yaralanmalara neden olabilecek overlok ve dikiş makinaları gibi çeşitli **korumasız makinaların olması** riski 5 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 10 risk puanı almış ve orta seviyede risk olarak değerlendirilmiştir. Korumasız makinelerde koruyucular bulundurulmalıdır. Çalışanlar ellerinin sıkışmasını engelleyebilmek için önlemler alınmalıdır. Diğer önlemler alınamadığı durumda parmak koruyucu gibi kişisel koruyucu donanımlar kullanılmalıdır. Elektrik kaçağına karşı dikkatli olunmalıdır.

Hallaç ve harman bölümünde hidrolik **mekaniklerinin sıkıştırma** riski (3 Şiddet 5 Olasılık ile 15 risk puanı) uzuv veya kafa sıkışması, uzuv kaybı, ölüm

gibi sonuçlara yol açabilmektedir. Bunun için telef preslerinin kapaklarında kapak anahtar düğmesi bulundurulmalıdır. Aynı şekilde fitil makinesinde hidrolik hareketler mekanizma hareketleri sonucu (4 Şiddet 4 Olasılık ile 16 risk puanı) veya büküm makinesinde hidrolik silindirlere iplik sıkışması (5 Şiddet 4 Olasılık ile 20 risk puanı) sonucu parmak kopmaları ve yaralanmalar olabilir. Makinelerin bakım-onarımı ve temizliği makineler kapalı iken yapılmalıdır. Büküm makinesinde hidrolik silindirlere dolanma riski (5 Şiddet 5 Olasılık ile 25 risk puanı) saç, kolye, eşarp sıkışmasına, kafa yaralanmalarına neden olabilmektedir. Bone takılması ve kolye gibi takıların kullanımına izin verilmemesi gerekir. Dikim bölümünde hidrolik silindirler (4 Şiddet 3 Olasılık ile 12 risk puanı) parmak sıkışmasına neden olabilir. Dikiş makinelerinde çalışanların parmak koruyucu takmaları sağlanmalıdır.

Örme bölümünde hidrolik mekanizma etrafında kumaş topunun dönmesi (4 Şiddet 4 Olasılık ile 16 risk puanı) çarpmaya neden olabilmekte ve bunun için örme makinelerinin kapaklarının açılınca durmasını sağlayan otomatik durdurucular kullanılmalıdır. Tarağın ileri geri hareketi düz dokumada (4 Şiddet 3 Olasılık ile 12 risk puanı) ve jakarlı dokumada (4 Şiddet 5 Olasılık ile 20 risk puanı) çarpma sonucu yaralanmaya neden olabilir. Tarağın hareket alanına fotosel yerleştirilmesi sağlanmalıdır.

Boya, terbiye işlemlerinde hidrolik silindirler kaynaklı **hareketli kısımların bulunması** riski 5Şiddet ve 5 Olasılık puanı ile 25 risk puanı almış ve çok önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Hareketli aksamlar için koruyucuların monte edilmesi gerekir. Aynı şekilde kumaş serme bölümünde serim makinelerinin mekanik hareketleri (5 Şiddet 2 Olasılık ile 10 risk puanı) çarpmalara neden olabilmektedir. Bunun için serim makinesi kenarlarına çarpma sensörleri takılmalıdır.

Sivri uçlu ve kesici el aletleri ile çalışma kesik ve yaralanmalar ile sonuçlanabilir (3 Şiddet 3 Olasılık ile 9 risk puanı). Bu nedenle el aletlerinin güvenli kullanımı hakkında gerekli eğitimler çalışanlara verilmeli güvensiz bir şekilde kesici ve delici el aletleri ile çalışmalarına izin verilmemelidir.

Jakarlı dokuma alanında **yüksek platformlarda çalışma** (4 Şiddet 5 Olasılık ile 20 risk puanı) düşme ve ağır yaralanmalara neden olabilir. Bu kazaları önleyebilmek için makinelerin platform kenarlarına ve boşluklarına korkuluklar yapılmalıdır. Bunun haricinde, istif alanlarında uygun olmayan istiflerden düşmeler meydana gelebilir (5 Şiddet 2 Olasılık ile 10 risk puanı). İstif alanlarının etrafında korkuluklar olmalıdır ve uygun uyarı levhaları yerleştirilmelidir.

Kayma-düşme sonucu yaralanma veya ölümle sonuçlanabilecek **kaygan ve ıslak zemin bulunması** riski 5 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 15 risk puanı almış

ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. İş yerinde merdivenlere kaymaz bantlar yapıştırılmalı, merdiven korkuluklarının olmasına dikkat edilmeli, merdivenlertemizlendiklerindedurum hakkında bilgi verecek uyarı levhası konulmalıdır.

Meslek hastalıkları ve alerji oluşturabilecek **kumaş tozlarının çalışanlar tarafından solunması** riski 4 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 12 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. İş yerinde hava emiş sistemleri oluşturulmalı, kumaş tozlarından korunmaları için çalışanlara toz maskeleri verilmeli, sağlık sorunu olan çalışanların farklı bölümlerde çalıştırılması sağlanmalıdır.

Kimyasalların deri ve göz ile teması riski 4 Şiddet ve 4 Olasılık puanı ile 16 risk puanı almış ve çok önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Mesleki hastalıklara veya yaralanmalara neden olabilecek kimyasallar ile çalışılırken dikkatli olunmalı, kimyasallar güvenli bir şekilde depo edilmeli, malzeme bilgi formları uygun şekillerde çalışanlara sunulmalıdır.

Yaralanma veya ölüm ile sonuçlanabilecek ilk yardım dolabında **ilk yardım malzemelerinin yetersizliği** riski 5 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 10 risk puanı almış ve orta seviyede risk olarak değerlendirilmiştir. İş sağlığı ve güvenliği tüzüğünde belirtilmiş ilk yardım malzemelerinin ilk yardım dolabında bulundurulması sağlanmalıdır.

Yaralanma veya ölüm ile sonuçlanabilecek ilk yardım eğitimi eksikliği kaynaklı **ilk yardım eğitimi almış kişilerin bulunmaması** riski 5 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 10 risk puanı almış ve orta seviyede risk olarak değerlendirilmiştir. İş yerinde her bölüm için bir ilk yardım eğitimi almış çalışanın bulundurulması sağlanmalı ve gerektiğinde o çalışan tarafından ilk yardımın yapılması sağlanmalıdır.

Yanma, panik, izdiham, yaralanma veya ölüm ile sonuçlanabilecek **seyyar yangın söndürücülerin ihtiyaç anında çalışmaması** riski 5 Şiddet ve 3 Olasılık puanı 15 risk puanı almış ve önemli risk olarak kabul edilmiştir. İşyerinin bazı bölümlerine yangın söndürücü ekipmanların konulması, bu cihazlar tüm çalışanları tarafından kullanılabiliyor olması, çalışanlara bununla ilgili çeşitli periyotlarda eğitimler verilmesi, bu cihazların çalışıp çalışmadıklarının belirli periyotlarda (altı aylık) kontrol edilmesi/tartılması, yılda bir boşaltılıp tekrar doldurulması ve iş yerinin bazı bölümlerine alarm yerleştirilmesi bazı düzeltici ve önleyici faaliyetler olarak sıralanabilir.

Yanma, panik, izdiham, yaralanma veya ölüm ile sonuçlanabilecek malzemeler, koliler veya kumaş rulolar ile **acil durum kaçış yollarında kaçışı engelleyecek istiflerin yapılması** riski 4 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 12 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Acil durum kaçış yolları

ve kapılarının önüne istif yapılmamalıdır. Sadece belirlenen alanlarda istiflemeler yapılmalıdır. Düzenli kontrol ve denetim sağlanmalıdır. İstiflenen malzemelerin aydınlatmayı da engellediği unutulmamalıdır.

Yanma, panik, izdiham, yaralanma veya ölüm ile sonuçlanabilecek tatbikat eksikliğinden kaynaklı **acil durumlarda telaşa/paniğe kapılma** riski 5 Şiddet ve 2 Olasılık puanı ile 10 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Çalışanlara yönetmeliklerde belirtildiği şekilde düzenli olarakacil durum eylem planına uygun olarak tahliye ve diğer tatbikatlar yaptırılmalıdır. Acil durum toplanma bölgeleri belirlenmelidir. Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde bulunan işletmelerde acil durum planlamasında deprem konusu özel olarak işlenmelidir. Tatbikatların yetersiz olması deprem anında panik ve telaşa kapılmaya neden olabilmektedir.

Yaralanmalar, meslek hastalıkları veya ölümlere neden olabilecek **kişisel koruyucu donanımların eksikliği** riski 4 Şiddet ve 3 Olasılık puanı ile 12 risk puanı almış ve önemli risk olarak kabul edilmiştir. Çalışanlara uygun kişisel koruyucu donanımlar sağlanmalıdır. Kesimhanede çalışanlar için çelik eldiven temin edilmelidir. Kumaş alanlarında çalışanlara maske verilmelidir. Dikiş-nakış alanlarında çalışanlara parmak koruyucular verilmelidir. Kimyasal ile çalışan kişilere maske, gözlük ve önlük verilmelidir. Ayrıca depo çalışanlarına baret verilmelidir.

Göz bozukluklarına neden olabilecek kalite kontrol işlemleri ve **ekranlı araçlarla uzun süre çalışma** riski 4 Şiddet ve 2 Olasılık puanı 8 risk puanı almış ve orta seviyede risk olarak değerlendirilmiştir. Ekranlı araçlarda uzun süre çalışmayı azaltabilmek için dönüşümlü olarak çalışılma tavsiye edilmeli, düzenli olarak dinlenme araları sağlanmalı, ekranlı araçlarla çalışanların düzenli göz muayenelerinin yapılması ihmal edilmemelidir. Ayrıca postür bozukluğuna sebep olabilecek çalışma ortam şartları ofis çalışmalarına uygun olarak tasarlanmalıdır.

Özellikle dikim ve kesim makinalarından kaynaklı ve geçici veya kalıcı işitme sorunlarına, meslek hastalıklarına neden olabilecek **gürültü düzeyinin yüksek olması** riski 4 Şiddet ve 4 Olasılık puanı ile 16 risk puanı almış ve önemli risk olarak değerlendirilmiştir. Gürültü ölçümlerin yapılması sağlanmalı ve çalışanların sağlık muayeneleri aksatılmamalıdır.

Performans düşüklüğü, düşme, baş ağrısı ve çeşitli iş kazalarına neden olabilecek **uygun olmayan aydınlatma** riski 3 Şiddet ve 3 Olasılık puanı 9 risk puanı almış ve orta seviyede risk olarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanlarında ve merdiven gibi geçiş yollarında yeterli aydınlatma yapılmalıdır. Düşük ve yüksek aydınlatmalardan kaçınılmalı, gölgeli veya ışıldayan alanlar için uygun

kontrol önlemleri alınmalıdır. Ayrıca periyodik olarak aydınlatma ekipmanları yenilenmeli ve bakım-onarımı yapılmalıdır.

Zehirlenmelere neden olabilecek **bozulmuş gıda veya hijyenik olmayan ortama maruz kalma** riski 3 Şiddet ve 2 Olasılık puanı 6 risk puanı almış ve orta seviyede risk olarak değerlendirilmiştir. Yiyecek ve içecek sağlayıcı çalışanların belli periyotlarda sağlık gözetimi yapılması gerekir. Çalışanların yemekten önce ve sonra ellerini yıkamaları için uygun lavaboların bulunması gerekir. Temas yüzeylerinin düzenli olarak deterjan ile temizlenmesi sağlanmalıdır. Bozulmamış, sağlıklı ve kaliteli gıdalar temin edilmeli, uygun koşullarda muhafaza edilmeli, hazırlanmalı ve servis edilmelidir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada Manisa Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyetini sürdüren bir tekstil firmasında bulunan çeşitli alanlar, bölümler, faaliyetler, makineler, çalışanlar ve işler için risk değerlendirmeleri yapılmıştır. Analizler kapsamında 37 tehlike incelenmiş ve risk kategorilerine göre 20–25 puan çok önemli risk kategorisinde 9 tehlike, 12–16 puan önemli risk kategorisinde 15 tehlike ve 6–10 puan orta seviyede risk kategorisinde 13 tehlike gözlenmiştir. Çok önemli tehlikeler; elektrik panosu, forklift, istif makinesi, büküm makinesi, jakarlı dokuma, boya, terbiye işlemleri, kumaş kesim bölüm ve faaliyetlerinde gözlenmiştir. Elektrik panolarının bakımsız ve donanımlarının yetersiz olması önemli tehlikelere örnek olarak verilebilir. Elektrik mühendisi ve teknikerinin sorumluluğunda panoların yalıtkan malzeme ile kaplanması gerekir. Panoların kapaklarının kapalı ve kilitli olması gerekir. İstif çalışanların görüş mesafesini olumsuz etkileyecek düzeyde olmamalı, yükün transfer edilmesi halinde çatalların yerden en çok 10–15 cm yükseklikte veya yükün imkan verdiği en alt seviyede tutulmalıdır, yüksek alanlardaki çalışmalar için sabit veya seyyar olmak üzere uygun ve korkuluklu iskele gibi bir platform temin edilmeli, istif makinesinin çatal kısmına takılan paletlere binilmesinin önüne geçilmeli ve yüksek alanlarda bu biçimde çalışma yapılmasına izin verilmemeli, üçer aylık zaman dilimleri halinde teknik konuda yetkili olan bir çalışana makinenin düzenli olarak fenni muayenesi yaptırılmalı, ilgili muayenenin raporu alınmalı, herhangi bir nedenle muayene ihmal edilmemeli ve tüm raporlar işyerindeki özel dosyalarında saklanmalıdır. Büküm makinaları iplik sarıkları kapalı iken ilgili mühendis tarafından temizlenmesi gerekir. Kumaş kesim makinalarında kesim motoru ve hızar kullanımında çelik eldiven kullanılması gerekir. Hareketli aksamalara karşı yeterli tedbirlerin alınması gerekir.

Bu çalışmada, işyerinde düzenleyici ve önleyici faaliyetlerin bir an önce uygulanmaya geçmesi gerektiği ortaya konmaktadır. Çalışanların iş sağlığı ve

güvenliği eğitimlerinin daha etkin ve verimli hale getirilmesi gerekir. Ayrıca çalışanlara kişisel koruyucu donanımlar sağlanmalı ve kullanımı için gereken eğitimler verilmelidir. İşyeri içerisinde uygun sağlık güvenlik işaretleri uygulamaları yapılması gerekmektedir. Çalışanların işaretlerin anlamı ve gereklilikleri hakkında eğitilmesi gerekir.

Sonuç olarak, eğer düzenleyici ve önleyici faaliyetler uygulanırsa mevcut riskler daha düşük düzeyegerileyebileceği tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Tezsiz Yüksek Lisans Bölümü Bitirme Projesikapsamında yapılmıştır. Çalışmaya doğrudan veya dolaylı olarak katkısı olan bölüm öğretim üyelerine ve Fen Bilimleri Enstitüsü yönetici ve çalışanlarına çok teşekkür ederiz. Çalışmayı yapabilmemiz için bizlere kapılarını açan işletmeye ayrıcaşükranlarımızı sunarız.

REFERANSLAR

1. Aksüt, G., Eren, T., & Tüfekçi, M. (2021). Tekstil Sektör Çalışanlarının Maruz Kaldığı Ergonomik Risklerin Analitik Ağ Süreci ile Değerlendirilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, *13*(1), 231–242.
2. Avcıbaşı, İ. M.,& Dindar, İ. (2022). Relationship between Working Posture and Work Injuries in a Clothing Factory Workers in Edirne. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, *6*(2), 87–96.
3. Ay, S. (2014). *İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Kot Üretimi Yapan Bir İşletmede Risk Değerlendirme Uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Yeni Yüzyıl Üniversitesi.
4. Benli, H. (2022). İndigo Boya Tozunun Denim Fabrikası Çalışan Sağlığı Üzerine Etkisi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, *6*(2), 97–105.
5. Demirkol Akyol, Ş. (2022). Bir Tekstil İşletmesinde Ergonomik Risk Değerlendirme Uygulaması. *Ergonomi (Online)*, *5*(2), 72–83.
6. Gürültü Yönetmeliği. (2013). *Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik* (No. 28721).
7. Kabakulak, T. (2019). Bir Tekstil İşletmesinde Risk Değerlendirme Uygulaması: 5×5 Matris ve HAZOP. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, *3*(2), 97–111.
8. Karaman, T.,& Kayış Topaksu, A. (2020). Tekstil İşletmesinde İş Güvenliği Açısından Ortam Ölçümlerinin ve L-Tipi Matris Metodu ile Risk Değerlendirmesinin Yapılması. *Çukurova Üniverstiesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *39*(2), 62–69.
9. Kodaloğlu, M.,& Karakan Günaydın, G. (2021). Çözgülü Örme İşletmesinde Toz Maruziyet Ölçümlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi. *International Journal of Engineering and Innovative Research*, *3*(1), 1–11.
10. Konuklar, B. (2016). *Dokuma Fabrikalarında Çalışanların Gürültü Maruziyetlerinin İncelenmesi* [Uzmanlık Tezi]. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
11. Öz, İ. O. (2019). *Tekstil Sektöründe Termal Konfor, Aydınlatma, Gürültü Ölçümleri ve Alınacak Önlemlerin Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Uşak Üniversitesi.
12. Özüm, F. S. (2014). *Kumaş Boyama ve Apre Sanayisinde İş Güvenliği Önlemleri ve Risk Değerlendirmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Namık Kemal Üniversitesi.

13. Sandıkçı, M. C., Yurtsever, Ö., & Uçan, R. (2021). Aydınlatma, Termal Konfor, Kişisel Gürültü Ölçümleri: Tekstil Fabrikaları Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *26*(1), 171–186.
14. *SGK* (SGK İstatistik Yıllıkları). (2021).
15. Soylu, M.,& Gökkuş, Ö. (2016). Endüstriyel Kaynaklı Gürültü Kirliliğinin Araştırılması ve Bir Tekstil Fabrikasında Uygulama Örneği. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, *32*(2).
16. Taşoluk, A. (2011). *Hazır Giyim Üretiminde Meslek Hastalıkları, Yorgunluk ve İş Kazaları Risk Faktörlerinin Değerlendirilmesi: Örnek Bir Uygulama* [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi.
17. TÜİK. (2022). *Dış Ticaret İstatistikleri, Ocak 2022*.
18. Yılmaz, Y. (1989). Tekstil Makinalarında Titreşim Absorberi. *Tekstil ve Mühendis*, *3*(18), 258–263.

ISM BANDI UYGULAMALARI İÇİN GENİŞ-BANT TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Dr. Öğretim Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN[1]
Araştırma Görevlisi Cem GÜLER[2]

[1]Kırklareli ÜNİVERSİTESİ / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Kırklareli / TÜRKİYE
ORCID: 0000-0001-8309-3393
[2]Kırklareli ÜNİVERSİTESİ / Lüleburgaz Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi / Uçak bakım ve Onarım Bölümü / Kırklareli / TÜRKİYE.
ORCID: 0000-0002-6631-7559

GİRİŞ

Son yıllarda haberleşme teknolojilerinin gelişimine paralel olarak, günlük hayatımızı kolaylaştıran, birbiriyle iletişime geçerek veri transferinde bulunabilen elektronik cihazların nitelikleri, nicelikleri ve kullandıkları kablosuz ağ sistemleri giderek gelişmekte değişmekte ve farklı alanlarda kendine yer bulmaktadır (Anguera, Andújar, Huynh, &Orlenius, 2013 ; Mahmood et al., 2020. ISM 2,45 GHz bandı (Endüstriyel, Bilimsel ve Tıp), ITU (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği) tarafından dünya çapında kabul edilen bir banttır (International TelecommunicationsUnion-Radio Communications, (ITUR), RadioRegulations, n.d). ISM bandına ve diğer ticari uygulamalarda kullanıma uygun anten tasarımlarına dayalı çok sayıda araştırma makalesi yayınlanmaktadır (Al-Yasir et al., 2020; Rahman, Shaikat, Iqbal, & Hassan, 2013 ; Pachigolla, Dab, Chatterjee, &Kundu, 2018). Bu anten tasarımları, ISM bandında çalışan ancak alt tabaka malzemesi tekstil olmayan antenlerdir. ISM bandında çalışan tekstil antenlerin dezavantajı ise dar bant genişliğine sahip olmalarıdır.

Kablosuz ağ sistemlerinin en özel hali olan kablosuz vücut alan ağları (WBAN-Wireless Body Area Network) ve yeni nesil giyilebilir akıllı tekstil uygulamaları, bir kişinin sağlık durumu hakkında sürekli bilgi sağlamak için kullanıcının fizyolojik verileri izleme ve bu verileri çevre ile kablosuz iletişim kurarak aktarma yeteneğine sahip olmaktadır (Pandey, Dutta, &SekharBanerjee, 2019; Hayajneh, Almashaqbeh, Ullah, &Vasilakos, 2014). Sağlık uygulamalarının yanısıra biyomedikal, spor, moda, eğlence, askeri ve güvenlik alanlarında uygulama alanına sahip olan tekstil üzerine oluşturulan elektronik yapıların (e-tekstil) avantajları düşük maliyet, hafiflik ve kullanım ömrü gibi avantajları beraberinde getirmektedir (Choudhry, Arnold, Rasheed, Khan, &Wang, 2021 ; Kan& Lam, 2021). Elektronik yapıların tekstil malzeme üzerine oluşturulmasıyla asıl haberleşmeyi sağlayan donanım olarak kullanılan antenlerin ise giyilebilir olması, sert (katı, esnek olmayan, kolay entegre edilemeyen) anten yapılarına kıyasla hafif, düşük maliyetli olmakla beraber tekstil elektroniğine kolay entegre edilmesi gerekmektedir (Roh, Chi, &Kang, 2010 ; Rais et al., 2009 ; Dierck, Declercq, &Rogier, 2011; Jain&Dhaliwal, 2022). Giyilebilir tekstil antenler canlı vücudunun bilek (Ha, Jung, Kim, &Jung, 2012), kol (Hu, Gao, He, Cong, &Zhao, 2016), gövde (Zhang, Wang, &Volakis, 2012), göğüs (Varma et al., 2021) gibi herhangi yerinde olabilmektedir. Vücut yüzeyine esnek bir şekilde yerleştirilebilen anten tasarımları alt tabaka olarak polyester (Roshni, Jayakrishnan, Mohanan, &Surendran, 2017), ipek (Magdalena et al., 2021), pamuk (Kavitha&Swaminathan, 2019), keçe (Mantash, Tarot, Collardey, &Mahdjoubi, 2012) ve kot (Wang&Li, 2018 ;

Purohit&Raval, 2014 ; Rizwan, Rahmat-Samii, &Ukkonen, 2015) gibi farklı tipte tekstil alt tabaka malzemeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada kolay ulaşılabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları sebebiyle dielektrik sabiti 1,7 ve kalınlığı 1 mm olan kot malzeme tercih edilmektedir. Mikroşerit antenler, dikdörtgen (Armağan, 2022) , dairesel (Güngörer, Kayabaşi, & Tekbaş, 2019), eliptik (Kurt & Kaya, 2022), üçgen (Song, Jiao, Zhao, &Zhang, 2007) gibi farklı şekil ve konfigürasyonlarda kullanılarak özel uygulamalar için geliştirilmektedir. Bu çalışmada, yama boyutu hesaplamasının kolay olduğu dikdörtgen yama kullanılmaktadır (Balanis, 2016). Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında;

2017 yılında yapılan bir çalışmada CPW besleme ile beslenen anten tasarımında 1,7 dielektrik sabiti değerine ve 0,7 mm yüksekliğe sahip olan 30×30 mm boyutlarında anten tasarımı sunulmaktadır. 2,18 GHz ile 2,78 GHz frekansları arasında 600 MHz'lik bir bant genişliği değerine ve 3,03 dBi yönlülük kazanç değeri elde edilmektedir (Muhammad et al., 2017).

2018 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise 2,4 GHz ISM bandında çalışan E şekline sahip anten sunulmaktadır. Tasarımı yapılan anten 2,26 GHz ile 2,59 GHz frekansları arasında 360 MHz bant genişliği değerine 2,05 dBi yönlülük kazancına sahip olmaktadır (Ashyap et al., 2018).

2019 yılında yapılan bir çalışma da 3 farklı alt tabaka üzerinde, dielektrik sabiti 1,78 ve yüksekliği 0,6 mm olan kot tabaka, dielektrik sabiti 1,79 ve yüksekliği 1,1 mm olan deri, dielektrik sabiti 1,1 ve tabaka yüksekliği ise 0,5 mm olan korduramalzeme kullanılarak tasarlanan antene ait sonuçlar sunulmaktadır. Dielektrik tabakanın yüzey alanı ise 16×35mm olarak sabit tutulmaktadır. 2,4-2,5 GHz frekansları arasında üç farklı malzemeye göre boyutlarını optimize edildiği çalışmada üç malzeme için ortalama bant genişliği değeri 0,18 GHz olarak elde edilmektedir. Elde edilen anten yönlülük kazanç değeri ise sırasıyla kot, deri ve kordura malzeme için 2,104 dBi, 2,106 dBi, 2,114 dBi olarak verilmektedir (Rashid, Rahman, Paul, & Sarkar, 2019).

Yapılan bir diğer çalışmada, giyilebilir tekstil uygulamaları için yeni bir eş-düzlemsel dalga kılavuzu beslemeli anten tasarımı sunulmaktadır. Tasarımı yapılan anten 90×70×1,57 mm^3dielektrik sabiti 1,6 olan kot bir alt tabaka üzerine oluşturulmaktadır. Önerilen anten, -19 dB'lik bir geri dönüş kaybıyla 2,45 GHz'de merkez rezonans frekansına sahip olmaktadır. 2,1 GHz ile 2,6 GHz frekansları arasında 500 MHz'lik bant genişliği değeri ve 2 dBi yönlülük kazancı elde edilmektedir (Kumar &Shanmuganantham, 2018).

Yapılan bir diğer çalışmada kot malzeme üzerine 32×30×2 mm^3 boyutlarına sahip E şeklinde ve CPW ile beslenen bir anten tasarımı sunulmaktadır. 2,03 dBi yönlülük kazancı sahip olan anten tasarımı 2,37 GHz – 2,52 GHz

frekansları arasında 153 MHz bant genişliği değeri sunmaktadır (Balaji&Narmadha, 2021).

2020 yılında yapılan bir çalışmada, anten dielektrik tabaka boyutları 38×30 mm sabit tutularak pamuk, kot, polar, FR-4, ve polyester gibi farklı malzemeler üzerinde ISM bandı için deneme çalışmaları yapılmaktadır. Kısmi toprak düzlemi kullanılan anten tasarımında sırasıyla pamuk için 2,45 GHz merkez rezonans frekansında 250 MHz bant genişliği 2,02 dBi yönlülük kazanç değeri, 2,5 GHz merkez frekansında kot malzeme için 590 MHz bant genişliği ve 1,97 dBi anten yönlülük kazanç değeri, polar malzeme kullanımı ile merkez rezonans frekansı 2,58 GHz frekansında 440 MHz bant genişliği değerine ve 2,38 dBi yönlülük kazanç değerine ulaşılmaktadır. FR-4 malzeme için rezonans frekansı 2,41 GHz, bant genişliği değeri 280 MHz, yönlülük kazanç değeri ise 2,11 dBi olarak elde edilmektedir. polyester malzeme için rezonans frekans değeri 2,49 GHz merkez frekansında 310 MHz olmakla birlikte yönlülük kazanç değeri ise 2,21 dBi olarak elde edilmektedir. Tüm dielektrik alt tabaka malzemelerinin karşılaştırılması sonucunda en yüksek bant genişliği değeri kot malzeme kullanıldığında, en yüksek kazanç değeri ise polar malzeme kullanıldığında elde edilmektedir (Bajaj, Singh Saini, &Kamal, n.d.).

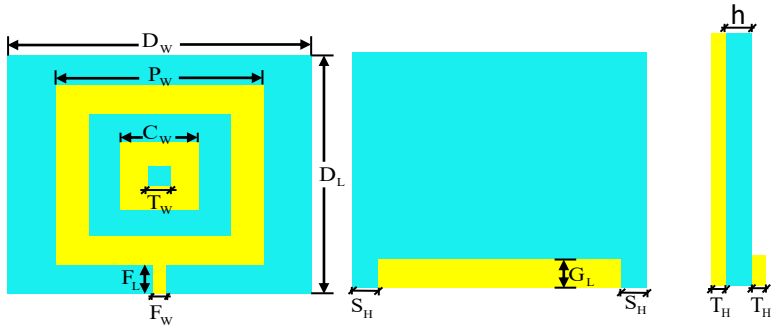
Literatürde çalışılan tekstil antenlerin bant genişliği değerlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Anten performansını iyileştirmek için en çok kullanılan ve en basit yöntemlerden biri, antenin yama düzleminde veya yer düzleminde kasıtlı olarak kusurlu bir zemin yapısı (DGS) veya kısmı toprak düzlemi oluşturmaktır (Khandelwal, Kanaujia, & Kumar, 2017). Toprak düzleminde oluşturulan toprak düzlemi boyunca elektromanyetik yayılma, kusurun şekline, kısmi düzlemin yüksekliğine ve boyutuna bağlı olarak yüzey akımlarının dağılımını değiştirir, bu da sonuçta yayılan yamanın kapasitif ve endüktif yanıtını değiştirir ve rezonans frekansı, bant genişliği ve geri dönüş kaybı gibi değişkenleri kontrol etmemize olanak sağlamaktadır (Qian, Chen, &Kishk, 2021). Bu çalışmada geniş bant genişliği değeri sunmak, toprak düzleminde ise kısmi toprak düzlemi tercih edilmektedir.

Bu çalışmada ISM bandında çalışan geniş-bant tekstil anten tasarımı sunulmaktadır. Bant genişliğini arttırmak amacıyla ışıyan kare yamada açıklık oluşturulmuş olup, toprak düzleminde ise kısmi toprak düzlemi tercih edilmektedir. Alt tabaka malzemesi olarak esnek, düşük maliyet, hafiflik ve kolay erişilebilirlik gibi özellikleri göz önüne alınarak kot malzeme seçilmektedir. Tasarımı yapılan anten mikroşerit hat ile beslenen bir kare yama ve bu yamanın içindeki kare yapıdan oluşmaktadır. Tasarımı yapılan anten vücut üzerine yerleştirilebilmekte ve 2,45 GHZ bandında çalışan standartları desteklemektedir. Önerilen anten CST MicrowaveStudio kullanılarak simüle

edilmektedir. Simülasyon sonuçları 2,41 GHz merkez frekansında ve 1,96 GHz-2,87 GHz frekansları arasında 910 MHz bant genişliği sunmaktadır. Geri dönüş kaybı değeri -39,83 dB ve yönlülük kazancı ise 3,3 dBi olarak elde edilmektedir. Ölçüm sonuçlarında bant genişliği değeri 1,45 GHz – 2,82 GHz frekansları arasında 1,37 GHz olarak ölçülmektedir. Simülasyonu yapılan sonuçlar ile anten üretilip test edildiğinde elde edilen sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir.

ANTEN TASARIMI & SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında 2,4 GHz merkez frekansında çalışan ve mikroşerit hat ile beslenen dikdörtgen şeklinde yama, dielektrik katsayısı 1,7, dielektrik tabaka yüksekliği 1 mm olan kot bir tabaka üzerine iç içe yerleştirilen iki adet kare halka ve toprak düzleminde kısmi toprak düzlemi kullanılarak oluşturulmaktadır. Tasarımı yapılan antende iletken materyal olarak kalınlığı 35µm olan bakır bant kullanılmaktadır. Şekil 1'de tasarımı yapılan tekstil antenin uzunluk parametreleri verilmektedir. Şekil 1'a yama geometrisine ait uzunluk ve dielektrik tabakaya ait uzunluk parametrelerini göstermektedir. Şekil 1'b ise toprak düzleminde kullanılan kısmi toprak düzleminin uzunluk parametreleri ve şekil 1'c de ise tasarımı yapılan tekstil antenin yandan görünümü ile kullanılan dielektrik malzeme (kot) ve ışımayı gerçekleştirecek olan yama ve toprak düzleminde kullanılan bakır bant malzemenin yüksekliği (35 µm) olarak gösterilmektedir. Tablo 1' de ise uzunluk parametreleri değerleri milimetre olacak şekilde gösterilmektedir.



Şekil 1. Tasarımı yapılan tekstil antene ait uzunluk değer parametreleri a) Ön görünüm, b) arka görünüm c) yan görünüm

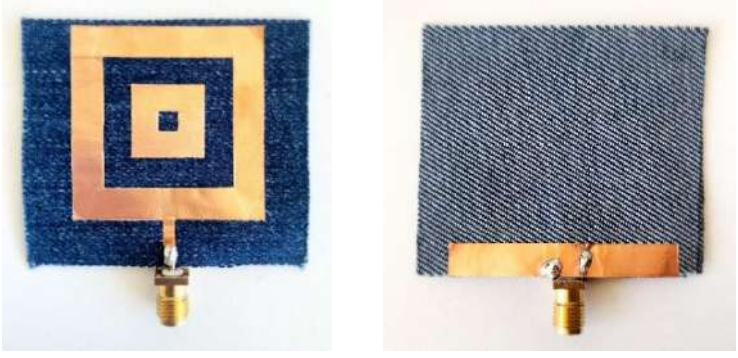
D_W ve D_L ile antende kullanılan kot dielektrik tabakanın genişliği ve uzunluğu verilmektedir. P_W parametresiantende kullanılan ilk kare halkanın uzunluğunu, $F_L$parametresi ile kare halkayı beslemek için kullanılan mikroşerit

hattın uzunluğunu, F_W ise mikroşerit hattın genişliği ifade edilmektedir. Tasarımı yapılan antenin toprak düzleminde G_L yüksekliğinde toprak düzlemi, dielektrik tabakanın kenarlarında S_H = 4.32 mm olacak şekilde yerleştirilmektedir.

Tablo 1. Önerilenantenuzunlukdeğerleri

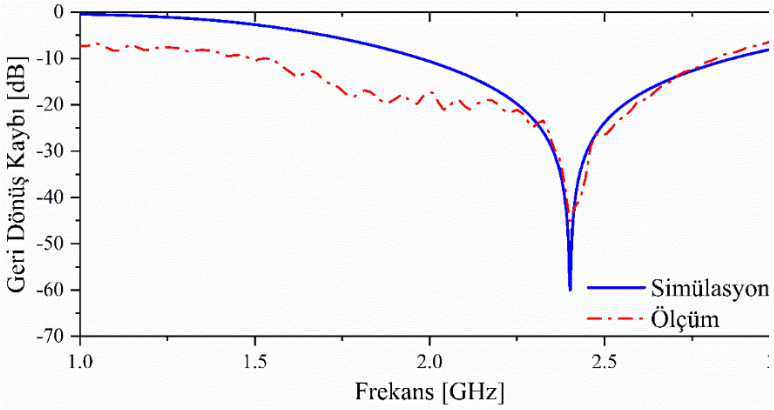
Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
D_W	54,54	F_L	8,63
D_L	48,59	F_W	2,2
P_W	37,34	G_L	6
C_W	14,06	T_H	0,035
T_H	4,06	h	1
S_H	4,32		

Şekil'2 de kot dielektrik malzeme üzerine üretimi yapılan anten gösterilmektedir. Şekil 2'a antenin yama kısmını bulunduğu ön yüzeyi göstermektedir. Şekil 2'b ise antenin kısmi toprak düzleminin bulunduğu arka yüzeyi göstermektedir. Üretimi yapılan antenin ölçümümün gerçekleştirilmesi için SMA konnektör antende bulunan bakır bant iletim hattına ve kısmi toprak düzlemi üzerine lehimlenmektedir. Kot malzemenin kalınlığını az olması ve malzemenin erişiminin kolay olması sayesinde üretimi yapılan anten düşük profil ve konformal yapıda bir özellik göstermektedir.



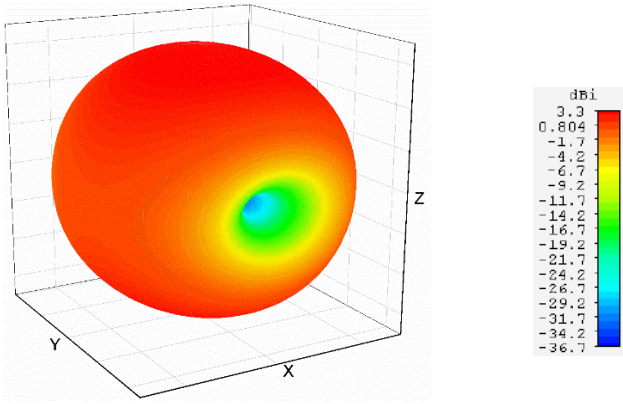
Şekil 2. Üretimi yapılan yama anten a) Ön yüz b) Arka yüz

Anten performans kriterlerinin belirlenmesinde yansıma katsayısı olarak isimlendirilen S_{11} parametresi önemli bir rol oynamaktadır. Antenin verimli bir şekilde ışıma yaptığının göstergesi S_{11} değerinin -10 altında olduğu değerlerdir ve antenin bu değerler altında verimli ışıma yaptığı kabul edilmektedir (Balanis, 2016) . Önerilen tekstil antene ait yansıma katsayı grafikleri simülasyon ve ölçüm sonuçlarını göstererek Şekil 3'te verilmektedir. Simülasyon ortamında CST Studio Suite kullanılarak elde edilen sonuçlara göre 2,4 GHz merkez frekansında 1,96 GHz ve 2,87 GHz arasında 910 MHz bant genişliği değerine ve -59,98 dBgeri dönüş kaybı değerine ulaşılmaktadır. Üretimi yapılan antenin ölçüm sonuçları alındığında bant genişliği değeri 1,45 GHz – 2,82 GHz frekansları arasında 1,37 GHz ve geri dönüş kaybı değeri ise -45,08 dB olarak elde edilmektedir.



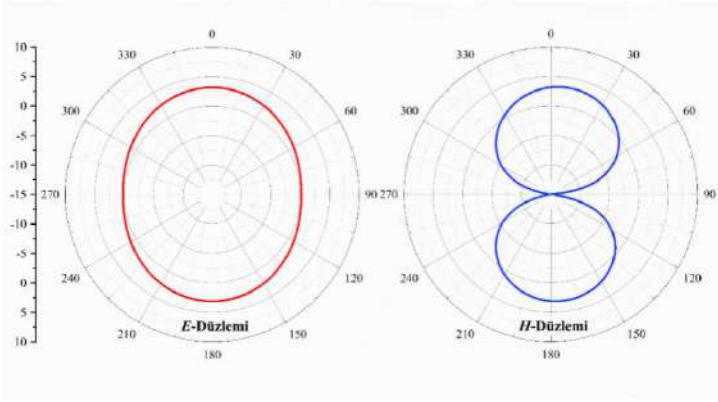
Şekil 3. Tasarımı yapılan tekstil antenin simülasyon ve ölçüm sonucu

Yönlülük kazanç grafiği, antenden boşluğa yayılan gücün uzak alan ortamında oluşturmuş olduğu, açısal değişimini gösteren üç boyutlu bir grafiktir. Tasarlanan antenin simülasyon sonuçları ile elde edilen yönlülük kazanç grafiği 2,4 GHz için Şekil 4'te üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Yönlülük kazanç değerinin maksimum olduğu noktada 3,3 dBi değerine ulaşmaktadır.



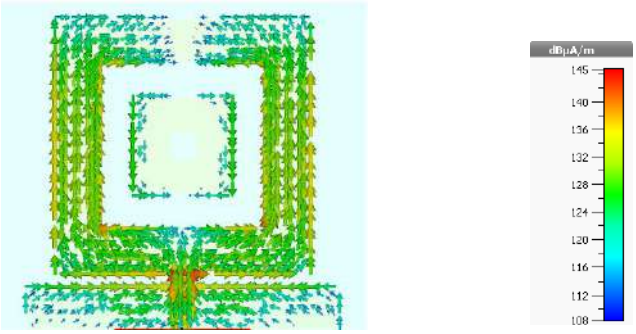
Şekil 4. Tasarımı yapılan tekstil antenin üç boyutlu yönlülük kazanç grafiği

Anten ışıma deseni bir antenin ışıma karakteristiğini, antenin yönünü ve hangi yönde ışıma yaptığını göstermektedir. Önerilen antene ait ışıma deseni Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5, 2,4 GHz frekansındaphi=0º durumunda kırmızı grafikle E-düzlemi, B'de ise phi=90º durumunda mavi grafikle H-düzlemi verilmektedir.



Şekil 5. Tasarımı yapılan tekstil antene ait iki boyutlu ışıma (E-H düzlemi) grafiği

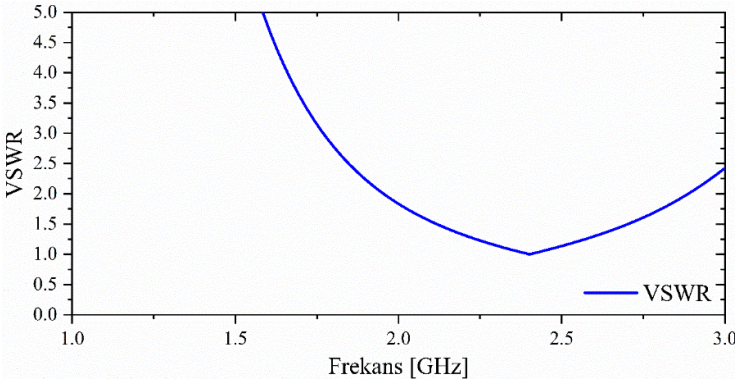
Tasarımı yapılan antenin maksimum yüzey akım genliği 2,4 GHz rezonans frekansında 145 µA/m, olarak elde edilmektedir. 2,4 GHz'de yüzey akımlarının, Şekil 6 a'da gösterildiği gibi yamanın kenarlarında ve besleme hattı ile yamanın birleştiği yerde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir.



(a) (b)

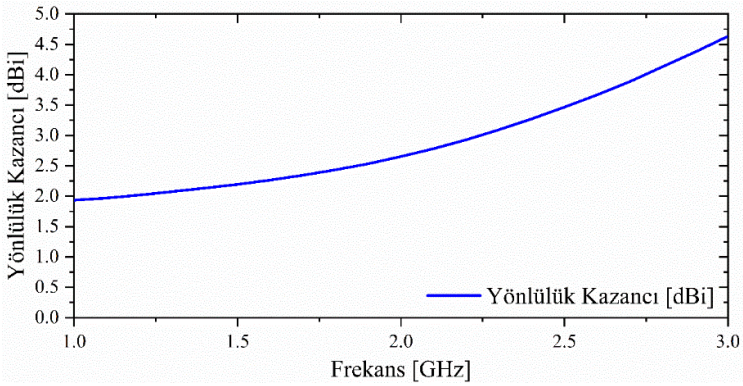
Şekil 6. a) Tasarımı yapılan tekstil antene ait yüzey akım dağılım grafiği, b) Değer skalası

Şekil 7'de tasarımı yapılan tekstil antene ait Duran Dalga Oranı (VSWR) verilmektedir. VSWR, bir anten sisteminde iletilen ve yansıyan voltajların birbirine oranlanması şeklinde ifade edilmektedir. Verimli bir anten sisteminde VSWR değerinin 1'e yakın olması beklenmektedir. Önerilen anten tam merkez frekansında geri dönüş kaybının maksimum olduğu yerde 1,02 VSWR değerine ulaşmaktadır.



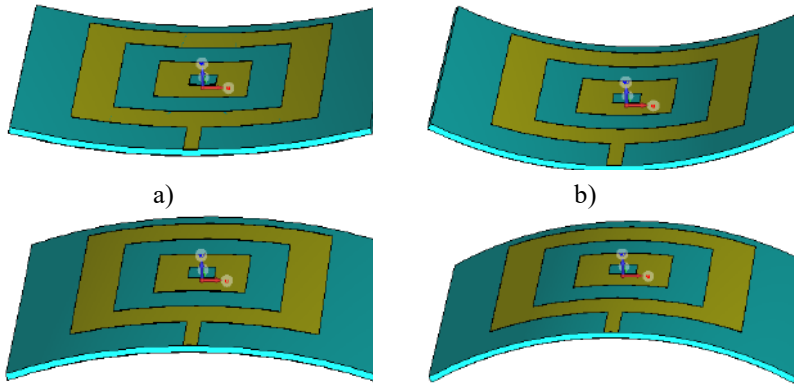
Şekil 7. Tasarımı yapılan tekstil antene ait VSWR grafiği

Şekil 8'de önerilen antene ait frekans yönlülük kazanç grafiğine yer verilmektedir. Merkez frekansında(2,4 GHz) 3,03 dBi yönlülük kazanç değerine sahip olan antenin yönlülük kazanç değerine aitsimülasyon sonuçları 2,6 dBi ile 4,31 dBi arasında Şekil 7'de görüldüğü gibi değişmektedir.



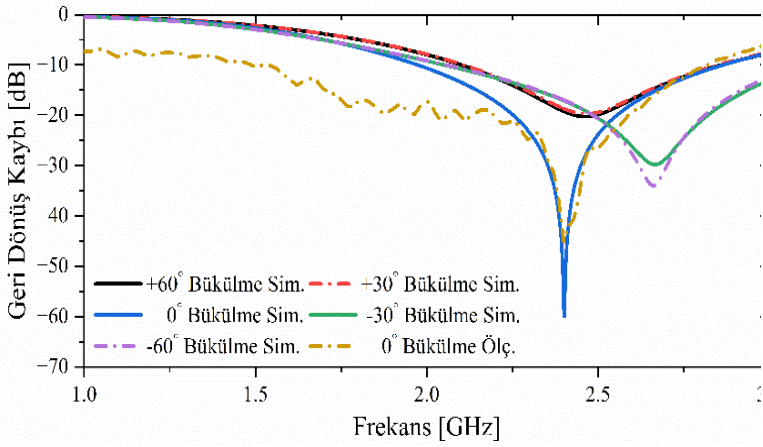
Şekil 8. Tasarımı yapılan tekstil antene ait yönlülük kazanç grafiğinin frekansa göre değişimi

Antenleri bükülme koşulları altında değerlendirmek için antenler üzerinde yatay eksende yukarı yönlü 30º ve 60º olacak şekilde bükülme, yatay eksende aşağı doğru 30º ve 60º olacak şekilde bükülme özelliği test edilmektedir. Bükümlü tekstil antenler şekil 9'da gösterilmektedir. +30º ve +60º bükülmekten sonra antenlerin merkez frekansı 60MHz kayarak merkez frekans 2,46 GHz olmakta ve geri dönüş kaybı -22,5 dB olmaktadır. -30º ve -60º bükülmekten sonra antenlerin merkez frekansı 260 MHz kayarak merkez frekans 2,66 GHz olmakta ve geri dönüş kaybı -34 dB olmaktadır. Geri dönüş kaybında azalma ve frekans da kaymalar olmasına rağmen anten ışıma özelliklerini korumaktadır. Sonuçlar tasarımı yapılan tekstil anten dayanıklılığını göstermektedir.



Şekil 9. Tasarımı yapılan tekstil antenin farklı açılar altında bükülme analizini gösteren şekiller a) 30º yukarı bükme, b) 60º yukarı bükme c) 30º aşağı bükme d) 60º aşağı bükme

Şekil 10'da farklı açılara göre bükülmüş olan antenlerin S_{11} parametrelerinin farklı bükülme açılarına göre değişimini göstermektedir.



Şekil 10. Tasarımı yapılan tekstil antenin farklı açılar altında bükülme analizini gösteren grafik

ISM 24 GHz bandında kullanılan tekstil antenler üzerine yapılan çalışmalara arasında, bu çalışmada tasarımı yapılan antenin diğer tekstil antenler ile karşılaştırılması Tablo 2' de verilmektedir. Tablo incelendiğinde önerilen tekstil antenin diğer antenlere kıyasla bant genişliği, kazanç ve geri dönüş kaybı gibi konularda literatürde bulunan çalışmalardan daha iyi değerler sunmaktadır.

Tablo 2. ReferansAnteninLiteratürleKarşılaştırılması

Referans	Rezonans-Frekansı (GHz)	AntenBoyutları (mm^3)	Bant Genişliği (MHz)	Yönlülük-Kazancı (dBi)	Geri Dö-nüşKaybı (dB)
(Rashid 2019)	2,4	35,5×16,07	180	2,104	-23
(Kumar 2018)	2,45	90×70×1,57	500	2	-19
(Balaji 2021)	2,45	32×30×2	152	2,03	-35
(Jain 2022)	2,45	58,2×65,6	145	3,4	-31,4
Bu çalışma	**2,4**	**48,5×54,5×1**	**1370**	**3,3**	**-59,98**

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında 2,4 GHz frekans bandında çalışan ISM bantlarında kullanılmak üzere yeni bir geniş-bant tekstil anten tasarımı sunulmaktadır. Kot malzeme üzerine yapılmış esnek ve düşük profile sahip anten tasarımı çok kolay bir şekilde farklı yüzeylere entegre edilebilmektedir. Dielektrik tabaka olarak kot malzeme ışıyan yama olarak ise bakır bant kullanılarak anten tasarımı tamamlanmaktadır. Işıyan yama üzerinde kare şeklinde açılan açıklıklar ve toprak düzleminde ise kısmi toprak düzlemi kullanılarak oluşturulan anten tasarımı ölçüm sonuçlarına göre bant genişliği değeri 1,45 GHz – 2,82 GHz frekansları arasında 1,37 GHz olarak elde edilmektedir. Yönlülük kazanç değeri ise 3,3 dBi olmaktadır. Geri dönüş kaybı değeri -59,98 dB seviyesine ulaşmaktadır. Tasarımı yapılarak sunulan anten literatürde bulunan diğer antenlere oranla düşük profil ve hafifliği sayesinde, ISM 2,4 GHz bandında, vücut alan (WBAN-Wireless Body Area Network) ağlarında, elektronik devrelerin kablosuz haberleşme ihtiyaçlarını karşılamak üzere tekstil anten olarak kullanım için uygun olmaktadır.

KAYNAKÇA

1. Al-Yasir, Y. I.,Alkhafaji, M. K., Alhamadani, A., OjaroudiParchin, H. A., Elfergani, N., Saleh, I., &Abd-Alhameed. (2020). A newandcompactwide-bandmicrostripfilter-antennadesignfor2.4 GHz ISM bandand 4G applications. Electronics, 9.
2. Anguera, J.,Andújar, A., Huynh, M.-C., &Orlenius, C. (2013). Advances in antennatechnologyforwirelesshandhelddevices. International Journal of AntennasandPropagation, 2013, 1–2. doi:10.1155/2013/376531
3. Armağan, o. (2022). Dikdörtgen Mikroşerit Yama Antende Kısmi Toprak Düzlem Yapının Band Genişliği ve Anten Kazancına Etkisinin İncelenmesi. Yalvaç akademi dergisi, 7(1), 111–119. Retrievedfrom https://dergipark.org.tr/tr/pub/yalvac/issue/72335/1170325
4. Ashyap, A. Y. I.,Zainal Abidin, Z., Dahlan, S. H., Majid, H. A., Waddah, A. M. A., Kamarudin, M. R., … Noras, J. M. (2018). Inverted E-shapedwearabletextileantennaformedicalapplications. IEEE Access: PracticalInnovations, Open Solutions, 6, 35214–35222. doi:10.1109/access.2018.2847280
5. Bajaj, S., Singh Saini, H., &Kamal, T. S. (n.d.). A HexagonalWearableAntenna On VarıousTextıleSubstrates.
6. Balaji, P.,&Narmadha, R. (2021). Wearable E-shapedtextileantennaforbiomedicaltelemetry. 2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, CommunicationandSustainable Technologies (ICAECT). IEEE.
7. Balanis, C. A. (2016). Antennatheory: Analysis anddesign (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
8. Choudhry, N. A., Arnold, L., Rasheed, A., Khan, I. A., &Wang, L. (2021). Textronics—A review of textile-basedwearableelectronics. Advanced EngineeringMaterials, 23(12), 2100469. doi:10.1002/adem.202100469
9. Dierck, A.,Declercq, F., &Rogier, H. (2011). Review of activetextileantennaco-designandoptimizationstrategies. 2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications. IEEE.
10. Güngörer, B.,Kayabaşi, A., & Tekbaş, M. (2019). Wlan uygulamaları için besleme metotları farklı dairesel mikroşerit anten benzetimi ve üretimi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 1(1), 120–127.
11. Ha, S. J.,Jung, Y. B., Kim, D. H., &Jung, C. W. (2012). Textilepatchantennasusingdoublelayerfabricsforwrist-

wearableapplications. Microwaveand Optical TechnologyLetters. 54, 97–2702.
12. Hayajneh, T.,Almashaqbeh, G., Ullah, S., &Vasilakos, A. V. (2014). A survey of wirelesstechnologiescoexistence in WBAN: analysisandopenresearchissues. Wireless Networks, 20(8), 2165–2199. doi:10.1007/s11276-014-0736-8
13. Hu, B.,Gao, G.-P., He, L.-L., Cong, X.-D., &Zhao, J.-N. (2016). Bendingand on-armeffects on a wearableantennafor 2.45 GHz body area network. IEEE Antennasand Wireless PropagationLetters, 15, 378–381. doi:10.1109/lawp.2015.2446512
14. International TelecommunicationsUnion-Radio Communications, (ITUR), RadioRegulations. (n.d.). Geneva(Switzerland.
15. Jain, V.,&Dhaliwal, B. S. (2022). Investigations on thedesign of compactflexiblewearablefractalpatchantennafor body areanetworksapplications. Wireless Personal Communications, 126(2), 1443–1458. doi:10.1007/s11277-022-09800-0
16. Kan, C. W.,& Lam, Y. L. (2021). Futuretrend in wearableelectronics in thetextileindustry. AppliedSciences, 11(9).
17. Kavitha, A.,&Swaminathan, J. N. (2019). Design of flexibletextileantennausing FR4, jeanscottonand teflon substrates. Microsystem Technologies: Sensors, Actuators, Systems Integration, 25(4), 1311–1320. doi:10.1007/s00542-018-4068-y
18. Khandelwal, M. K.,Kanaujia, B. K., & Kumar, S. (2017). DefectedGroundStructure: Fundamentals, analysis, andapplications in modern wirelesstrends. International Journal of AntennasandPropagation, 2017, 1–22. doi:10.1155/2017/2018527
19. Kumar, S. A.,&Shanmuganantham, T. (2018). Design andperformance of textileantennaforwearableapplications. Transactions on Electricaland Electronic Materials, 19(5), 352–355. doi:10.1007/s42341-018-0052-6
20. Kurt, H.,& Kaya, A. (2022). Ellipticalpatchmicrostripantennafor Bluetooth/WI-Fi applications. ICONTECH INTERNATIONAL JOURNAL, 6(1), 53–57. doi:10.46291/icontechvol6iss1pp53-57
21. Magdalena, Y.,Anwar, R., Wahyu, Y., Sulaiman, M. I., Mansor, Z., &Nurmantris, D. A. (2021). PerformanceComparison of CottonandSilkSubstrates on 1.575 GHz FrequencyTextileAntenna. ElektronikaIrElektrotechnika, 27(5), 26–33.
22. Mahmood, S. N.,Ishak, A. J., Saeidi, T., Alsariera, H., Alani, S., Ismail, A., &Soh, A. C. (2020). Recentadvances in wearableantennatechnologies: A review. Progress in

ElectromagneticsResearch B. Pier B, 89, 1–27. doi:10.2528/pierb20071803
23. Mantash, M.,Tarot, A.-C., Collardey, S., &Mahdjoubi, K. (2012). Investigation of flexibletextileantennasand AMC reflectors. International Journal of AntennasandPropagation, 2012, 1–10. doi:10.1155/2012/236505
24. Muhammad, Z.,Shah, S. M., Abidin, Z. Z., Asyhap, A. Y., Mustam, S. M., &Ma, Y. (2017). CPW-fed wearableantenna at 2.4 GHz ISM band. In AIP Conference Proceedings(Vol. 1883). AIP Publishing LLC.
25. Pachigolla, S. Y.,Dab, V., Chatterjee, A., &Kundu, S. (2018). A compactrectangularmicrostrippatchantennafor2.4 GHZ ISM bandapplications. In 2018 IEEE Indianconference on antennasandpropogation (InCAP) (pp. 1–3). IEEE.
26. Pandey, I., Dutta, H. S., &SekharBanerjee, J. (2019). WBAN: A smartapproachtonextgeneration e-healthcaresystem. 2019 3rd International Conference on Computing MethodologiesandCommunication (ICCMC). IEEE.
27. Purohit, S.,&Raval, F. (2014). Wearable-textilepatchantennausingjeans as substrate at 2.45 GHz. International Journal of EngineeringResearch&Technology (IJERT), (5).
28. Qian, B.,Chen, X., &Kishk, A. A. (2021). Decoupling of microstripantennaswithdefectedgroundstructureusingthecommon/differential modetheory. IEEE Antennasand Wireless PropagationLetters, 1–1. doi:10.1109/lawp.2021.3064972
29. Rahman, M. A.,Shaikat, A., Iqbal, I. S., & Hassan, A. (2013). Microstrippatchantennadesignandperformanceanalysisfor RFID applications at ISM band (2.45 GHz). In 2013 2nd International Conference on Advances in ElectricalEngineering (ICAEE) (pp. 305–308). IEEE.
30. Rais, N. H. M.,Soh, P. J., Malek, F., Ahmad, S., Hashim, N. B. M., &Hall, P. S. (2009). A review of wearableantenna. 2009 LoughboroughAntennas&Propagation Conference. IEEE.
31. Rashid, M. M. U., Rahman, A., Paul, L. C., & Sarkar, A. K. (2019). Performanceevaluation of a wearable 2.45 GHz planarprintedmeanderingmonopoletextileantenna on flexiblesubstrates. In 2019 1st International Conference on Advances in Science, EngineeringandRoboticsTechnology (ICASERT) (pp. 1–6). IEEE.
32. Rizwan, M.,Rahmat-Samii, Y., &Ukkonen, L. (2015). Circularlypolarizedtextileantennafor 2.45 GHz. 2015 IEEE MTT-S 2015

International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies forBiomedicaland Healthcare Applications (IMWS-BIO). IEEE.

33. Roh, J.-S.,Chi, Y.-S., &Kang, T. J. (2010). Wearabletextileantennas. International Journal of Fashion Design TechnologyandEducation, 3(3), 135–153. doi:10.1080/17543266.2010.521194
34. Roshni, S. B.,Jayakrishnan, M. P., Mohanan, P., &Surendran, K. P. (2017). Design andfabrication of an E-shapedwearabletextileantenna on PVB-coatedhydrophobic polyester fabric. Smart Materials&Structures, 26(10), 105011. doi:10.1088/1361-665x/aa7c40
35. Song, Y.,Jiao, Y.-C., Zhao, G., &Zhang, F.-S. (2007). Multibandcpw-fed triangle-shapedmonopoleantennaforwirelessapplications. ElectromagneticWaves (Cambridge, Mass.), 70, 329–336. doi:10.2528/pier07020201
36. Varma, S.,Sharma, S., John, M., Bharadwaj, R., Dhawan, A., &Koul, S. K. (2021). Design andperformanceanalysis of compactwearabletextileantennasforIoTand body-centriccommunicationapplications. International Journal of AntennasandPropagation, 2021, 1–12. doi:10.1155/2021/7698765
37. Wang, K.-H.,&Li, J.-S. (2018). Jeanstextileantennaforsmartwearableantenna. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagationand EM Theory (ISAPE). IEEE.
38. Zhang, L.,Wang, Z., &Volakis, J. L. (2012). Textileantennasandsensorsfor body-wornapplications. IEEE Antennasand Wireless PropagationLetters, 11, 1690–1693. doi:10.1109/lawp.2013.2239956

MİKROAKIŞKAN TEKNOLOJİSİNİN NANOPARÇACIK SENTEZ UYGULAMALARINDAKİ YERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ceyda ÖKSEL KARAKUŞ

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İzmir, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5282-4114

1. Giriş

Dünyada son yıllarda oldukça önemli bir araştırma alanı haline gelen mikroakışkan teknolojisi küçük hacimlerdeki akışkanların mikron boyutlu kanallar boyunca kontrollü bir biçimde hareketine, izlenmesine ve denetlenmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Ölçek küçültmeye ve düşük numune gereksinimine bağlı olarak sağlanan ekonomik faydalara ek olarak, mikroakışkan-temelli cihazların sunduğu hassas kontrol ve kullanım kolaylığı gibi avantajlar bu sistemleri pek çok sektör ve uygulama açısından elverişli hale getirmektedir. Son yıllarda kimyasal sentez amacıyla kullanımı sıklıkla test edilen ve mikro-reaktör olarak adlandırılan mikroakışkan sistemler, başta nanoparçacık sentezi olmak üzere reaksiyon koşullarının hassas kontrolünün kritik olduğu alanlarda kullanım için özelleştirilmiştir. Geleneksel nanoparçacık sentez yöntemlerine kıyasla, mikroakışkan-temelli yöntemler nanoparçacıkların hızlı, ucuz ve parçacık kontrolü bir şekilde sentezine olanak sağlayarak mevcut sistemlerin yüksek numune hacmi, atık oranı ve çok adımlı hazırlık gereksinimleri gibi dezavantajları ortadan kaldırmaktadır. Bunun yanı sıra kanal tıkanması, nanoparçacıkların sistemin bileşenleriyle etkileşimleri ve ısıtmaya ilişkin sorunlar gibi olası kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde nanoparçacıkların geleneksel sentez yöntemlerine ve bu yöntemlerin kısıtlamalarına değinilecek, daha sonra mikroakışkan ve eklemeli imalat (üç boyutlu yazıcı) teknolojilerinin nanoparçacık sentez uygulamalarındaki yeri açıklanacaktır. Son olarak alana ilişkin mevcut ve yakın gelecekte yaşanması beklenen teknolojik gelişmelerden bahsedilecek ve öngörüler paylaşılacaktır.

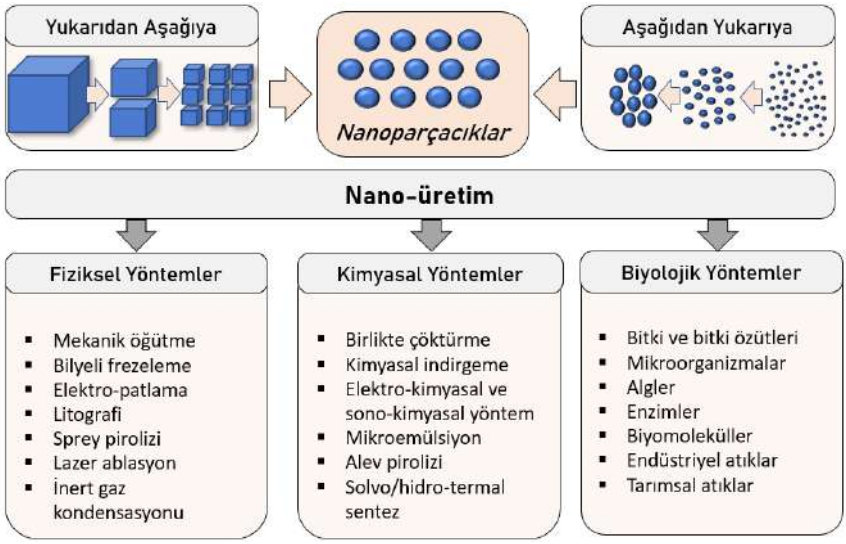
2. Nanoteknoloji

Metrenin milyarda biri ölçeğinde ifade edilen nano-boyut insanlık için yeni olmamakla birlikte tabiat pek çok nano-yapılı doğal malzemeye (örn., kil benzeri mineraller, volkanik patlamalar sonucu oluşan küller, kan benzeri yapılar ve sıvı kolloidler) ve nano-boyutun mümkün kıldığı pek çok motife ve fonksiyonelliğe (örn., geko kertenkelelerine sınırsız hareket kabiliyeti sağlayan nano-boyutlu tüyler) ev sahipliği yapmaktadır(Sitti & Fearing, 2003). Bu perspektiften bakıldığında nanomalzemelerin tarihi ve nano-boyutun etkileri antik döneme dayanmakla birlikte nanoteknolojinin somut bir bilime dönüşmesi ancak 1960'lı yıllarda mümkün olmuştur(Hulla, Sahu, & Hayes, 2015). 1959 yılında tarihin en önemli fizik profesörlerinden biri kabul edilen Richard Feynman "Aşağıda Daha Çok Yer Var" başlıklı konuşmasıylamalzemelerin ve sistemlerin minyatürleştirilmesi fikrini ve nanoteknoloji vizyonunu ortaya çıkarmıştır(Feynman, 1959). Bu fikirlerden ilhamla *nanoteknoloji* terimi ilk kez

1974 yılında Japon bilim insanı Norio Taniguchi tarafından "Nanoteknolojinin Temel Konsepti Üzerine" başlıklı makalede kullanılmıştır(Mulvaney, 2015). 1981 yılında atomik ölçekte çözünürlüğe sahip Taramalı Tünelleme Mikroskobu'nun keşfi nanoteknolojiye büyük bir ivme kazandırmış ve nanoteknoloji-ürünü malzemeler farklı uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmeye başlanmıştır(Tersoff & Hamann, 1985). Biyoteknoloji ve bilişim teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak yaşanan nanoteknoloji devrimi farklı bilimsel alanların ve disiplinlerin bakış açıları ve yöntemlerinden faydalanarak malzemeleri atomik ölçekte inşa ve modifiye etmeyi olanaklı kılmıştır. Günümüzde nanoteknoloji ürünü yeni nesil malzemeler pek çok sektörde kullanım bulmuş ve günlük hayatın önemli bir parçası olmuştur.

2.1. Nano-üretim Yöntemleri

Nanomalzemeler, en yaygın olarak, 100 nanometreden (metrenin milyarda biri) küçük en az bir boyuta sahip materyaller olarak tanımlanmaktadır(Boholm & Arvidsson, 2016; Kreyling, Semmler-Behnke, & Chaudhry, 2010). Nano-yapılı malzemeler küçük parçacık boyutları dolayısıyla aynı hacimli yığın formdaki malzemelere kıyasla çok daha geniş yüzey alanına sahiptir. Birim hacim başına düşen yüzey alanı artışı, kuantum etkileriyle beraber, nano-boyutta değişen mekanik, elektronik, optik ve biyolojik etkilerin temelini oluşturmakta ve malzemelere yığın formda gözlenmeyen benzersiz özellikler kazandırmaktadır(Murty, Shankar, Raj, Rath, & Murday, 2013; Sudha, Sangeetha, Vijayalakshmi, & Barhoum, 2018; Yang & Mai, 2014).



Şekil 1. Başlıca nanoparçacık üretim yöntemleri

Nanomalzemeler temel olarak yukardan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya üretim olarak adlandırılan iki farklı yaklaşımla; fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak gruplandırılabilen üç farklı yöntemle üretilebilmektedir. Yukardan-aşağıya üretim yöntemi yığın formdaki malzemelerin boyutlarının çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlerle nano-boyuta indirilmesini ifade ederken aşağıdan-yukarıya üretim yaklaşımında atomlar veya moleküller kontrollü olarak bir araya getirilerek nano-formlu yapılar oluşturulur(Baig, Kammakakam, & Falath, 2021; Tulinski & Jurczyk, 2017).

Yığın formdaki malzemeden başlayan sentez yöntemlerine örnek olarak mekanik öğütme, dağlama, litografi, elektro-patlama, lazer ablasyonu ve çeşitli kimyasal/ışıl işlemler verilebilirken atomik boyutlardan başlayıp nano-boyutlu kümelerin oluşumuna imkân sunan tekniklere örnek olarak inert gaz yoğunlaştırma, kimyasal buhar yoğunlaştırma, sol-jel ve alev-sentezi verilebilir. Yaygın olarak kullanılan nano-üretim yöntemleri Şekil 1'de özet olarak sunulmuştur.

Geleneksel nanoparçacık üretim yöntemleri sıcaklık, basınç, pH gibi ortam koşullarından oldukça etkilenmekte ve bu durum sonuçların tekrarlanabilirliğini azaltmaktadır. Tüm deneysel ve çevresel parametrelerin optimize edilmediği durumlarda sentez verimi oldukça düşük olmaktadır. Tüm bu kısıtlamalar nanoparçacıkların istenilen boyut ve morfolojilerde sentezini zorlaştırmakta ve uzun dönemde nanoparçacıklar kümelenerek mikron-boyutlu agrega yapılar oluşturmaktadır. Bu durum nano-yapıların homojen, tek boyut dağılımlı ve yüksek kimyasal kararlılıkta sentezine ve sistem parametrelerinin hassas kontrolüne olanak sağlayan, ucuz ve etkin yeni yöntemlerin geliştirilmesine yönelik önemli bir ihtiyaç doğurmuştur.

3. Mikroakışkan Teknolojisi

Mikroakışkan sistemler küçük hacimlerdeki akışkanların mikron boyutlu kanallar boyunca kontrolüne ve bu sayede akışkan davranışlarında etkili olan faktörlerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Temelleri 1950'li yıllarda fotolitografik baskı yönteminin ve mürekkep püskürtmeli (inkjet) yazıcı teknolojisinin keşfiyle atılan mikroakışkan teknolojisi minyatür sistemleri ve bileşenlerini tasarlamaya yönelik bir ilginin oluşmasına yol açmıştır (Dellaquila, 2017). 1979 yılında Terry ve çalışma ark. tarafından gaz kromatografisi prensiplerine dayalı olarak geliştirilen gaz analiz cihazı minyatür sistemlerin ilk somut örneklerinden biri olmuştur (Terry, Jerman, & Angell, 1979). Mikroakışkan teknolojisinin kimya alanındaki kullanıma ilişkin ilk örneklere yaklaşık 10 yıl sonra rastlanmaktır. 1990 yılının başlarında Manz ve ark. tarafından ve günümüzde çip üzerinde laboratuvar olarak adlandırılan sistemin

kimya alanındaki ilk uygulama örneği kabul edilen minyatür kimyasal analiz sistemi geliştirmiştir (Manz, Graber, & Widmer, 1990).

Mikroakışkan sistemlerin hücre biyolojisi ve biyokimya alanlarındaki ilk örneklerine 1994 yılında rastlanmaktadır. ABD'nin Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) kimyasal ve biyolojik silahların tespitinde kullanılabilecek, portatif mikroakışkan çipler tasarlamış ve mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) teknolojilerinin gelişimine önemli katkı sağlamıştır. 2000'li yıllardan itibaren çip-üzeri-organ teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmış ve Harvard Üniversitesi Wyss Enstitüsü öncülüğünde farklı organları ve işlevlerini taklit edebilen organ çipler geliştirilmeye başlanmıştır (Huh vd., 2010). Mikroakışkan sistemlerdeki gelişmeler mikro/nano ölçekte fabrikasyona ve desenlemeye izin veren yumuşak litografi tekniğindeki gelişmeler ile paralel ilerlemiş, son 15 yıl içerisinde hızla gelişen 3 boyutlu (3B) baskı teknolojisinin entegrasyonu ve alternatif kalıplama prosedürleri ile prototipleme çalışmaları hız kazanmıştır (Convery & Gadegaard, 2019). Günümüzde mikroakışkan teknolojisi biyomedikal uygulamalar (örn., aşı/ilaç geliştirme ve kontrollü salınım, tanı, teşhis ve tedavi uygulamaları) olmak üzere pek çok alanda kullanım potansiyeli taşıyan ve üzerinde evrensel boyutta araştırma-geliştirme çalışmaları yürütülen önemli bir teknolojidir.

3.1. Mikroakışkan-temelliNanoparçacık Sentez Sistemleri

Mikroakışkan sistemlerin sunduğu avantajlar nano-boyutta üretimin gereksinimleriyle büyük oranda örtüşmekte ve bu durum mikroakışkan-temelli tekniklerin nanoparçacık sentezi için kullanımını oldukça cazip hale getirmektedir.

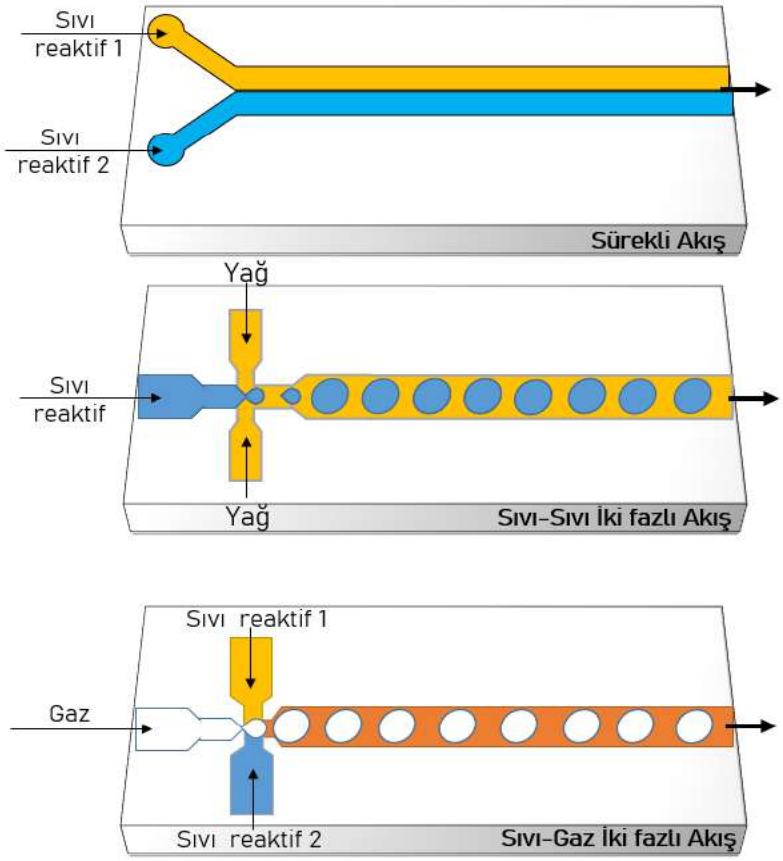
Tablo 1. Mikroakışkan-temelli ve geleneksel nanoparçacık sentez yöntemlerinin kıyaslanması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Mikroakışkan Teknolojisi	(+) yüksek hız (+) tekrarlanabilirlik (+) düşük maliyet (+) hassas kontrol (+) parçacık kontrolü (+) düşük hacim (+) düşük atık (+) etkin karıştırma	(-) optimizasyon gereksinimi (-) kanal tıkanması (-) etkileşim riski (-) kontaminasyon riski (-) özel üretim ortamı gereksinimi
Geleneksel Yöntemler	(+) basit dizayn ve kurulum (+) kolay hazırlık (+) büyük ölçekli üretim imkanı	(-) yüksek numune hacmi (-) yüksek atık oranı (-) düşük tekrarlanabilirlik (-) düşük verim (-) sistem parametrelerinin kontrol zorluğu

Alandaki öncü çalışmalar bu yenilikçi sistemler yardımıyla nanoparçacıkların hızlı, ucuz ve parçacık kontrolü bir şekilde sentezinin mümkün olduğunu ve böylece geleneksel sistemlerin yüksek numune hacmi, atık oranı ve çok adımlı hazırlık gereksinimleri gibi dezavantajları ortadan kaldırılabileceğini ortaya koymuştur (Frenz vd., 2008; Yao, Zhang, Du, Liu, & Yao, 2015; Zhao, He, Qiao, & Middelberg, 2011). Mikroakışkan-temelli yaklaşımlara ve geleneksel nanoparçacık sentez yöntemlerine ilişkin söz konusu avantaj ve dezavantajlar Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Sentez uygulamalarında kullanım için özelleştirilen mikroakışkan sistemler mikro-reaktör olarak adlandırılırken kanalların içerisindeki akış türüne göre damlacık-bazlı, laminer veya dijital akışlı olarak gruplandırılabilirler (Teh, Lin, Hung, & Lee, 2008). Nanoparçacık sentezinde kullanılan farklı mikro-reaktör örnekleri Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir. Laminer akışta sıvılar mikrokanallar içerisinde birbirine karışmadan akarken kanal tasarımına göre belirlenen noktalarda birbirinden ayrılabilmektedirler. Damlacık bazlı akışa sahip sistemler, birbiriyle karışmayan farklı fazlı sıvıların (örn. yağ ve su) gönderildiği ve eş-boyutlu damlacıkların oluşturulduğu sistemlerdir (Cheow, Yobas, & Kwong, 2007; Teh vd., 2008; Zhong, Ding, Gao, He, & Gu, 2019). Dijital mikroakışkan cihazlar, özel yüzey yapılarının kullanıldığı ve elektrik

akımı ile sıvı/yüzey arasındaki etkileşiminin sıvının hareketini elektrostatik olarak kontrol etmek üzere değiştirildiği sistemlerdir (Cheow vd., 2007). Pompa veya harici basınç kullanılmadan damlacıkların elektrotlar boyunca hareket ettirildiği ve manipüle edilebildiği bu sistemler çok basamaklı testlerin (örn. PCR ve ELISA) uzman kullanıcı gereksinimi olmadan tek basamakta ve portatif olarak gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Witters vd., 2014; Zhang & Nguyen, 2017).



Şekil 2. Nanoparçacık sentezinde sıklıkla kullanılan farklı mikro-reaktör örneklerinin şematik gösterimleri

Damlacık akış tabanlı sistemlerin sunduğu çeşitli avantajlar (örn., pek çok kimyasal reaktifle uyumlu yapısı, reaktiflerin damlacıklar içerisinde hızlı ve kontrollü biçimde karışmasına olanak sunması ve bu sayede reaksiyon sürelerinin büyük ölçüde kısalması, ve yüksek tekrarlanabilirliği) nanoparçacık sentez çalışmalarının gereksinimleriyle birebir örtüşmektedir (Sohrabi & Moraveji, 2020).

Mikro-reaktör tabanlı sistemlerinanoparçacık sentezinde kullanan örnek çalışmalar Tablo 2'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 2. Mikro-reaktör sistemler ile nanoparçacık (NP) sentezi

Akış türü	NP Türü	Parçacık Boyut	Sürfaktan	Referans
Sürekli	Fe_3O_4	20 nm	PEG[1]	(Jiao, Zeng, Jing, Liu, & Gao, 2015)
Damlacık	Fe_3O_4	9 nm	Kitosan	(Wahab & Erdem, 2020)
Dijital	Fe_3O_4	15 nm	---	(Frenz vd., 2008)
Damlacık	ZnO	17 nm	---	(Wang vd., 2014)
Dijital	SiO_2	170 nm	---	(Gutierrez, Gomez, Irusta, Arruebo, & Santamaria, 2011)
Sürekli	Ni	9 nm	PVP[2]	(Xu, Srinivasakannan, Peng, Zhang, & Chen, 2015)
Sürekli	Au	<50 nm	PVP[2]	(Wagner & Köhler, 2005)
Sürekli	Au, Ag	<5 nm	Tri-sodium citrate	(Singh, Shirolkar, Lalla, Malek, & Kulkarni, 2009)
Sürekli	Ag	6 nm	Trioctylamine	(Lin, Terepka, & Yang, 2004)
Sürekli	Ag	5 nm	SDS[3], CTAB[4]	(Patil vd., 2012)
Damlacık	Pd	<10 nm	PVP[2]	(Kim vd., 2013)
Damlacık	TiO_2	10 nm	Oleik asit	(Baruah, Singh, Sheoran, Prakash, & Ganguli, 2018)
Sürekli	Pd	5 nm	CTAB[4]	(Sharada vd., 2016)
Sürekli	PMMA[5]	<150 nm	Kopolimer	(Dobhal, Kulkarni, Dandekar, & Jain, 2017)

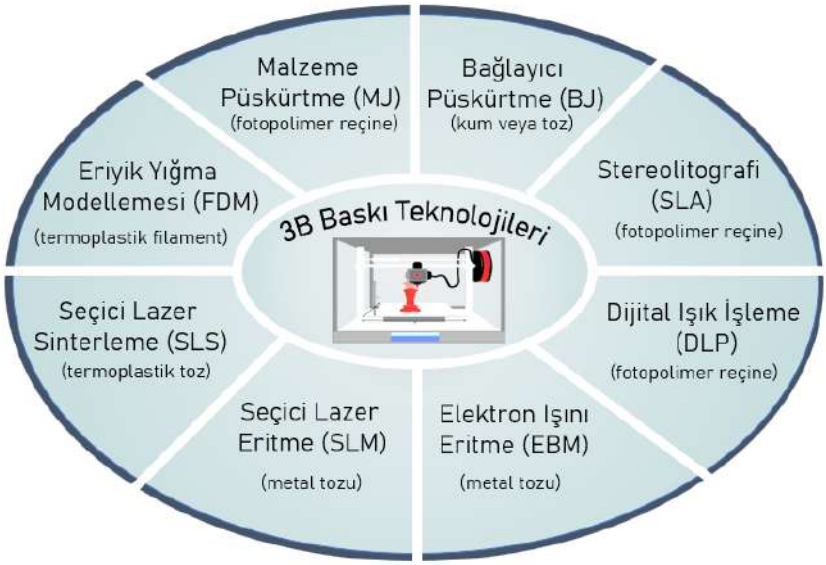
[1]PEG: Polietilen glikol; [2]PVP : Polivinilprolidon; [3]SDS: Sodyum dodesil sülfat; [4]CTAB:Setrimonyum bromür; [5]PMMA: Polimetil metakrilat

Mikro-reaktörler nanoparçacık sentezinde kullanılacak kimyasallara bağlı olarak polimer, reçine, metal, cam veya seramik malzemelerden yararlanılarak üretilebilmektedirler. Yaygın olarak kullanılan mikro-reaktör imalat teknikleri fotolitografi, ıslak dağlama, aşındırıcı püskürtme, mikro-enjeksiyonlu kalıplama, lazer kesim, sıcak baskı ve 3 boyutlu baskı olarak özetlenebilir. Bu bölümde eklemeli imalat olarak da adlandırılan 3B baskı teknolojisi üzerinde durulacak olup diğer tekniklere değinilmeyecektir.

3.2. 3B Baskı Teknolojisi ile Mikroakışkan Sistemlerin Üretimi

3B yazıcılar malzemelerin tasarım aşamasında sunduğu esneklik ve hassas kontrol imkânı dolayısıyla büyük ilgi görmekte ve farklı amaçlar için kullanımları yaygın olarak test edilmektedir. Hızla büyüyen 3B baskı teknolojisi geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan karmaşık geometrili mikroakışkan sistemlerin bilgisayar destekli tasarımına olanak sağlar (Bhattacharjee, Urrios, Kang, & Folch, 2016). Ek olarak tasarım ve pratik üretim arasındaki süreci kısaltarak mikroakışkan sistemlerin ucuz, hızlı ve etkin biçimde prototiplenmesini sağlayarak araştırma ve geliştirme sürecini büyük ölçüde hızlandırır (Bhattacharjee vd., 2016).Literatürde farklı 3B baskı teknolojilerinin sentez çalışmalarına yönelik mikroakışkan sistemlerin üretimi için kullanıldığı pek çok örnek çalışma bulunmaktadır(Amreen & Goel, 2021; Gyak vd., 2019; Ko, Gyak, & Kim, 2017; Wu, Bohan, & Torrente-Murciano, 2017). Mikroakışkan sistemlerin üretiminde kullanılabilen farklı 3B baskı teknolojileri Şekil 3'de sunulmuştur.

Bu yöntemler arasında püskürterek harç yığma tekniği (PolyJet), eriyik yığma modeli (FDM) ve tarayarak ışıkla kürleme tekniği (SLA) sundukları yüksek doğrulukta ve detayda üretim olanağı dolayısıyla mikroakışkan sistemlerin üretiminde öne çıkmaktadır. En yaygın olarak kullanılan 3B baskı teknolojilerinden biri olan FDM'nin sunduğu avantajların başında neredeyse tüm termoplastik polimerleri işleyebilmesi gelir (Gross, Erkal, Lockwood, Chen, & Spence, 2014). Yaygın olarak kullanılan baskı malzemeleri arasında polikaprolakton (PCL), polilaktik asit (PLA) ve poliglikolik asit (PGA) gibi farklı biyouyumlu yapılar yer almaktadır (Lynh & Pin-Chuan, 2018; Pranzo, Larizza, Filippini, & Percoco, 2018). Polyjet baskı teknolojisi sunduğu önemli avantajlardan biri birden fazla baskı malzemesinin eş zamanlı olarak üretimine izin veren çoklu-malzeme kullanım yeteneğidir (Gaynor, Meisel, Williams, & Guest, 2014).



Şekil 3. 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojileri

Literatürdeki yayın sayıları göz önünde bulundurulduğunda mikroakışkan cihazların fabrikasyonu için en yaygın olarak kullanılan yöntemin SLA olduğu görülmektedir (Gyimah, Scheler, Rang, & Pardy, 2021). Bunun en önemli sebebi SLA'nın sahip olduğu yüksek çözünürlüklü baskı yeteneği sayesinde mikroakışkan sistemlerin karmaşık geometrilerinin ve ince detaylarının yüksek doğrulukta/hassasiyette basılabiliyor oluşudur (Stampfl vd., 2008). SLA uzun yıllardır mikroakışkan cihazların doğrudan basımında veya Polidimetilsiloksan (PDMS)-tabanlı uygulamalar için kalıplarının fabrikasyonunda kullanılmaktadır.Günümüzde SLA-tabanlı mikroakışkan sistemler, çip üzerinde karıştırma, ayırma, kimyasal sentez ve reaksiyon gibi çok sayıda görevi gerçekleştirebilmekte ve sundukları küçük örnek hacmi, yüksek hassasiyet, kolay manipülasyon gibi avantajlar sayesinde geleneksel laboratuvar sistemlerine kıyasla inovatif platformlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

4. Gelecek Yönelimler ve Öncelikler

Nanomalzemeler teknolojik ve bilimsel açıdan büyük önem taşımakla birlikte geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Enerji, elektronik, tekstil, inşaat, gıda ve tarım alanlarındaki kullanımına ek olarak, nano-yapıların insan sağlığının iyileştirilmesine yönelik çeşitli teşhis ve tedavi uygulamalarını kapsayan nanotıp alanında da önemli gelişmeler yaşanmaya başlanmıştır(Barreto vd., 2011; Das, Sen, & Debnath, 2015; Gajanan & Tijare,

2018; Mazari vd., 2021). Tüm bu potansiyel kullanım alanlarına rağmen, şimdiye kadar endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere test edilen nanoparçacıkların boyut dağılımlarının (dolayısıyla fonksiyonel özelliklerinin) homojen olmaması, yüksek topaklanma eğilimi, düşük kolloidal kararlılık ve olası toksik etkiler bazı nanomalzeme grupları için (örn., metal oksitler) henüz çözülememiş önemli bir sorundur. Bu noktada nanoparçacıkların morfolojilerinin ve biyolojik kimliklerinin sentez parametrelerine bağlı olarak tahminlenmesine olanak sağlayan makine öğrenmesi yaklaşımları öne çıkmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemlerinin dizayn ve üretim sürecine dahil edilmesi potansiyel olarak nanoparçacıkların boyut ve yapı kontrollü bir biçimde sentezlenmesine olanak sağlar. Mikroakışkan teknolojisi ve makine öğrenme algoritmalarının entegrasyonu nanoparçacıkların kontrollü sentezi için büyük önem taşımakta ve yakın gelecekte örneklerinin artması beklenmektedir.

Nanoparçacıkların biyomedikal uygulamalardaki başarısı bağışıklık yanıtı veya immün sistem tepkisiyle doğrudan ilişkilidir. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan nano-yapılarının vücut içeresinde kalma süresinin minimum olması arzu edilirken biyomedikal uygulamalar (örn., nano-eklentili ilaç ve aşı çalışmaları) nanoparçacıkların hedef dokulara ulaşana ve hedeflenen aktiviteyi yerine getirene kadar herhangi bir bağışıklık tepkisi yaratmamalarını gerektirir. İnorganik nanomalzemelerin vücut tarafından hedef olarak algılanma sorunun ortadan kaldırılmasına yönelik alternatif yaklaşımlardan biri etraflarının doğal veya sentetik polimerler ile kaplanmasıdır. Polimer modifikasyonunun temel amaçları arasında agregasyonu ve bağışıklık sistemi tarafından hedef olarak algılanmayı önleyerek nanoparçacıkların homojen bir formda vücutta kalma sürelerinin arttırılması ve biyomedikal uygulamanın gerektirdiği biyolojik materyallerin bağlanabileceği forma dönüştürülmesi yer almaktadır. Bu noktada mikroakışkan sistemler sadece nano-boyutlu malzemelerin boyut ve morfoloji kontrollü biçimde üretimine değil, aynı zamanda yüksek kararlılıkta biyouyumlu bir yapı oluşturacak şekilde modifiye edilmesine de olanak sağlar.

Nanoparçacık sentezinde kullanılan mikroakışkan-temelli sistemlerin sağladığı bir diğer kolaylık akış profilinin reaksiyon koşullarına ve mikro-reaktör geometrisine bağlı olarak modellenmesine ve optimizasyonuna olanak sunmasıdır. Bu noktada mikro-reaktör içi akış profilinin simülasyonu ve kanal geometrisinin optimizasyonu homojen boyut dağılımına sahip nanoparçacıkların üretimi için büyük kolaylık sağlamaktadır. Akış simülasyonu ve modellemesi için en yaygın olarak COMSOL Multiphysics programı içerisinde yer alan hesaplamalı akışkanlar dinamiği araçları kullanılmaktadır. Bu noktada reaksiyon koşullarının optimizasyonuna olanak sağlayan makine öğrenmesi yöntemlerinin mikro-reaktör geometrisinin optimizasyonunu

kolaylaştıran akış simülasyonlarıyla entegrasyonu, nanoparçacıklarının mikro-akış koşullarında yüksek tekrarlanabilirlikte ve verimde eldesini mümkün kılmaktadır.

Nanomalzemeler fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle sentezlenebilmekte ve farklı uygulamaların gerektirdiği fonksiyonellik doğrultusunda modifiye edilebilmektedir. Nanomalzemeleri benzersiz ve teknolojik açıdan elverişli kılan fizikokimyasal özellikleri eş zamanlı olarak insan sağlığı ve çevre açısından daha önce karşılaşılmamış risklerin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu noktada nanomalzemelerin güvenliğinin dizayn aşamasında arttırılması ve riski minimuma indirecek formda üretimlerialanının sürekliliği ve insan sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB 118C229 nolu projenin sağladığı destekle tamamlanmış olup yazar TÜBİTAK'a verdiği destek için teşekkür eder.

KAYNAKÇA

1. Amreen, K., & Goel, S. (2021). Miniaturized and microfluidic devices for automated nanoparticle synthesis. *ECS Journal of Solid State Science and Technology, 10*(1), 017002.
2. Baig, N., Kammakakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances, 2*(6), 1821-1871.
3. Barreto, J. A., O'Malley, W., Kubeil, M., Graham, B., Stephan, H., & Spiccia, L. (2011). Nanomaterials: applications in cancer imaging and therapy. *Advanced Materials, 23*(12), H18-H40.
4. Baruah, A., Singh, A., Sheoran, V., Prakash, B., & Ganguli, A. K. (2018). Droplet-microfluidics for the controlled synthesis and efficient photocatalysis of TiO2 nanoparticles. *Materials Research Express, 5*(7), 075019.
5. Bhattacharjee, N., Urrios, A., Kang, S., & Folch, A. (2016). The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics. *Lab on a Chip, 16*(10), 1720-1742.
6. Boholm, M., & Arvidsson, R. (2016). A definition framework for the terms nanomaterial and nanoparticle. *NanoEthics, 10*(1), 25-40.
7. Cheow, L. F., Yobas, L., & Kwong, D.-L. (2007). Digital microfluidics: Droplet based logic gates. *Applied Physics Letters, 90*(5), 054107.
8. Convery, N., & Gadegaard, N. (2019). 30 years of microfluidics. *Micro and Nano Engineering, 2*, 76-91.
9. Das, S., Sen, B., & Debnath, N. (2015). Recent trends in nanomaterials applications in environmental monitoring and remediation. *Environmental Science and Pollution Research, 22*(23), 18333-18344.
10. Dellaquila, A. (2017). Five short stories on the history of microfluidics. *Everflow, https://www. elveflow. com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/history-ofmicrofluidics*.
11. Dobhal, A., Kulkarni, A., Dandekar, P., & Jain, R. (2017). A microreactor-based continuous process for controlled synthesis of poly-methyl-methacrylate-methacrylic acid (PMMA) nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry B, 5*(18), 3404-3417.
12. Feynman, R. P. (1959). *Plenty of Room at the Bottom.* Paper presented at the APS annual meeting.
13. Frenz, L., El Harrak, A., Pauly, M., Bégin-Colin, S., Griffiths, A. D., & Baret, J. C. (2008). Droplet-based microreactors for the synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. *Angewandte Chemie International Edition, 47*(36), 6817-6820.

14. Gajanan, K., & Tijare, S. (2018). Applications of nanomaterials. *Materials Today: Proceedings, 5*(1), 1093-1096.
15. Gaynor, A. T., Meisel, N. A., Williams, C. B., & Guest, J. K. (2014). Multiple-material topology optimization of compliant mechanisms created via PolyJet three-dimensional printing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 136*(6).
16. Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., & Spence, D. M. (2014). Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. In: ACS Publications.
17. Gutierrez, L., Gomez, L., Irusta, S., Arruebo, M., & Santamaria, J. (2011). Comparative study of the synthesis of silica nanoparticles in micromixer–microreactor and batch reactor systems. *Chemical Engineering Journal, 171*(2), 674-683.
18. Gyak, K.-W., Vishwakarma, N. K., Hwang, Y.-H., Kim, J., Yun, H.-s., & Kim, D.-P. (2019). 3D-printed monolithic SiCN ceramic microreactors from a photocurable preceramic resin for the high temperature ammonia cracking process. *Reaction Chemistry & Engineering, 4*(8), 1393-1399.
19. Gyimah, N., Scheler, O., Rang, T., & Pardy, T. (2021). Can 3d printing bring droplet microfluidics to every lab?—a systematic review. *Micromachines, 12*(3), 339.
20. Huh, D., Matthews, B. D., Mammoto, A., Montoya-Zavala, M., Hsin, H. Y., & Ingber, D. E. (2010). Reconstituting organ-level lung functions on a chip. *science, 328*(5986), 1662-1668.
21. Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology: History and future. *Human & experimental toxicology, 34*(12), 1318-1321.
22. Jiao, M., Zeng, J., Jing, L., Liu, C., & Gao, M. (2015). Flow synthesis of biocompatible Fe3O4 nanoparticles: insight into the effects of residence time, fluid velocity, and tube reactor dimension on particle size distribution. *Chemistry of Materials, 27*(4), 1299-1305.
23. Kim, Y. H., Zhang, L., Yu, T., Jin, M., Qin, D., & Xia, Y. (2013). Droplet-based microreactors for continuous production of palladium nanocrystals with controlled sizes and shapes. *Small, 9*(20), 3462-3467.
24. Ko, D.-H., Gyak, K.-W., & Kim, D.-P. (2017). Emerging microreaction systems based on 3D printing techniques and separation technologies. *Journal of Flow Chemistry, 7*(3-4), 72-81.
25. Kreyling, W. G., Semmler-Behnke, M., & Chaudhry, Q. (2010). A complementary definition of nanomaterial. *Nano today, 5*(3), 165-168.

26. Lin, X. Z., Terepka, A. D., & Yang, H. (2004). Synthesis of silver nanoparticles in a continuous flow tubular microreactor. *Nano letters, 4*(11), 2227-2232.
27. Lynh, H. D., & Pin-Chuan, C. (2018). Novel solvent bonding method for creation of a three-dimensional, non-planar, hybrid PLA/PMMA microfluidic chip. *Sensors and Actuators A: Physical, 280*, 350-358.
28. Manz, A., Graber, N., & Widmer, H. á. (1990). Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing. *Sensors and actuators B: Chemical, 1*(1-6), 244-248.
29. Mazari, S. A., Ali, E., Abro, R., Khan, F. S. A., Ahmed, I., Ahmed, M., . . . Mubarak, N. M. (2021). Nanomaterials: Applications, waste-handling, environmental toxicities, and future challenges–A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 9*(2), 105028.
30. Mulvaney, P. (2015). Nanoscience vs Nanotechnology Defining the Field. In (Vol. 9, pp. 2215-2217): ACS Publications.
31. Murty, B., Shankar, P., Raj, B., Rath, B., & Murday, J. (2013). Unique properties of nanomaterials. In *Textbook of nanoscience and nanotechnology* (pp. 29-65): Springer.
32. Patil, G., Bari, M., Bhanvase, B., Ganvir, V., Mishra, S., & Sonawane, S. (2012). Continuous synthesis of functional silver nanoparticles using microreactor: effect of surfactant and process parameters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 62*, 69-77.
33. Pranzo, D., Larizza, P., Filippini, D., & Percoco, G. (2018). Extrusion-based 3D printing of microfluidic devices for chemical and biomedical applications: A topical review. *Micromachines, 9*(8), 374.
34. Sharada, S., Suryawanshi, P. L., Kumar, R., Gumfekar, S. P., Narsaiah, T. B., & Sonawane, S. H. (2016). Synthesis of palladium nanoparticles using continuous flow microreactor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 498*, 297-304.
35. Singh, A., Shirolkar, M., Lalla, N. P., Malek, C. K., & Kulkarni, S. (2009). Room temperature, water-based, microreactor synthesis of gold and silver nanoparticles. *International journal of nanotechnology, 6*(5), 541.
36. Sitti, M., & Fearing, R. S. (2003). Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives. *Journal of adhesion science and technology, 17*(8), 1055-1073.
37. Sohrabi, S., & Moraveji, M. K. (2020). Droplet microfluidics: Fundamentals and its advanced applications. *RSC advances, 10*(46), 27560-27574.

38. Stampfl, J., Baudis, S., Heller, C., Liska, R., Neumeister, A., Kling, R., . . . Spitzbart, M. (2008). Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-resolution stereolithography. *Journal of Micromechanics and Microengineering, 18*(12), 125014.
39. Sudha, P. N., Sangeetha, K., Vijayalakshmi, K., & Barhoum, A. (2018). Nanomaterials history, classification, unique properties, production and market. In *Emerging applications of nanoparticles and architecture nanostructures* (pp. 341-384): Elsevier.
40. Teh, S.-Y., Lin, R., Hung, L.-H., & Lee, A. P. (2008). Droplet microfluidics. *Lab on a Chip, 8*(2), 198-220.
41. Terry, S. C., Jerman, J. H., & Angell, J. B. (1979). A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer. *IEEE transactions on electron devices, 26*(12), 1880-1886.
42. Tersoff, J., & Hamann, D. R. (1985). Theory of the scanning tunneling microscope. *Physical Review B, 31*(2), 805.
43. Tulinski, M., & Jurczyk, M. (2017). Nanomaterials synthesis methods. *Metrology and standardization of nanotechnology: protocols and industrial innovations*, 75-98.
44. Wagner, J., & Köhler, J. (2005). Continuous synthesis of gold nanoparticles in a microreactor. *Nano letters, 5*(4), 685-691.
45. Wahab, M. A., & Erdem, E. Y. (2020). Multi-step microfludic reactor for the synthesis of hybrid nanoparticles. *Journal of Micromechanics and Microengineering, 30*(8), 085006.
46. Wang, Y., Zhang, X., Wang, A., Li, X., Wang, G., & Zhao, L. (2014). Synthesis of ZnO nanoparticles from microemulsions in a flow type microreactor. *Chemical Engineering Journal, 235*, 191-197.
47. Witters, D., Sun, B., Begolo, S., Rodriguez-Manzano, J., Robles, W., & Ismagilov, R. F. (2014). Digital biology and chemistry. *Lab on a Chip, 14*(17), 3225-3232.
48. Wu, K.-J., Bohan, G. M. D. V., & Torrente-Murciano, L. (2017). Synthesis of narrow sized silver nanoparticles in the absence of capping ligands in helical microreactors. *Reaction Chemistry & Engineering, 2*(2), 116-128.
49. Xu, L., Srinivasakannan, C., Peng, J., Zhang, D., & Chen, G. (2015). Synthesis of nickel nanoparticles by aqueous reduction in continuous flow microreactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 93*, 44-49.
50. Yang, C. C., & Mai, Y.-W. (2014). Thermodynamics at the nanoscale: A new approach to the investigation of unique physicochemical properties

of nanomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 79*, 1-40.
51. Yao, X., Zhang, Y., Du, L., Liu, J., & Yao, J. (2015). Review of the applications of microreactors. *Renewable and sustainable energy reviews, 47*, 519-539.
52. Zhang, Y., & Nguyen, N.-T. (2017). Magnetic digital microfluidics–a review. *Lab on a Chip, 17*(6), 994-1008.
53. Zhao, C.-X., He, L., Qiao, S. Z., & Middelberg, A. P. (2011). Nanoparticle synthesis in microreactors. *Chemical Engineering Science, 66*(7), 1463-1479.
54. Zhong, Q., Ding, H., Gao, B., He, Z., & Gu, Z. (2019). Advances of microfluidics in biomedical engineering. *Advanced materials technologies, 4*(6), 1800663.

ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE XANTHAN GUM KULLANIMI

Dr. Öğretim Üyesi Çiğdem CEYLAN

Malatya Turgut Özal Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği
ORCİD: https://orcid.org/ 0000-0002-5961-3085

1. GİRİŞ

Zemin iyileştirmesi geoteknik mühendisliğinin en önemli uğraş alanlarından bir tanesidir. Problemli zeminlerin özelliklerinin hedeflenen tasarım parametrelerinin elde edilmesi amacıyla bir takım yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi geoteknik mühendisliğinde günümüzde sıklıkla başvurulan bir uygulama haline gelmiştir. Bu minvalde çalışmalar yürüten araştırmacılar ve uygulayıcılar çok farklı yöntem ve yaklaşımlara başvurmaktadırlar. Fiziksel, kimyasal, biyolojik yöntemler ile taşıma gücünün arttırılması, sıkışabilirliğin hedeflenen seviyeye getirilmesi, şişme potansiyelinin azaltılması, geçirgenliğin düşürülmesi,sıvılaşma potansiyelinin azaltılması, plastisite özelliklerinin iyileştirilmesi vb. yöntemler ana hatlarıyla zemin iyileştirme çalışmalarının konseptini oluşturmaktadır. Araştırmacılar özellikle yapısal ya da yapısal olmayan malzemeler ile zemini karıştırarak ya da bir arada kullanarak elde ettikleri kompozit ortam ile birçok stabilite problemini çözüme kavuşturabilmektedir. Bu kapsamda sıkılaştırma, drenaj, vibrasyon ve konsolidasyon gibi yerinde yapılan çalışmalar, geotekstil, geomembran gibi yeni nesil yapısal elemanların kullanımı, çimento, kireç, uçucu kül, atık malzemeler, EPSvb. gibi zemine doğrudan karıştırılan malzemeler ile zeminlerin zayıf özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik literatürde yer bulmuş önemli sayıda çalışma mevcuttur [1-6]. Zemin iyileştirme ile alakalı önceki çalışmaların önemli bir kısmı doğal hammaddelerin kullanımını gerektirirken, bu maddelerin sınırlı veya ulaşılma sorunu gibi nedenlerle son zamanlarda farklı katkıların kullanımı konusu da ciddi şekilde araştırılmaktadır.

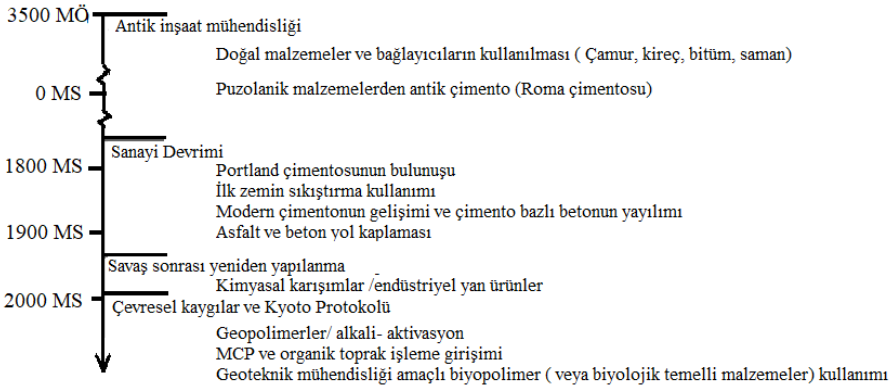
Zeminin zayıf olması durumunda; mekanik, biyolojik, kimyasal ve elektriksel işlemler gibi değişik zemin stabilizasyonu yöntemleri uygulanabilir[7]. Bu şekilde zeminin taşıma gücünün arttırılması, oturmanın azaltılması, şişme ve büzülmenin kontrolü, permeabilite kontrolü, sıvılaşma kontrolü gibi iyileştirmeler sağlanmış olur.

Kimyasal stabilizasyon işlemleri özellikle son yıllarda geoteknik uygulamalarda zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Zeminstabilizasyonunda en çok kullanılan ürün portland çimentosudur ancak çevresel kaygılar nedeniyle farklı yöntem kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, mikroorganizmalar tarafından üretilen biyopolimerlerin kullanımı, esas olarak biyolojik tıkanma yöntemi olarak adlandırılan zemin gözenek doldurma özelliği ilezemin iyileştirme için teknik bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır [8].

İnsanlık tarihi boyunca inşaat uygulamaları amacıyla toprağın kullanımı ve geliştirilmesi dikkat çekicidir. Eski çağlarda şehrin mimari yapısının oluşturulması amacıyla, güneşte kurutularak değişik formlarda tuğla yapımında

çamur kullanıldığı bilinmektedir [9].Yine Sümerler toprak duvarların dayanımını artırmak amacıyla bitümlü bağlayıcı malzeme kullanmışlardır [10]. Eski Mısır'da Nil Nehri'nin taşkınından korunmak amacıyla nehir setleri oluşturulmuştur [11].

Tarihi süreçlerde ihtiyaçlar arttıkça daha dayanımlı ve uzun süreli kullanıma uygun yapı malzemeleri arayışına girilmiştir. Volkanik kül gibi doğal puzolan malzemenin bulunmasıyla yapı malzemeleri daha dayanımlı hale gelmiştir. Eski Roma zamanında volkanik tozun alçı veya kireç gibi bir bağlayıcı ve agrega eklenmiş bir karışımla kemerler ve kubbeler gibi oldukça dayanıklı yapılar yapılmıştır [12].Sanayi Devrimi'nden sonra çimento en çok kullanılan yapı malzemesi haline gelmiştir[13,14]. Şekil 1'de geoteknik uygulamalarda kullanılan zemin malzemelerinin tarihi gelişimi verilmiştir[15].



Şekil.1 Geoteknik uygulamalarda kullanılan zemin malzemelerinin tarihi gelişimi [9]

Portland çimentosu dayanıklılığı, yüksek mukavemeti, işlenebilirliliği yanında maliyetinin düşük olması nedeniyle inşaat sektöründe oldukça çok tercih edilen bir malzemedir. Bütün bu olumlu özelliklerinin yanında çevre açısından bakıldığında bazı eksiklikleri vardır. Bunların başında CO_2emisyonu gelir. Çimento üretiminde gerekli olan kireçtaşının kalsinasyonu ve ısı enerjisi ile her bir ton çimento üretimi için yaklaşık bir ton CO_2 üretilir [8,16]. Çimentonun, dünya CO_2emisyonunun neredeyse %8'ini temsil ettiği, %3'ünün ise geoteknikuygulamalar sonucu oluştuğu bilinmektedir[15].

Daha yakın zamanlarda, zemin stabilizasyonu ve zemin mukavemet parametreleri ile yükleme kapasitesini artırmanın bir yolu olarak kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden daha fazla dikkat çekmektedir [17].

Kimyasal zemin stabilizasyon teknikleri, yol inşaatı, şev stabilizasyonu, erozyon kontrolü, temel ve dolgu arıtma ve kıyı şeridi iyileştirme dahil olmak üzere çoklu geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır [18,19]. Çimentonun olumsuz etkilerinin giderilebilmesi amacıyla zemin stabilizasyonu konusunda son zamanlarda yapılan çalışmalar daha çok polimerler gibi daha çevre dostu katkıların kullanılması şeklindedir.

Bu çalışmada, geleneksel olarak kullanılan çimento, bitüm, uçucu kül gibi malzemelere alternatif olarak değerlendirilen biyopolimerler ve özellikle Xanthan Gum (XG) biyopolimeri ve geoteknik uygulamalarda kullanımı incelenmiştir.

2. GEOTEKNİK UYGULAMALARDA KULLANILAN BİYOPOLİMERLER

Geoteknik uygulamalarda kullanılan çimento karışımlarının dayanımının yüksek olması nedeniyle uzun süre toprak ile temas halindedir. Bu durum bir süre sonra toprağın pH'ının yükselmesine,yeraltı sularının kirlenmesine, dolayısıyla çevresel sorunlara neden olabilir[20].Ayrıca, yüzey bitki örtüsünün büyümesini önlemek ve beton tozu da çimento kullanmanın diğer çevresel sakıncalarıdır. Çimentonun çevresel etkisini azaltmak amacıyla, geoteknik uygulamalarda çevreye daha duyarlı malzeme ve yöntemler araştırılmaya başlanmıştır [21, 22, 23].

Kimyasal yollarla zemin stabilizasyon yöntemleri arasında yaygın olarak kireç, bütümlü malzemeler ve çimento yanında endüstriyel ürün atıklarından yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi malzemeler de kullanılmaktadır[20, 24]. Geoteknik uygulamalarda kullanılan bu ve benzer katkı malzemeleri zeminin oturma, taşıma gücü gibi özellikleri üzerinde olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Ancak sonrasında CO_2, SO_2 ve NO_x gibi çevreye zararlı gazlar salgıladıklarından, zeminde toksit madde üretmeye yeraltı suyu ve yüzey sularının kirlenmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar daha çok doğal süreçlerle elde edilen veya üretilebilen malzemeleri denemeye başlamışlardır.Alternatif katkı malzemeleri arasında enzimler, polimerler, reçineler, asitler, silikatlar, iyonlar ve lignin türevleri gibi sıvı veya toz halindeki çeşitli kimyasallar yer alır [25, 26].Bunlar ya doğal olarak oluşurlar veyadoğal süreçlerle üretilebilirler.

Mikrobiyal geoteknoloji; mühendislik uygulamalarında mikrobiyolojik yöntemlerin uygulanmasıyla ilgilenen yeni bir geoteknik mühendisliği dalıdır [8, 27].Problemli zeminlerde, diğer katkılara alternatif olabilecek, özellikle doğal olarak elde edilen veya üretilen katkılar kullanılarak çevreye daha duyarlı çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda araştırmacılar yoğun olarak

biyopolimerlerle ilgilenmektedirler. Biyopolimerler canlı mikroorganizmalar tarafından üretilen ve çeşitli alanlarda kullanılan polimerlerdir [28].Bu katkılar, diğer kimyasal malzemelere alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Biyopolimerlerin zeminde kullanımları onların zemine zarar vermeden ortamda kararlı bir jel oluşturabilme yetenekleri ile ilgilidir [8].Zemin içerisinde yer alan boşlukları doldurabilmesi, farklı pH koşullarında duyarlı olabilmeleri gibi özellikleri ile zemin dayanım, geçirimlilik gibi özelliklerinde iyileşmeler sağlayabilmektedirler. Araştırmalar çoğu biyopolimerin özellikle kumlu zeminlerde kum taneleri arasındaki boşlukları vizkos hidrojel bir formda doldurarak, biyotıkanma sağladığı ve sonuçta daha dayanımlı, geçirimsiz bir ortam oluşturduklarını göstermiştir. Tablo 1'de geoteknik uygulamalarda kullanılan biyopolimerler verilmiştir.

2.1. Agar Gum

Agar Gum kırmızı alglerden veya kırmızı deniz yosunundan elde edilir. Agarların erime noktası 85-90°C ve jelleşme noktası ise 32-45°C'dir [29]. Agar Gum biyopolimerler arasında en yüksek mukavemeti sağlayandır [30].

Tablo.1 Geoteknik uygulamalarda kullanılan biyopolimerler [19, 33].

Biyopolimer	Kimyasal Formül	Özelliği	Zeminde etkisi
Agar Gum	$C_{14}H_{24}O_9$	• Isıtma ve soğutma ile tersine çevrilebilir jelleşme özelliği • Kalınlaştırıcı ajan, • 85C°'de kaynar suda çözünür ve 32-43 C°'ye soğutulduğunda jel oluşur, • Biyobozunma minimumdur, ancak katkı maddelerine karşı hassastır.	Dayanım, Boşluk doldurma, Erozyonu azaltma
Guar Gum	$C_{10}H_{14}N_5Na_2O_{12}P_3$	• Yüksek viskozite, • Soğuk suda hidrasyon, • Stabilizatör, • Kıvam artırıcı • Aşırı pH ve sıcaklıkta bozunma	Toz kontrolü, Dayanım, Enjeksiyon
Gellan Gum	$C_{24}H_{37}O_{20}$	• Isıtma ve soğutma ile tersine çevrilebilir jelleşme özelliği • Kalınlaştırıcı ajan, • Termal jelleşme davranışı	Dayanım, Boşluk doldurma Erozyonu azaltma
Dextran	$C_{18}H_{32}O_{16}$	• Esnek biyopolimer • Sulu ortamda geçirgenliği azaltır, • Emilgatör	Sondaj çamuru, Erozyonu azaltma
Beta-Glukan	$C_{18}H_{32}O_{16}$	• Isıtıldığında geri dönüşümsüz elastik jel, • Jelleştirici olarak kullanım	Dayanım Enjeksiyon, Betonda süper akışkanlaştırıcı
Kitosan	$C_{18}H_{35}N_3O_{13}$	• Kalınlaştırıcı, • Gübreler	Pıhtılaştırıcı etki, Sudaki ağır metallerin uzaklaştırılması
Starch	$C_{27}H_{48}O_{20}$	• Kıvam artırıcı stabilizatör, • Parçalayıcı, seyreltici yapıştırıcılar	Sondaj sıvısının yoğunluğunu artırmak, Dayanım, Erozyonu azaltma
Kazein	$C_{81}H_{125}N_{22}O_{39}P$	• Hidrofobik özellikler • Gıda, boya, yapıştırıcı, plastik ve tıbbi uygulamalarda kullanım	Dayanım, Su direnci, Hidrolik iletkenliğin azalması
XG	$C_{36}H_{58}O_{29}P_2$	• Artan viskozite • Yalancı plastik özellik	Sondaj çamuru inceltici, Dayanım

2.2. Guar Gum

Guar Gum bir polysakkarittir ve genel olarak; %75-85 galaktomannan, %8-14 nem, protein, lif ve külden oluşur [31]. Guar sakızı, diğer birçok biyopolimerden daha fazla çözülebilir ve daha fazla galaktoz dallanma noktasına sahip olduğundan daha iyi bir dengeleyicidir. Suda iyonik olmayan ve hidrokolloidaldir [32].

2.3. Gellan Gum

Polisakkarit grubundaki gellan sakızı, Sphingomonas elodea bakterisi tarafından üretilen yüksek moleküler ağırlıklı bir polimerdir [34, 35].Gellan Gum, uygun koşullar altında, ısıyla tersinir bir jel gibi davranır [36].

2.4. Kitosan

Kitosan, genellikle kitinin deasetilasyonundan elde edilen bir biyopolimerdir. Kitosan karides, yengeç, kril, kerevit ve ıstakoz gibi çeşitli kaynaklardan sentezlenir[37]. Kitosanın özellikleri ve uygulamaları doğrudan kitosanın asetilasyon derecesine ve moleküler ağırlığına bağlıdır [30,32]. Kitosan hidrofobiktir ve suda çözünmez ve sulama sırasında toprak erozyonunu azaltmak için etkili bir malzeme olarak [38].

2.5. Beta Glucan

β-glikozidik bağlarla bağlanan D-glikoz monomerlerinden oluşur ve bitkilerin selülozunda, tahıl kepeğinde ve maya, mantar, mantar ve bakteri gibi çeşitli organizmaların hücre duvarlarında doğal olarak bulunur[39].

2.6. Casein

Kazein, memeli sütünde bulunan bir fosfoprotein ailesidir. Sığır sütündeki proteinin %80'i kazeinden oluşmaktadır [39].

2.7. Xanthan Gum

XG, Xanthomonas campestris bakterisi tarafından üretilen, gıda ve farmasötik uygulamalarda kullanılan suda çözünür bir biyopolimerdir [15, 40].

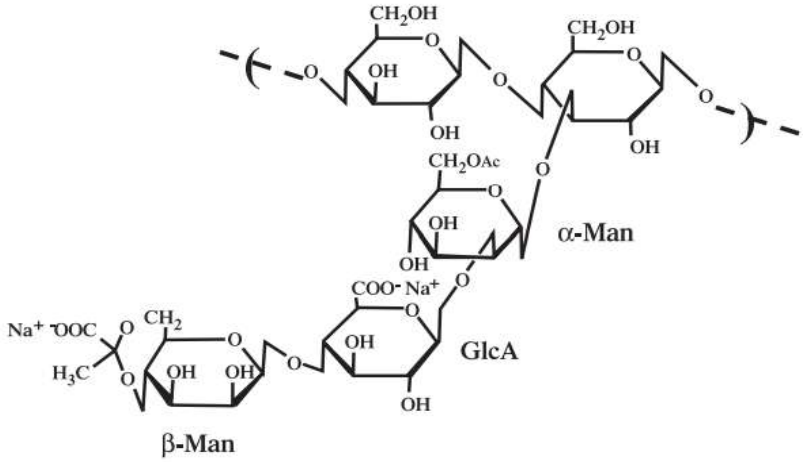
XG biyopolimerler; sıcak ve soğuk suda çözülebilir ve farklı sıcaklık ve pH gibi koşullarda oldukça kararlıdırlar. Çok düşük konsantrasyonlarda bile yüksek viskozite sergiledikleri bilinmektedir [41].

Termo jelleştirici biyopolimerler, 90 °C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta suda çözündüklerinde başlangıçta bir hidrokolloid faz oluştururlar ve daha sonra, 40 °C'nin altına soğutulduğunda önemli ölçüde artan viskoziteye sahip bir hidrojel fazına dönüşürler. Spesifik olarak, agar gum ve gellan gum gibi termo jelleşme biyopolimerleri zeminde önemli ölçüde güçlendirme sağlar [42].

3. XANTHAN GUM BIYOPOLİMERLERİ

3.1. Genel Özellikleri

XG; 1950'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı'nın Kuzey Bölgesel Araştırma Laboratuvarlarında (NRRL) keşfedilmiştir [43]. Glikoz veya sukrozun fermente edilmesinden elde edilen bir ekzosellüler polisakkarit olan XG, tekrar eden birimler olarak ortaya çıkan beş şeker kalıntısından oluşur. Yalancı plastik özellik gösteren XG az miktarda kullanıldığında bile vizkozite artırıcı özellik gösterirler [26].Bu özelliği ile sondajlarda duvar kalınlığını artırmak, betonda erozyonu önlemek gibi kullanım olanakları vardır [16].Şekil.2'de XG kimyasal yapısı verilmiştir.



Şekil.2 XG kimyasal yapısı [44]

XG en önemli özelliklerinden biri de hem soğuk hem de sıcak suyla karıştırılabilir olmasıdır. Ancak suyla karıştırıldığında viskoz bir hidrojel oluşturma kabiliyeti nedeniyle hala oldukça viskozdur. Bu viskoz hidrojel, su moleküllerinin XG oluşturan hidrojen bağları tarafından emilmesiyle üretilir[45].

3.2 Geoteknik Uygulamalardaki Etkileri

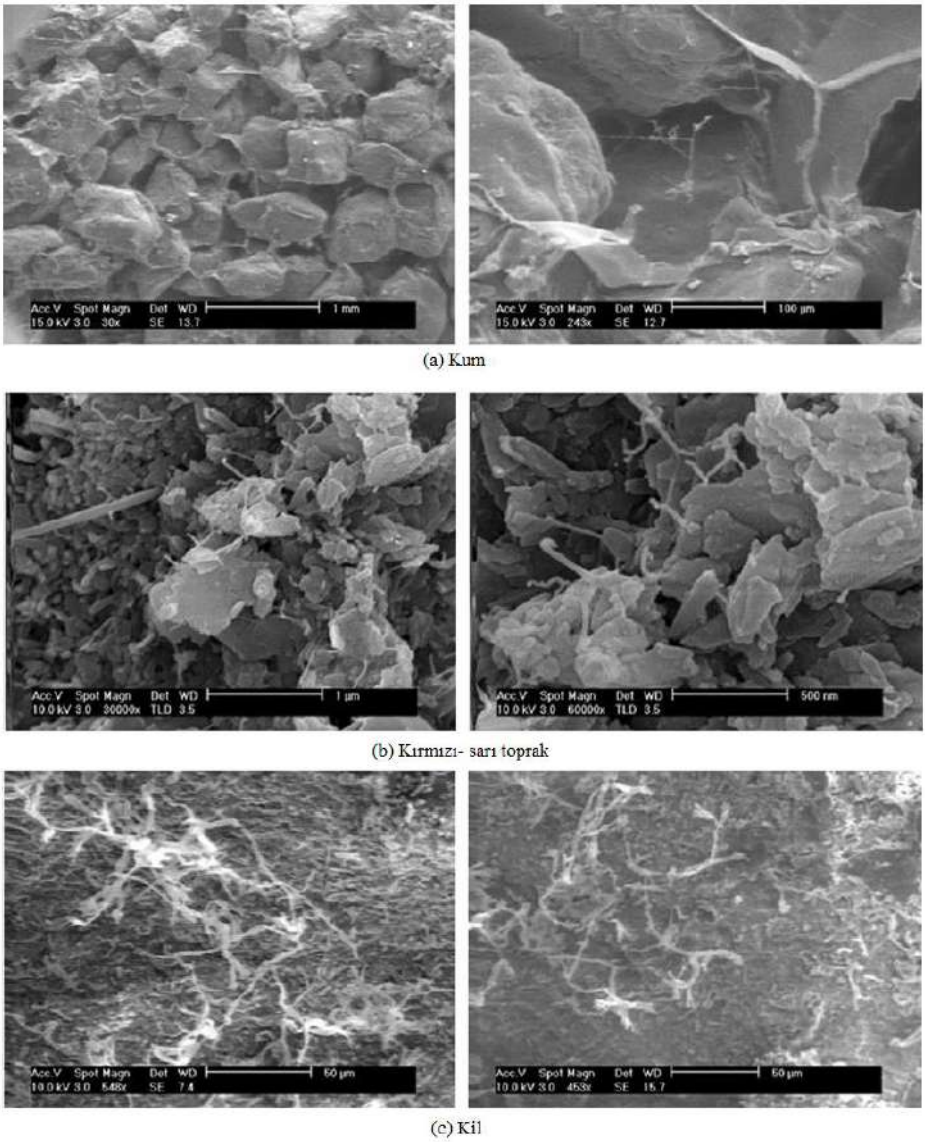
Sahip olduğu kendine has özellikleri ile XG; katkı maddesi olarak sondaj çamurlarında, tünel açma teçhizatındaki hafriyat çamurlarında, yıkanmayı en aza indirmek için betonda ve daha farklı birçok alanda araştırmacılar tarafından incelenmektedir [41]. Son yıllarda yapılan çalışmaların çoğu mekanik özelliklerin geliştirilmesi, permeabilitenin düşülmesi, erozyonun önlenmesi gibi konulara odaklanmaktadır. Yapılan çalışmaların çoğu olumlu sonuçlar vermiştir.

Uygun şartlarda XG'nin zemine ilavesi ile zemin ve XG arasında bir etkileşim başlar. XG, zemin taneleri ile şu şekilde etkileşime girer [26]:

- Zemin parçacıklarının toplanması,
- Polimerlerin iki değerlikli katyonlarla çapraz bağlanması,
- Hidrojen bağları yoluyla birbirine bağlı zemin-biyopolimer ağının oluşturulması ve katyon köprüleme,
- Çift tabaka kalınlığındaki değişiklik,
- Biyopolimer moleküllerinin ve katyonların toprak yüzeyinde, özellikle kil üzerinde tercihli adsorpsiyonu

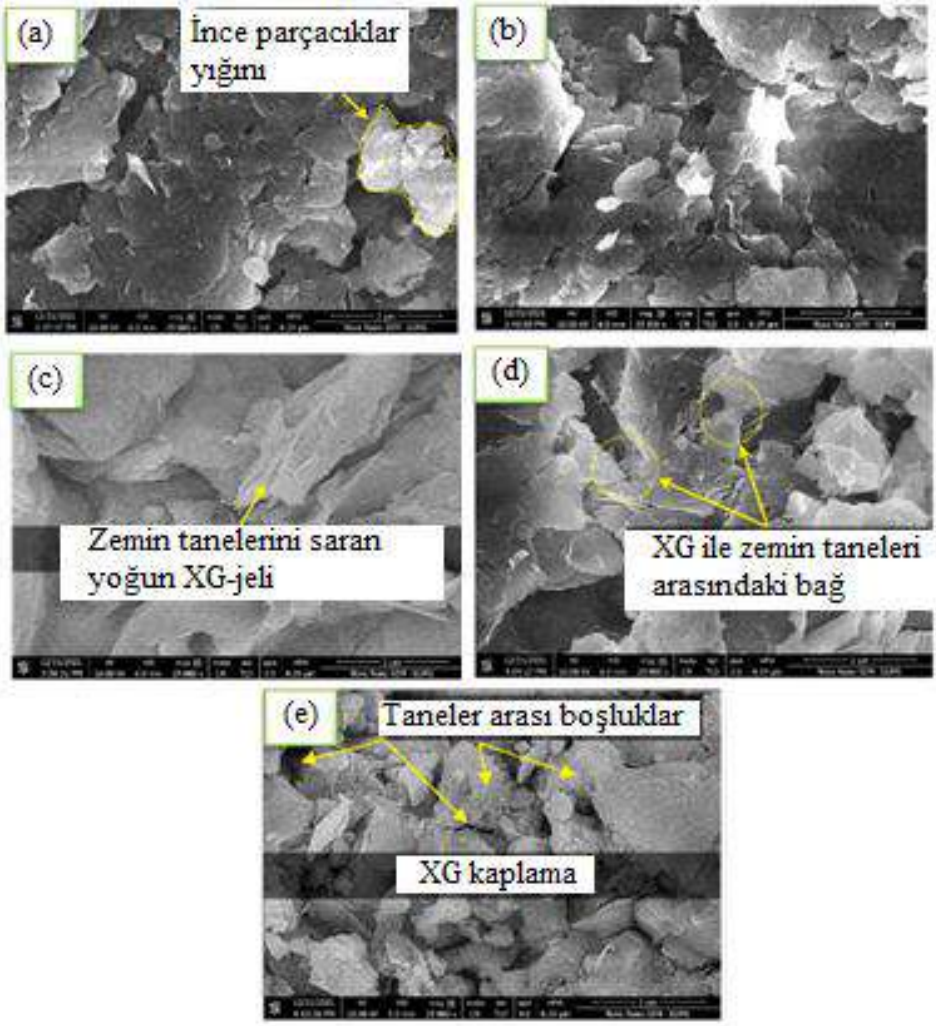
XG biyopolimeri zemin tanecikleri ile etkileşime girdiklerinde taneler arasında bir bağ oluşturur ki bu da zemin özellikleri üzerinde olumlu etki sağlar. Şekil.3'de farklı zemin türlerinde kullanılan XG karışımları SEM görüntüleri verilmiştir[16].

Şekil.3'de kum, kil ve kırmızı-sarı toprak ile XG karışımlarının SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil.3a'da XG, iri kum tanelerinin yüzeyini kaplayarak kum taneleri arasında daha önce var olmayan bir bağlantı oluşturmuştur. Ayrıca taneler arası temas yüzeyi de artmaktadır. Aynı özellik daha ince taneli kırmızı-sarı toprakta da oluşmuş, elektrik yüklü kil yaprakları ve ince taneli malzemeler arasında daha sıkı bir bağ meydana gelmiştir (Şekil 3b). Şekil.3c'de kil ve XG karışımı görülmektedir. XG kil yapraklarını sararak taneler arasında bir hizalama meydana getirmektedir. Yazarlar, tüm bu etkileşimlerin zemin karışımının mukavemetini artıracağı şeklinde yorum yapmışlardır [16].



Şekil.3 Farklı zemin türlerinde XG kullanımı[16].

XG ve zemin karışımlarında zemin türü yanında bir başka önemli konu da etkili XG oranını belirlemektir. Literatür taramalarında çoğunlukla XG'nin % 0-8 arası oranlarda kullanıldığı görülürken, etkili olduğu aralık yaklaşık %1-2 arasındadır. Şekil.4'de aynı zemin numunesinde farklı oranlarda kullanılan XG karışımları verilmiştir[46].



Şekil.4 Farklı XG içeriklerinde Zemin+XG karışımlarının SEM görüntüleri (XG oranları a:%0.5, b: %1, c: %1,5, d: %2, e: %5)[46]

Şekil.4'de CH olarak tanımlanmış bir zeminde, %0.5, %1, %1,5, %2 ve %5 oranlarında XG kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. SEM görüntülerine göre karışımlardaki XG miktarının artmasıyla yassı taneler topaklanmış tanelere dönüşme eğilimi göstermiştir. Zemin tanelerini saran XG, zeminde daha yoğun bir yapının oluşmasına neden olmuştur. Kısaca XG miktarı arttıkça zemin karışımı daha yoğun olma eğilimindedir[46].

XG; zemin stabilizasyonu, maden arama, erozyon, permeabilite kontrolü gibi geoteknik uygulamalarda en yaygın kullanılan biyopolimerlerden biridir [40].Orta sıcaklıklarda çözünme ile elde edilen XG çözeltileri oldukça viskoz

olma eğilimindedir [43].Hidrojen bağı ile su moleküllerini emdiğinden genellikle viskozite koyulaştırıcı olarak kullanılır. XG'in en iyi bilinen özelliği, geniş bir pH ve sıcaklık aralığında kararlı yalancı-plastisitesidir [16].Kumlu zeminlerde geçirgenliği artırmak ve su tutma özelliği ile erozyonu önlemek gibi özellikleri ile geoteknik uygulamalarda kullanılırlar [47]. Araştırmalar; XG'nin ince taneli iyi derecelenmiş zeminlerde daha iyi etki ve işlenebilirliliğe sahip olduğunugöstermektedir[48].Tablo.2'de XG kullanımının zemin üzerinde görülen etkileri verilmiştir.

Tablo.2 XG kullanımının zemin üzerindeki etkisi

XG Konsantrasyon (%)	Zemin üzerindeki etkisi	Kaynak
0-0,5-1-2	• Zemin çökme potansiyelinin %9'dan %1'e düşmesi • Zemin kayma geriliminde artma	[49]
0-0,5-1-1,5-2	• XG konsantrasyonun artmasına bağlı olarak γ_{dmax} değerlerinde azalma ve w_{opt} değerlerinde artma • Erozyona karşı dirençte artma • Tek eksenli basma dayanım değerlerinde artma • Şişme ve sıkışma indeks değerlerinde azalma • Permeabilite katsayısında düşme	[50]
0-0,5-1-1,5	• Permeabilite değerinde düşme • Boşluk oranında (e) azalma • Tek eksenli basma dayanım değerlerinde artma	[51]
0-0,2-0,5-0,8-1	• %5 XG içeriğine kadar PI değerlerinde artma • Şişme basıncı, diferansiyel serbest şişme değeri ve hidrolik iletkenlik değerlerinde azalma.	[52]
	• Permeabilite değerlerinde düşme • Su tutma özelliğinde artma	[53]
	• Permeabilite değerlerinde düşme • Boşluk oranında (e) azalma	[44]
0,5-1,0	• Permeabilite değerlerinde düşme • Boşluk oranında (e) azalma	[54]

Biyopolimerlerin çevre dostu ve kolay elde edilebilir olması nedeniyle geoteknik uygulamalarda bu tip malzemelerin kullanım olanaklarının araştırılması son yıllarda oldukça ön plana çıkmaktadır. Yapılan çalışmalarda zemin içerisinde yer alan boşlukların tıkanması ile zeminde geçirimliliğinazaldığı, dolayısıyla erozyonun azaltılabildiği görülmüştür [50].

Joga ve diğerleri [50] yaptıkları bir çalışmada toprağın dağılma özelliğini gidermek amacıyla farklı oranlarda XG kullanmıştır. Toprağın sodyum içeriğini düşürmesi nedeniyle dağılma özelliğinde iyileşme gerçekleşmiş ve erozyon direnci artarken dayanım özelliğinde de iyileşme gözlenmiştir. Yazar %1XG içeriğinin bu tür zeminlerde optimum içerik olduğunu belirtmiştir.

Ayeldeen ve diğerleri [49]yaptıkları çalışmada, çökme eğilimindeki zeminde biyopolimer kullanarak mekanik özellikleri üzerindeki değişimi incelemişlerdir. Zeminlerin çökme potansiyelinin; boşluk oranı, yoğunluğu, zeminin sıkılığı, su içeriği gibi bazı özellikleri ile ilgili olduğunu belirten araştırmacılar, soğuk suda çözünme özelliği, pH kararlılığı, iyonik tuz uyumluluğu gibi nedenlerle XG kullanmışlardır. Sonuçta yazarlar; sadece %2 XG kullanımı ile zeminin çökme potansiyelinin %9'dan %1'e düştüğü, artan XG konsantrasyonu ile zeminin kayma geriliminin arttığını belirtmişlerdir.

Çabalar ve diğerleri [54] yaptıkları çalışmada 0,075-1mm arası tane boyuna sahip kum ve XG karışımını kullanarak, geçirimlilik, boşluk oranı, tek eksenli basma dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Farklı oranlarda (0-0,5-1-1,5%) kullandıkları XG karışımlarında, konsantrasyon arttıkça numunelerin geçirimlilik özelliklerinde ve boşluk oranlarında azalma gerçekleşmiş, tek eksenli basma dayanım değerlerinde ise artma gözlenmiştir[54].

Im, J., Tran, ve diğerleri [55] yaptıkları bir çalışmada depremle alakalı zemin hasarlarını önlemede XG kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Chang ve ark. [16] yaptıkları çalışmada, ince kil parçacıkları ile XG kullanımının mukavemeti arttırdığını, XG kullanımının ince parçacıklarla daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Bouazza ve diğerleri [54] yaptıkları çalışmada siltli-kumlu zemin ile XG karışımında permeabilite özelliğindeki değişimi incelemişlerdir. Başlangıçta $1x10^{-6}$m/s olan permeabilite değeri, karışım sonucunda $1x10^{-10}$m/s değerine düşmüş ve yazarlar bunu XG biyopolimerinin üstün tıkama özelliğine bağlamışlardır.

Son yıllarda birçok araştırmacı XG kullanımında, zemin türü, tane boyu, XG karışım oranı gibi birçok konuda çalışmalar yapmaktadır. Tablo.3'de XG kullanımı ile zemin özellikleri üzerindeki değişimlere örnek verilmiştir.

Tablo.3 XG kullanımı ile zemin özellikleri üzerindeki değişimler

XG (%)	k ($cmsn^{-1}$)	OMC (%)	MDD ($grcm^{-3}$)	ϕ (°)	C (kPa)	q_u (MPa)	Kaynak
0				38,30	4,10	2,50	[56]
0,5				38,40	22,80	1,90	
1				35,50	27,60	1,20	
2				33,70	32,60	0,90	
0				27,90	13,00		[57]
0,5				31,50	34,30		
1				31,80	50,20		
2				32,50	92,60		
0	5,60E-03	24,00	1,83				[50]
0,5	1,65E-03	12,50	1,71				
1	4,52E-04	9,00	1,66				
1,5	3,52E-04	6,50	1,64				
2	5,63E-05	5,00	1,62				
0		12,30	19,00				[49]
0,5		13,00	18,60				
1		13,75	17,75				
2		14,00	17,30				
0,5	3,00E-10	12,40	20,10				[54]
1	2,00E-10	14,20	20,10				

k: permeabilite katsayısı, OMC: optimum su içeriği, MDD: maksimum kuru birim hacim ağırlık, qu: taşıma gücü, ϕ: içsel sürtünme açısı, c: kohezyon

Huang ve diğerleri 2021'de yaptıkları çalışmada biyopolimerleri ve mühendislik uygulamalarındaki sonuçları derlemişlerdir. Yazarlar zemin uygulamalarında değişen oranlarda XG kullanarak farklı zemin karışımlarında sıkışma dayanımının arttığını belirtmişlerdir [19]. Tablo 4'de farklı zemin türleri ile,değişen XG karışım oranlarında elde edilen numunelerin sıkışma dayanımı değerleri verilmiştir. Yazarlar yapılan çalışmaların çoğunda numunelerin kuru durumda test edildiğine dikkat çekmiş ve bu durumun zeminin doğal koşullarını temsil etmediğine dikkat çekmişlerdir [19].

Tablo. 4'de XG kullanılarak denenen tüm zemin türlerinde sıkışma dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. Kil türü zeminlerde 28 günlük kürlenme sonunda elde edilen dayanım değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Özellikle yüksek plastik (CH) gibi killerde XG'nin tane yüzeyini sarması ile XG miktarı arttıkça dayanım değeri 3-8 katına kadar çıktığı görülmektedir.Kum, silt gibi zeminlerde başlangıçta olmayan taneler arası bağ XG kullanımı ile sağlanmıştır. XG miktarı arttıkça dayanım değerlerinin artması buna bağlanabilir. Tüm numunelerde kullanılan XG miktarı 0,5-3 % arasındadır.

Tablo 4. XG karışım numunelerinin sıkışma dayanım değerleri [19]

XG (%)	Zemin Türü	Sıkışma Dayanımı (kPa)
0.5, 1, 1.5, 2, 3	CL	470,52-569,55 (7gün)
		612,74-823,19 (28gün)
0.5, 1, 1.5	Lateritik Toprak	220,00-335,00 (7gün)
0.5, 1, 1.5, 2, 2.5	Organik zemin	15,00-100,00
	Bentonit	286,00-2580,00
	Kaolinit	150,00-1180,00
0.5, 1, 1.5, 2, 2.5	CH	600,00-1800,00 (7gün)
		600,00-2941,00 (28gün)
1, 1.5, 2	SM	4200,00-4900,00 (28gün)

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, son yıllarda oldukça dikkat çeken uygulamaları olan XG biyopolimerin geoteknik uygulamalarda kullanımı incelenmiştir. XG kullanımı ile yapılan çalışmalar çevreye herhangi bir zarar vermeden, zeminin geçirgenlik, dayanım, sıkışabilirlik gibi özellikleri üzerinde olumlu etki oluşturduğunu göstermektedir. Farklı zemin türleri ile çok az miktarda (genellikle %0.5-6 arası oranlarda) karıştırılmasına rağmen, XG-zemin karışımlarının dayanım özellikleri oldukça artmaktadır.Zemin gözenek boşluklarının XG ile dolmasıyla (biyotıkanma), zemindayanımı ve kohezyonunu artarken ve geçirgenlik katsayısınınazaldığı bir bariyer oluşmaktadır.

XG kullanımı ile kumlu zeminlerdesıvılaşma riskinin azaldığı, dayanımın arttırdığı görülmektedir. Kumlu bir zeminde %0,5-2 oranında XG kullanımı ile dayanım 2 katına kadar çıkabilmektedir. Yine killi zeminlerde taneleri saran XG ile şişme, oturma sorunlarında düzelme görülürken, dayanımın artması dikkat çekicidir.

Doğru zemin türü ve doğru oranda XG kullanımı ile zemin dayanım ve geçirimlilik özelliklerinde iyileşme sağlanmasına rağmen, bazı zemin türlerinde veya koşullarında hala elverişliliğine ilişkin yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır.Geoteknik uygulamalarda yapılan çalışmalarda doğal şartlara yakın koşullarda denemelerin yapılması ve pratik uygulamalarının olması esastır.Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda özellikle karışımların hazırlanması aşamalarında bu durum çoğu kez gerektiği kadar dikkate alınamamıştır. Gelecekte yapılan çalışmalarda, özellikle zeminin doğal koşullarına yakın şartlarda XG kullanımının denenmesi, ayrıca laboratuvar ortamı yanında arazide pratik olarak uygulanabilir olup olmadığı hakkında daha fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Keskin, İ.,& Kahraman, S. (2022). Stabilization of swelling soil by lime, fly ash, and calcium carbide residue. Arabian Journal of Geosciences, 15(10), 1-12.
2. Kulkarni, P. P.,& Mandal, J. N. (2022). Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material. Construction and Building Materials, 314, 125363.
3. Sinha, P., Anusha Raj, K., Kumar, S., & Singh, D. (2023). Mechanical Behavior of Geotextile and Geogrids on Soil Stabilization: A Review. Recent Advances in Mechanical Engineering, 299-308.
4. Edinçliler, A.,& Yildiz, O. (2018). Seismic behavior of tire waste-sand mixtures for transportation infrastructure in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions, 7(5), 626-631.
5. Yıldız, O. (2012). Investigation on the mitigation of earthquake hazards with inclusion of tire wastes into the sand (Doctoral dissertation, MSc Thesis, Boğaziçi University).
6. Yıldız, Ö. (2022). Sustainable Practices in Geotechnics. Sustainable Current Approaches in Architectural Science and Technology, 207.
7. Edinçliler, A.,& Yildiz, O. (2022). Effects of processing type on shear modulus and damping ratio of waste tire-sand mixtures. Geosynthetics International, 1-20.
8. Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S. L., & Chindaprasirt, P. (2018). High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. Journal of hazardous materials, 341, 257-267.
9. Mendonça, A., Morais, P. V., Pires, A. C., Chung, A. P., & Oliveira, P. V. (2020). A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties. Applied Sciences, 11(1), 170.
10. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. Sustainability, 8(3), 251.
11. Potts, D. T. (1997). Mesopotamian civilization: the material foundations. Cornell University Press.
12. Kemp, B. J. (2018). Ancient Egypt: anatomy of a civilization. Routledge.
13. Delatte, N. J. (2001). Lessons from Roman cement and concrete. Journal of professional issues in engineering education and practice, 127(3), 109.
14. Murphy, E. M.,& Ginn, T. R. (2000). Modeling microbial processes in porous media. Hydrogeology Journal, 8(1), 142-158.

15. Ivanov, V.,& Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 7(2), 139-153.
16. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. Sustainability, 8(3), 251.
17. Chang, I., Im, J., Prasidhi, A. K., & Cho, G. C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. Construction and Building Materials, 74, 65-72.
18. Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2018). Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil. Soils and foundations, 58(3), 716-728.
19. Ma, L., Hu, S., Hu, B., Shen, J., & Wang, Y. (2014). Activating flux design for laser welding of ferritic stainless steel. Transactions of Tianjin University, 20(6), 429-434.
20. Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. Construction and Building Materials, 305, 124685.
21. Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2016). Stabilization of recycled demolition aggregates by geopolymers comprising calcium carbide residue, fly ash and slag precursors. Construction and Building Materials, 114, 864-873.
22. Chang, I.,& Cho, G. C. (2012). Strengthening of Korean residual soil with β-1, 3/1, 6-glucan biopolymer. Construction and Building Materials, 30, 30-35.
23. Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., & Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. Construction and Building Materials, 24(8), 1462-1468.
24. Fatehi, H., Abtahi, S. M., Hashemolhosseini, H., & Hejazi, S. M. (2018). A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening. Construction and Building Materials, 167, 813-821.
25. Antonette, J., Donza, J., Jaradat, K. A., Darbari, Z., & Abdelaziz, S. L. (2019, March). Filler-stabilized xanthan gum for soil improvement. In Geo-Congress 2019: Soil Improvement (pp. 125-133). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
26. Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., & Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with

biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer. J. Mater. Civ. Eng, 29(2), 04016204.
27. Sujatha, E. R., Atchaya, S., Sivasaran, A., & Keerdthe, R. S. (2021). Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum—an eco-friendly alternative to traditional stabilizers. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(2), 1157-1167.
28. Ivanov, V.,& Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 7(2), 139-153.
29. Tusnim, J., Hoque, M. E., & Biswas, M. C. (2020). Biopolymers in Building Materials. In Advanced Processing, Properties, and Applications of Starch and Other Bio-Based Polymers (pp. 185-195). Elsevier.
30. Rhein-Knudsen, N., Ale, M. T., & Meyer, A. S. (2015). Seaweed hydrocolloid production: an update on enzyme assisted extraction and modification technologies. Marine drugs, 13(6), 3340-3359.
31. Smitha, S.,& Sachan, A. (2016). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of sabarmati sand. International Journal of Geotechnical Engineering, 10(4), 387-400.
32. Cao, J., Jung, J., Song, X., & Bate, B. (2018). On the soil water characteristic curves of poorly graded granular materials in aqueous polymer solutions. Acta Geotechnica, 13(1), 103-116.
33. Ayeldeen, M. K., Negm, A. M., & El Sawwaf, M. A. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. Arabian Journal of Geosciences, 9(5), 1-13.
34. Chang, I., Lee, M., Tran, A. T. P., Lee, S., Kwon, Y. M., Im, J., & Cho, G. C. (2020). Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. Transportation Geotechnics, 24, 100385.
35. Sabadini, R. C., Martins, V. C., & Pawlicka, A. (2015). Synthesis and characterization of gellan gum: chitosan biohydrogels for soil humidity control and fertilizer release. Cellulose, 22(3), 2045-2054.
36. Chang, I.,& Cho, G. C. (2019). Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay. Acta Geotechnica, 14(2), 361-375.
37. Losini, A. E., Grillet, A. C., Bellotto, M., Woloszyn, M., & Dotelli, G. (2021). Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization–a review. Construction and Building Materials, 304, 124507.

38. Hataf, N., Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. Journal of Cleaner Production, 170, 1493-1500.
39. Shariatmadari, N., Reza, M., Tasuji, A., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2020). Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization.
40. Cho, G. C.,& Chang, I. (2018, August). Cementless soil stabilizer–biopolymer. In Proceedings of the 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18) Songdo Convensia, Incheon, Korea (pp. 27-31).
41. Chang, I., Kwon, Y. M., Im, J., & Cho, G. C. (2019). Soil consistency and interparticle characteristics of xanthan gum biopolymer–containing soils with pore-fluid variation. Canadian Geotechnical Journal, 56(8), 1206-1213.
42. Cabalar, A. F., Awraheem, M. H., & Khalaf, M. M. (2018). Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer. Journal of materials in civil engineering, 30(8), 04018170.
43. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. Canadian Geotechnical Journal, 53(10), 1658-1670.
44. Garcıa-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. Biotechnology advances, 18(7), 549-579.
45. Khachatoorian, R., Petrisor, I. G., Kwan, C. C., & Yen, T. F. (2003). Biopolymer plugging effect: laboratory-pressurized pumping flow studies. Journal of Petroleum Science and Engineering, 38(1-2), 13-21.
46. Krishna Leela, J.,& Sharma, G. (2000). Studies on xanthan production from Xanthomonas campestris. Bioprocess Engineering, 23(6), 687-689.
47. Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Ameer, M. F., & Ijaz, Z. (2022). Geotechnical properties of problematic expansive subgrade stabilized with xanthan gum biopolymer. Road Materials and Pavement Design, 1-15.
48. Jang, J. (2020). A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. Advances in Materials Science and Engineering, 2020.
49. Chang, I., Prasidhi, A. K., Im, J., & Cho, G. C. (2015). Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. Construction and Building Materials, 77, 430-438.

50. Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 9(2), 329-339.
51. Joga, J. R.,& Varaprasad, B. J. S. (2020). Effect of xanthan gum biopolymer on dispersive properties of soils. World Journal of Engineering.
52. Cabalar, A. F., Wiszniewski, M., & Skutnik, Z. (2017). Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 54(5), 356-361.
53. Singh, S. P.,& Das, R. (2020). Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer. Geomechanics and Geoengineering, 15(2), 107-122.
54. Mendonça, A., Morais, P. V., Pires, A. C., Chung, A. P., & Oliveira, P. V. (2020). A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties. Applied Sciences, 11(1), 170.
55. Bouazza, A., Gates, W. P., & Ranjith, P. G. (2009). Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand. Géotechnique, 59(1), 71-72.
56. Im, J., Tran, A. T., Chang, I., & Cho, G. C. (2017). Dynamic properties of gel-type biopolymer-treated sands evaluated by Resonant Column (RC) tests. Geomech. Eng, 12(5), 815-830.
57. Lee1a, S., Im, J., Cho, G. C., & Chang, I. (2019). Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer-treated sands. Geomechanics and Engineering, 17(5), 445-452.
58. Lee, S., Chang, I., Chung, M. K., Kim, Y., & Kee, J. (2017). Geotechnical shear behavior of xanthan gum biopolymer treated sand from direct shear testing. Geomechanics and Engineering, 12(5), 831-847.

JEOTERMAL ALANLARIN JEOLOJİK, JEOKİMYASAL VE JEOFİZİKSEL YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Dr. Didem KIRAY[1]
Dr. Öğr. Gör. Oya CENGİZ[2]

[1]Barbaros Mh. Hacı Mustafa Bey Cd. No:12, 17100, Çanakkale, Türkiye, ORCİD ID: 0000-0002-4187-7285
[2]Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, ORCİD ID: 0000-0003-1363-4638

1. Giriş

Jeotermal enerji, yerkabuğundan iletken ve konvektif süreçlerle yüzeye aktarılan dünyanın doğal ısısıdır. Bu süreçler nedeniyle yerkabuğundaki sıcaklık genellikle ~30 °C/km derinlikte artar ve ~3 km derinlikte 105°C' ye yakın bir sıcaklıkta olmalıdır. Jeotermal enerji, genellikle birkaç kilometre derinlikte bulunan magma yığınlarından salınan ısı ile temsil edilir. Bu doğal termal kaynak, üst üste gelen kayaların içerdiği suların konvektifsirkülasyonunu tetikler. Böylece, bu sıvılar yeryüzüne doğru yükselir ve nispeten sığ rezervuarlarda depolanır. Bu jeotermal rezervuarlar, genellikle sığ derinliklerde bulunan soğuk sulardan, ya esas olarak geçirimsiz katmanlarla ya da zayıf geçirgenliğe sahip-sızdırmazlık olgusundan kaynaklanan kayalarla ayrılır. Jeotermal sistemler, jeolojik ortamlarına göre ya aktif volkanizma ya da güncel magmatizma alanlarında yer alan sistemler ya da diğer jeolojik ortamlarda bulunan sistemler olmak üzere ikiye ayrılır [1].

Konvansiyonel elektrik enerjisi üretimi için kullanılan yüksek sıcaklıklı (>~180°C) jeotermal sistemler çoğunlukla birinci gruba girerken, doğrudan kullanım için kullanılan jeotermal sistemler her iki gruba da aittir. Çoğu aktif volkan, kabuksal ve okyanusal levhaların kenarları boyunca yer aldığından, bu levha kenarlarına yakın yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde bulunur. Yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar, normalden fazla ısı akışının olduğu bölgelerde Geç Tersiyer ve Kuvaternervolkanizma ve tektonizma ile yakın bir ilişkiye işaret etmektedir. Volkanizma, tektonizma ve yüksek ısı akışının varlığı, potansiyel üretime sahip çoğu jeotermal sistem için çok elverişlidir[2]. Jeotermal sistemlerde magmatik katkıların varsayıldığından çok daha önem teşkil eder [3]. Ayrıca, okyanusal yükselmelerin ve kıtasal yarık bölgelerinin [4] gerilimli volkanik tektonik ortamları ve sıkışmalı orojenik kuşakların ve ada yaylarının iç tarafları (içbükey taraflar) [5], en büyük pozitif jeotermal anomalilerin bulunduğu alanları barındırması olasılıklıdır [1].

Jeotermal aramalarda, jeolojik çalışmalar, jeokimyasal çalışmalar ve çeşitli jeofizik teknikler birbirleriyle ilişkili şekilde kullanılmaktadır. Bir arama çalışmasına başlamadan önce, muhtemel jeotermal alanda ve çevresinde yapılan önceki araştırmalardan, topografik, jeolojik, yapısal ve varsa jeotermal haritalardan bilgi edinilmelidir. Ayrıntılı literatür çalışmalarından elde edinilen bilgilere dayanarak saha uygulamaları için planlama yapılır. Sahada yapılacak aramalarda, kapsamlı jeolojik ve jeokimyasal çalışmaları, yerçekimi, manyetik ve özdirenç araştırmaları dahil bir dizi jeofizik yöntemi gerektirir. Bu entegrejeobilimsel çalışmaların yorumlanması, arama sondaj programları için hedeflerin önceliklerinin belirlenmesine yol açar. Bu erken aşamalarda sağlam

bilimsel yöntem ve analizin uygulanması, sonraki sondaj ve geliştirme ile başarı olasılığını artırır [6].

Jeolojik yaklaşım genellikle sistemin çeşitli litolojilerini, volkanolojik evrimini, yapısal kontrollerini ve hidrolojik rejimlerini anlamayı amaçlar. Jeokimyasal arama, akışkanların özelliklerini belirlemek, denge rezervuar sıcaklığını tahmin etmek, kaynağı belirlemek, karıştırma senaryolarını değerlendirmek, akışkanların amaçlanan kullanım için uygunluğunu belirlemek ve yerini belirlemek için çoğunlukla yeniden biriktirme alanları, sıvı akış yönü ve termal belirtiden su, buhar ve gazın örneklenmesi ve bunların analizine dayanır. Jeofizik metotlarla arama, ısı kaynaklarının, rezervuarın ve örtü kayanın geometrisinin (şekil, boyut ve derinlik) belirlenmesine yardımcı olur. Aynı zamanda, jeotermal sistemden sorumlu yapıları görüntülemeyi ve jeotermal kaynağın alansal kapsamını belirlemeyi amaçlar. Bu yöntemler, sırasıyla özdirenç/elektriksel iletkenlik, yoğunluk, manyetik duyarlılık, elastik modül/hız gibi kayaların çeşitli içsel özelliklerine bağlıdır [7].

2. Arama Metotları

Jeotermal enerji aramalarında jeolojik, jeokimyasal, çeşitli jeofizik teknikler kullanılmaktadır.

2.1. JeolojikÇalışmalar

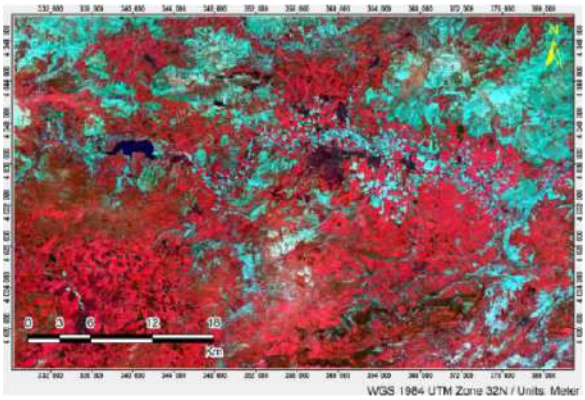
Jeolojik araştırmalarda her zaman belli başlı litolojik birimler, tektonizma ve volkanizma gibi seçilen olasılıkların ön haritalaması yapılır. Kaplıcalar, fumeroller vb. gibi termal yüzey belirtilerin ve jeotermal alterasyonun yüzey üzerindeki detaylı haritalaması yapılır [6].

Muhtemel bir jeotermal alanın jeolojisi hakkında iyi bir anlayışa sahip olmadan, arama tam bir tahmin işidir. Üç boyutlu jeolojik modeller, jeotermal aramanın temellerini oluşturur ve jeotermal sistemlerin jeokimyasal ve jeofiziksel işaretlerin yorumlanmasına büyük ölçüde yardımcı olur. Bu 2B ve 3B jeolojik modeller, hem yüzey hem de yeraltı için jeokimyasal ve jeofizik veri toplama ile desteklenen ayrıntılı jeolojik haritalamadan yapılır. Ayrıntılı yüzey haritalaması, fayların yapısal analizi, uydu görüntülerinin yorumlanması, mineral dağılımının analizi ve değerlendirilmesi, jeotermal belirtilerin yaş tarihlendirmesi ve diğer birçok teknik, güvenilir bir modelin elde edilmesi için çok sayıda saha ve kuyuda uygulanmaktadır [6, 8-11]. Termal bir alanda ve yakın çevrede yapılan haritalama, bölgenin tektonik, volkanik ve hidrolojik özelliklerinin keşif haritalaması ile bütünleştirilmelidir. Bölgedeki en son faylanma ve volkanik olayların, termal alanların yerel jeolojisi ile ilişkisinin anlaşılması özellikle önemlidir [8]. Jeolojik tekniklerin uygulanması, aktif

kırılma kontrollü jeotermal sistemin davranışı ve evrimi hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. Bölgedeki geçirgenlik dağılımı, sıvı akış desenleri ve kırıkların dağılımı da jeolojik ortamlarda değerlendirilir [12]. Yüzeydeki hidrotermalalterasyonun detaylı haritalaması yapılır ve XRD analiz yöntemiyle alterasyon mineralleri analiz edilir. Termal belirtilerin kapsamlı bir haritası oluşturulur ve sıcaklık, akış hızı, iletkenlik vb. dahil olmak üzere yüzey belirtilerinin fiziksel özellikleri ölçülür ve kaydedilir [6].

2.2. UzaktanAlgılamaTeknikleri

Petrol ve gaz arama faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan uzaktan algılama jeotermal kaynaklar için de kullanılmaya başlanmıştır. Uzaktan algılama verileri ile jeotermal kaynakların ön araştırmasını yapmak, jeotermal kaynağın olası tanımlanması ve kullanımı için ayrıntılı jeokimyasal ve jeofizik araştırmaların önünü açacaktır. Uzaktan algılama teknikleri, detaylı jeolojik yapıları haritalamak, yüzey sıcaklığı anomalilerini tespit etmek ve muhtemel jeotermal alanlarda hidrotermalalterasyon mineralleri içeren sinter ve tüf gibi jeotermal olasılıkları belirlemek için faydalı ön araştırma araçları olarak ortaya çıkmaktadır [13]. Özellikle uzak, erişilemeyen engebeli arazilere ve keşfedilmemiş alanlara erişimi kolaylaştırır. Uzaktan algılamanın jeotermal araştırma için uygulamaları, havadaki ve uzaydaki uzaktan algılama platformlarının (ASTER, Landsat vb.), spektral ve uzamsal özelliklerine dayanır [7]. Elektromanyetik spektrumun optik, yakın-kızılötesi ve termal-kızılötesi bölgesinin görüntüleri jeotermal kaynakların yüzeydeki işaretlerini tanımlamak için kullanılabilir [14]. Sinter/tüf, hidrotermalalterasyon ürünleri (killer, sülfatlar), termal anomaliler gibi jeotermal belirtiler, uzaktan algılama görüntülerinde tanımayı kolaylaştırabilecek farklı spektral özelliklere sahiptir [7]. Jeotermal anomalileri tespit etmek için hem gündüz hem de gece spektral görüntü verilerinin bir kombinasyonu kullanılır (Şekil 1). Ayrıca, bitki örtüsü indeksi ve arazi yüzey sıcaklığı verileri, daha fazla araştırma için jeotermal olasılığın tanımlanmasında önemli bir rol oynamaktadır [15].



Şekil 1. Landsat-8 bant oranları ve kombinasyonları kullanılarak çalışma alanının RGB renk kombinasyon görüntüsü[16].

Hem fotoğrafik hem de termal kızılötesi algılayıcıların hassas ölçüm yapabilmesinden dolayı son zamanlarda uzaktan algılama teknikleri ile alterasyon mineral haritalaması önem kazanmıştır.

2.3. JeokimyasalÇalışmalar

Jeotermal sistemlerin jeokimyası son derece karmaşıktır. Jeotermal kaynakların araştırılmasında, değerlendirilmesinde ve işletilmesinde kimyasal veriler ve yorumları içeren jeokimyasal yöntemler önemli bir rol oynamaktadır. Jeokimyasal araştırmaların temel amacı, bir jeotermal sistemdeki akışkanların bileşimi hakkında bilgi edinmektir. Ayrıca, sıcak su ve buhar boşalımlarının kimyasal verileri, kaplıca sıcaklığı, kaplıcanın kökeni ve akış yönü hakkında da ayrıntılı bilgi verir [9, 17]. Jeokimyasal araştırmalar (izotop jeokimyası dahil), jeotermal sistemin su mu yoksa buhar mı baskın olduğunu belirlemede, su kaynağının homojenliğini tahmin etme, derin sıvının kimyasal özelliklerini ortaya çıkarma ve besleme suyunun kaynağını belirlemede derinde beklenen minimum sıcaklığı tahmin etmede faydalı bir araçtır. Jeokimyasal araştırma, incelenen alanın jeotermal oluşumlardan (kaplıcalar, fumeroller, vb.) veya kuyulardan gelen su ve gazın örneklenmesi ve kimyasal ve/veya izotop analizlerinden oluşur [18].

Jeokimyasal analiz, farklı jeotermometreler kullanarak rezervuar sıcaklıklarını ve denge koşullarını değerlendirmek için yararlıdır [19]. Ayrıca, bazı jeokimyasal yöntemler, yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde meydana gelen hidrotermalalterasyon mineralleri ile bu sistemler içinde dolaşan akışkanlar arasındaki ilişkilere dayanmaktadır. Bu yöntemler, kimyasal jeotermometreleri ve su-kayaç etkileşimi (veya mineral-çözelti dengesine) ile birlikte bu etkileşim sırasında meydana gelen kütle transferinin

değerlendirilmesini de içerir. Bu, jeotermal akışkanların kökenini yeniden yapılandırmak için güçlü bir araçtır [20]. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde gelişen hidrotermalalterasyon mineralojisinin belirlenmesi, akışkan jeokimyası için büyük önem taşımaktadır.

Jeolojik, hidrolojik ve jeofizik yöntemlerden elde edilen yapısal bilgilerin entegrasyonu, jeokimyasal çalışma, parametrik sondaj yoluyla yeraltı araştırmalarında karar vermede rehberlik edebilir [21]. Jeokimyasal araştırma, keşif planlaması için faydalı veriler sağladığından ve jeofizik araştırmalar, yeraltı araştırmaları gibi diğer daha karmaşık yöntemlere kıyasla maliyeti nispeten düşük olduğundan, diğer daha pahalı metodolojilere geçmeden önce jeokimyasal tekniklerden mümkün olduğunca yararlanılmalıdır [18, 22]. Yine bu nedenle, jeokimyasal yöntemler jeotermal arama ve geliştirmenin tüm aşamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [22].

2.4. JeofizikTeknikleri

Jeolojik ve jeokimyasal kılavuzlar ile birlikte uygulanan jeofizik ölçümler, jeotermal enerji kaynaklarını keşfetmek için güçlü bir araçtır. Jeotermal anomaliler, sıcaklık ve jeotermal gradyandaki değişiklikler, yüzeydeki ölçümleri etkileyen yeraltı fiziksel özelliklerini değiştirebildiğinden jeofizik anomalilerle bağlantılıdır [14]. Bu bağlamda, bir jeotermal sistem genellikle, yüzeyden ölçülebilen anomaliler olarak değişen derecelerde gözlemlenebilen yeraltı yüzeyinin fiziksel özelliklerinde homojen olmamalara neden olur. Değişen fiziksel özellikler, Tablo 1'de belirtildiği gibi farklı jeofizik yöntemler ve araçlar kullanılarak ölçülebilir [7].

Tablo 1. Fiziksel özellikler ve ilgili jeofizik yöntemler ve araçlar [7].

Fiziksel özellik	Jeofizik metot	Ortak ekipman
Elektriksel iletkenlik/özdirenç	Elektromagnetik/elektrik	MT/TEM
Yoğunluk	Gravite	Gravimetre
Manyetik duyarlılık	Manyetik	Manyetometre
Elastik modülü/hız	Sismik	Sismometre

Jeofizik araştırmalar, derin jeolojik oluşumların fiziksel parametrelerini yüzeyden veya yüzeye yakın derinlik aralıklarından dolaylı olarak elde etmeye yöneliktir. Jeotermal aramada jeofizik yöntemler temel olarak ısı kaynağının, rezervuarın, örtü kayanın geometrisini (şekil, boyut, derinlik) belirlemenin yanı sıra jeotermal sistemden, sıvı akış yollarından, basınç alanından sorumlu yapıları görüntülemeyi ve jeotermal kaynağın alansal kapsamını tanımlamayı amaçlamaktadır. Tüm jeofizik teknikler pahalıdır. Belirli bir jeolojik ortamda mükemmel sonuçlar veren bir yöntem, başka bir yerde çok yetersiz sonuçlar

verebileceğinden, herhangi bir durumda veya koşulda ayrım gözetmeksizin kullanılamazlar. Bu nedenle, maliyetleri azaltmak için jeofizik yöntemlerin jeologlar ile yakın işbirliği içinde çalışan jeofizikçiler tarafından önceden çok dikkatli seçilmesi önemlidir [23].

Jeotermal rezervuarların tespiti, haritalanması ve değerlendirilmesi için jeofizik yöntemlerden termal yöntemler, elektrik ve elektromanyetik yöntemler, gravite yöntemleri, manyetik yöntemler ve sismik yöntemler kullanılır.

2.4.1. Termal Yöntemler

Termal yöntemler (yüzey sıcaklığı ve ısı akışı ölçümleri) genellikle rezervuarın sıcaklığına iyi bir yaklaşım sağlayabilir [18]. Jeotermal sahaların anormal yüksek ısı akışlarına sahip olduğu bilinmektedir. Termal alanların toplam ısı akışının ölçülmesi ve izlenmesi, minimum sürekli güç potansiyelini, sistemin entalpisini ve boyutunu ve sistemden enerji çıkarmanın verimliliğini tahmin etmenin yanı sıra sondaj noktalarının seçiminde yardımcı olmak için doğrudan bir yol sağlar [24].

Isıl arama teknikleri, gerçek boyutların ve bir jeotermal sistemin potansiyelinin tahmininde çok önemlidir. Potansiyeli belirlemede yüzey ve sığ sıcaklık ölçümü, yüz metre derinliğe kadar jeotermal gradyan ölçümü ve daha pahalı bir yaklaşım olan yüz metreden daha derinlerdeki ısı akışı tayinleri kullanılmaktadır. Yüzey ve sığ sıcaklık ölçümü ucuz olmasına karşın, yağış, filtrasyon, yeraltı suyu kadar topografik faktörlerden de etkilenmesi ile zorluklarla karşılaşılmaktadır. Birçok araştırmacı 15-150 metreler arasındaki kuyulardaki derinliğin fonksiyonu olan sıcaklık ölçmelerini jeotermal arama yolu olarak kullanmışlardır. Bu derinlikler yüzeye yakın ısıl sapmalar dışında ölçümler için en elverişli, uygun yerlerdir. Ayrıca, gradyan ölçümleri hassas olarak yapılabilir. Bununla birlikte, yeraltı suyunun yanal hareketleri de göz önüne alınmalıdır. Ticari ve ekonomik imkanları ümitli jeotermal sahaların çoğunda bu derinliklerde gradyanlar 7°C/100m.'dir(normal gradyanlar 2-3°C/100m.). İdeal olarak hem gradyan, hem de ısı akısı ölçmeleri kullanılmalıdır. Fakat normal ısı akışının olduğu geniş alanların tanımlanmasında ısı akışı normalin üzerinde olup ve bu da, ısı akışı normal olan ana kayaç ısı üretim ölçmeleri ile birleştirilince, hidrotermal konveksiyon sistemlerinin ve belki de genç sıcak sokulum kütlelerinin varlığı ortaya çıkarılabilir [25].

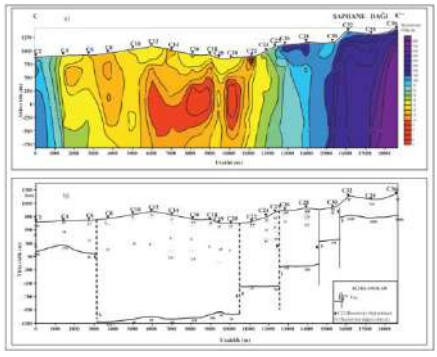
Isı akışı ölçümlerinin birincil amacı, doğal olarak kaybedilen ısı enerjisi miktarını tahmin etmek, ısı kaybı özelliklerinin dağılımını analiz etmek ve gizli kırılma bölgelerini bulmaktır. Isı kaybı, sıcaklık gradyanları ile ilgilidir. Isı kaybı mekanizmaları iletim, konveksiyon ve radyasyondur. Jeotermal

ortamlarda, ısı iletim yoluyla esas olarak sistem kaya kütleleri ile temas halinde, konveksiyon yoluyla: esas olarak sıvıları boşaltarak, örn. fumeroller, buharlı zemin, kaplıcalar vb. yüksek ısı kaybı anomalileri genellikle yapısal eğilim ve/veya termal belirtilerin olduğu alanlar ile örtüşür. Toprak sıcaklığı ve ısı akışı ölçümleri, genellikle jeotermal akışkanların akışını kontrol eden ancak yüzeyde hemen tanınmayan faylar veya çatlaklar gibi yapıların haritasını çıkarabilir. Isı akışı haritaları ayrıca ısı kaynakları hakkında bilgi verebilir ve diğer verilerin yorumlanmasına da yardımcı olabilir [6].

2.4.2. ElektrikveElektromanyetikYöntemler

Elektrik ve elektromanyetik yöntemler, yeraltının elektrik direncini (ρ) veya karşılıklı elektriksel iletkenliğini (σ) sağlar. Elektrik direnci temel olarak sıcaklık, basınç, kil içeriği, kayacın mineral birliği, gözeneklilik yapısı, doygunluk-akışkan içeriği, sıvının tuzluluğu ve sıvı hareketine bağlıdır. Bunlar gerçekten de özdirenç araştırmasını, özellikle jeotermal akışkanların varlığı ile doğrudan ilgili anomalileri tespit etmeyi kolaylaştırır[7].

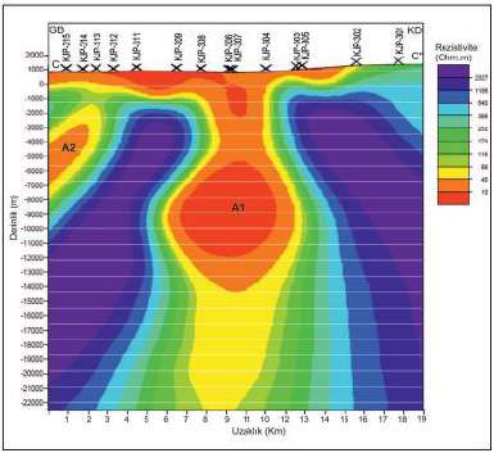
Elektrik özdirenç ölçümleri, yeraltı anomalilerini belirlemek için jeotermal aramalarda çok başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Kayaç akışkan hacminin elektrik direncindeki değişim, hidrotermal değişime ve ısı akışı verilerine bağlıdır. Özdirenç sondajı ve profil çıkarma, yeraltı özdirencini tahmin etmek için sahada en yaygın olarak uygulanan iki prosedürdür. Özdirenç sondajının amacı, belirli bir noktanın altındaki derinlikle özdirenç değerlerinin değişimini tahmin etmektir. Bu tür ölçümler, zemin az ya da çok yatay katmanlardan oluştuğunda gereklidir. Özdirenç profili çıkarmanın amacı, zeminin özdirencinin yanal değişimini tespit etmektir (Şekil 2). Bu tür bir araştırma, düşük özdirenç değerlerine sahip yeraltı anomalilerini tanımlamak için yapılır [26].



Şekil 2.Görünür özdirenç (rezistivite) ve yapı kesiti[27]

Jeotermal aramada kullanılan elektromanyetik (EM) sondaj yöntemleri, doğal kaynaklı indüksiyon yöntemleri (manyetotellürik ve audiomanyetotellürik) ve kontrollü kaynaklı indüksiyon yöntemleri (CSMT, TEM) iken, elektrik yöntemleri (DC yöntemleri) dipol–dipol ve bipol-dipol haritalama yöntemi, Schlumberger ve Wenner sondaj yöntemlerini içerir. Daha derin araştırma genellikle manyetotellürik (MT) tarafından yapılırken, daha sığ sondajlama genellikle merkezi döngü TEM yöntemi (veya DC yöntemleri) kullanılarak yapılır [7].

Özellikle MT yöntemi, sulu sıvılar, metalik mineraller, birbirine bağlı grafit filmler ve kısmi eriyik nedeniyle kabuktaki gelişmiş iletkenlik yapısını tespit etmek için çok güçlü bir jeofizik araçtır [28]. Manyetotellürik tekniği veya manyetotellürik, dünyanın elektriksel özelliklerini daha iyi görüntü veren bir elektromanyetik jeofizik keşif tekniğidir (Şekil 3). Yöntem, dünyanın birkaç on metreden birkaç yüz kilometreye kadar değişen özdirencini belirlemek için kullanılır [29].

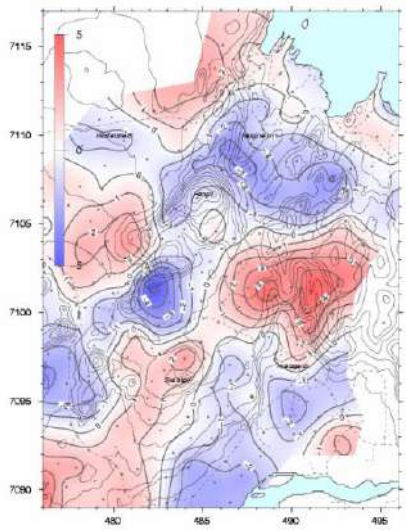


Şekil 3.İki boyutlu manyetotellürik modeli[27]

2.4.3. Gravite Yöntemleri

Yerçekimi yöntemi, Dünya'nın yerçekimi alanından kaynaklanan ivmenin ölçülmesini içeren pasif jeofizik keşif yöntemidir. Yerçekimindeki değişimler, yeraltı kayalarının yoğunluk yanal değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Dünyanın yerçekimi alanındaki değişimleri ölçmek için kullanılan ekipmanagravimetre denir. Yerçekimi değerleri, 1 Gal'in 1 cm/sn^2'ye eşit olduğu bir ivme birimi olan miligal (mGal) olarak ifade edilir [30]. Ölçülen Bouguergravite verileri (belirli bir ızgara üzerinde), çökeltiler ve temellerden kaynaklanan gravite etkisini verir. Farklı yoğunluğa sahip anomalileri

belirlemektir. Gravite yorumu jeofiziksel anomalileri verir [31]. Yoğunluk anomalilerini incelemek için bir Bouguer haritası (Şekil 4) yapılarak gömülü faylar gibi daha detaylı yapısal çalışmalar için seçilen profiller yoğun istasyon aralığı ile ölçülebilir[32]. Kısmi erimelerden kaynaklanan yoğunluk azalması, yerçekimi anomalileri ile de tespit edilebilir. Pozitif graviteanomalileri genellikle normalde plütonikintrüzyonlar ve dayklar, yeşil şist metamorfizması sırasında hidrotermal faaliyetlerden silikatların birikmesi ile ilişkili daha yüksek yoğunluk değerleri anlamına gelirken, negatif gravite anomalileri, daha yüksek gözenekler veya bir kayanın çok kırık parçalarının neden olduğu sıcak suyun sirkülasyonu ile üretilen mineraller daha düşük yoğunluk değerlerine işaret eder [14].Gravimetrik ölçümlerin birincil kullanımı, bir alanın yapısal bağlamını, fayların eğilimlerini veya temelin derinliğini sınırlamaya yardımcı olmaktır [34].



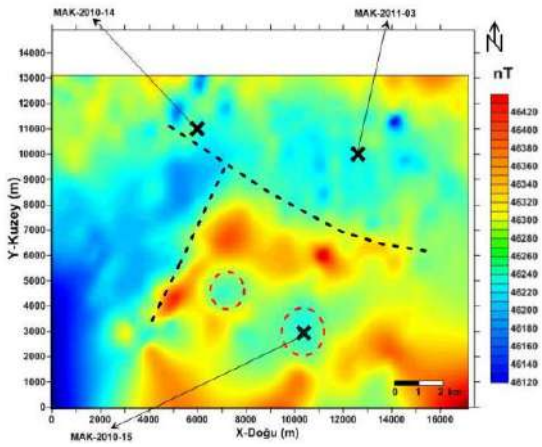
Şekil 4. Bouguergravite haritası[33]

Gravimetre, belirli bir istasyon noktasında mutlak ve bağıl yerçekimini ölçer. İki çeşit gravimetre vardır. Mutlak bir gravimetre, bir lazer ışını kullanarak düşen kütlenin hızını ölçerek yerçekiminin gerçek değerini ölçer. Bu ölçüm cihazı 0,001 mGal hassasiyete ulaşır; ikinci tip bir gravimetre, iki konum arasındaki yerçekimindeki (mGal) göreli değişiklikleri ölçer. Bu tür bir metre, yaklaşık 5 ila 7 dakika içinde 0.01mGal hassasiyetle yerçekimini ölçebilir [35]. Bu yöntem, jeotermal arama projelerinde bulunması hayati önem taşıyan yoğun veya daha az yoğun yeraltı anomalilerini tanımlarken uygulanır. Yeraltı fay hatları da yerçekimi yöntemleriyle tanımlanabilir. Ayrıca yeraltı suyu

seviyelerindeki değişiklikler de yerçekimi yöntemleriyle ölçülebilir ve tanımlanabilir [9].

2.4.4. ManyetikYöntemler

Jeotermal alanındaki manyetik çalışmaların temel amacı, yeraltı kayaçlarının anomalilerin yorumlanması ve kayanın manyetik özellikleri aracılığıyla jeotermal aktivite, bölgenin tektonik ve stratigrafisi arasındaki ilişki hakkında bilgi vererek katkıda bulunmaktır. Manyetik çalışmadan elde edilen veri yorumu, yerel manyetizasyon bolluğundaki farklılıkları yansıtır ve jeotermal aktivitenin olduğu fayların ve jeolojik kontakların yerini belirlemek için yararlıdır [35]. Amaç bölgesel haritalama ve ölçümler jeolojik malzemelerin manyetik duyarlılığına bağlıysa, manyetik ölçümler yüzeyde veya havada manyetometreler kullanılarak gerçekleştirilir. Manyetik araştırmalar, termal değişim nedeniyle manyetikliği giderilmiş kayaları haritalayabilir (Şekil 5) ve araştırmalar, diğer verilerin yorumlanmasına yardımcı olan tamamlayıcı yapısal bilgiler verir [7].



Şekil 5. Toplam manyetik alan anomali haritası örneği [36]

Yüksek çözünürlüklü aeromanyetik (HRAM) araştırmaların alt nanotesla ölçeğinde bir çözünürlüğe sahiptir [14]. Öyle ki manyetik araştırmalar artık magmatik kayaçlarla sınırlı değildir, aynı zamanda küçük anomaliler oluşturan yüksek manyetit konsantrasyonlarına sahip tortul içi fayları haritalamak için de kullanılabilir. Bu tür HRAM araştırmaları genellikle hidrokarbon aramalarında kullanılır. Bir kayanın manyetik duyarlılığı ve kaybolduğu sıcaklık, büyük ölçüde kaya bileşenlerine, az ya da çok manyetik minerallere bağlıdır[32].En faydalı manyetik mineraller manyetit, ilmenit, hematit ve pirotittir. Silikat

mineralleri, kaya tuzu ve kireçtaşları (kalsit) çok düşük bir manyetik duyarlılığa sahiptir ve bu nedenle manyetik ölçümler için kullanışlı değildir. Demanyetize edilmiş kayalar, kabukta sıcak bir kaya kütlesinin varlığını doğrular. Daykların varlığı yüksek duyarlılıkla ortaya çıkar. Öte yandan hidrotermal akışkanların sirkülasyonu, kayaçta duyarlılıkta azalmaya yol açan değişikliklere neden olur. Bu azalma, kayalarda bulunan manyetitin tahrip olmasının bir sonucudur. Bu şekilde, volkanik kayaç birimleri ve lav akıntıları, hidrotermal olarak değiştirilmiş kaya birimlerinden kolaylıkla ayırt edilebilir. Bu da jeomanyetik araştırmaları yüksek entalpili volkanik rezervuarlarda jeotermal arama için yararlı bir araç haline getirir [14].

2.4.5. SismikYöntemler

Yeraltının davranışını anlamak için temel olarak mühendislik, madencilik, yeraltı suyu arama ve saha araştırmalarında sismik bir araştırma yapılır. Sismik yöntemler, yüzeyin altındaki tortul kaya katmanlarından gelen akustik yankıları kaydeder. Sismik araştırmalarda kullanılan çeşitli bileşenler şunlardır: enerji kaynakları, alıcı, kablolar, kayıt cihazı ve piller. Sismik sinyali alt yüzeye başlatmak için bir enerji kaynağı gereklidir. Bir çekiç damlası veya herhangi bir kimyasal patlayıcı olabilir. Alıcılar, yansıyan ve kırılan sinyalleri almak için kullanılır. Jeofonlar, sismik çalışmalarda alıcı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 6). Alınan tüm sinyallerin tek bir ortak noktaya gelmesi ve istiflenebilmesi için tüm jeofonları ortak bir terminal noktasına bağlamak için kablolar gereklidir. Bir kayıt cihazı, tüm sinyalleri bir sismografta veya bir bilgisayarda kaydeder. İşlenmiş sismik veriler, kaya türleri ve fay yapıları dahil olmak üzere yeraltı jeolojisi hakkında bilgi verebilir. Daha doğru hız modelleri tanımlamak için yerçekimi araştırmaları ile de ilişkilendirilebilir [37].

Şekil 6. Jeofon ve sahada jeofon noktaları[38]

Sismik araştırma, yerin altındaki kaya katmanlarının görüntülerini geliştirmek için kullanılan bir tekniktir. Hidrokarbon ve jeotermal enerjinin depolanması için potansiyel bir alanı karakterize etmede önemli bir adımdır.

Ayrıca, farklı katmanların kalınlığı ve derinliği hakkında fikir verir ve bu kaya katmanlarındaki herhangi bir fay ve kırıkları ortaya çıkarır. Sismik yöntemler, elastik dalgaların yayılma hızı verilerinin yardımıyla yeraltı elastik özelliklerini belirlemek için de yararlıdır ve yeraltının yapısal bilgilerinin elde edilmesinde ve hatta potansiyel bir rezervuar sınırının belirlenmesinde çok yardımcı olabilir.Sismikte kullanılan başlıca iki tür teknik vardır. Bunlar:

a) Kırılma Sismik: Sismik kırılma yöntemi, mühendislik, madencilik, yeraltı suyu, arama, jeotermal arama ve çevresel saha araştırmalarında en yaygın olarak kullanılan jeofizik yöntemlerden biridir. Kırılma yöntemi, karakteristik sismik hızlarla alt yüzey tabakasının dağılımı ve kalınlığı hakkında ayrıntılı bilgi sağlamak için kullanılır. Yeraltının altındaki jeolojik yapının karmaşıklığı nedeniyle jeotermal sistem alanında sismik kırılma araştırmaları sınırlı ölçüde kullanılmıştır. Sismik kırılma araştırmaları, farklı malzemelerin zemin yüzeyinden belirli bir derinliğe kadar olan sıkıştırma dalga hızlarını belirlemek için kullanılır. Birçok durumda sismik kırılma araştırmasının amacı, anakaya yüzeyinin konfigürasyonunu ve alttaki malzemelerin sıkışma dalga hızlarını belirlemektir. Sismik kırılma araştırmasından elde edilen bilgiler, çeşitli yeraltı katmanlarının derinliklerini hesaplamak ve bu katmanların konfigürasyonlarını karakterize etmek için kullanılır. Ayrıca, yüzey altı katmanlarının kalınlığı ve yüzey araştırmasının etkinliğini ve doğruluğunu yöneten katmanlar arasındaki hız kontrastları hakkında ayrıntılı bilgi verir. Jeotermal cismin kaynağı da yansıma sismik yardımıyla tespit edilebilir [9].

b) Yansıma Sismik: Yansıma sismik yöntemleri, kırılma sismiklerine kıyasla yüksek yanal çözünürlük sağladıkları ve çok daha kısa profiller ve dolayısıyla daha az atım enerjisi gerektirdiği için jeotermal aramalarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Sismik yansıma araştırmaları, petrol ve jeotermal arama projelerinde başarılı bir şekilde kullanılmış ve daha iyi ihtimali belirlemek için faydalı olmuştur. Sismik yansıma araştırmalarından elde edilen bilgiler, faylar ve kırıklar ile birlikte farklı yüzey altı katmanlarının geometrisini ve yapısal özellikleri tanımlamak için kullanılabilir[39].

Sismik araştırma, elastik dalgaların yayılma hızını etkileyen elastik özelliklere bağlıdır. Anormal derecede sıcak kaya kütlesi, depremlerden gelen sıkıştırma (p) dalgalarının geçişini geciktirir ve kesme dalgalarının genliğini azaltır. Sismisite analizi, kırık bölgeler, aktif faylar ve sistemin ısı kaynağının bazı göstergeleri hakkında bilgi verir. Sismisiteninmekansal dağılımı, jeotermal rezervuarın genişlemesini de gösterebilir. Isı kaynağının soğutulması mikro sismisite üretebilir [6].

Aktif jeodinamik ortamlarda bulunan jeotermal aramalarda önemli sayıda sismik istasyonun konuşlandırılması iyi bir uygulama olabilir. Birçok jeotermal

alanın volkan-sismik çalışmalarından elde edilen sonuçlar, jeotermal arama ve rezervuar izleme için olası kaynak haritalama araçları olduklarını göstermektedir. Volkan sismik yaklaşım, jeotermal kaynağı hem arama hem de işletme aşamasında analiz etmek için uzun vadede maliyet etkin olan bağımsız bir araç olarak faydalı olabilir [32, 40].

2.5. AramaSondajları

Arama sondajları, herhangi bir jeotermal arama programının son aşamasını temsil eder ve jeotermal rezervuarın gerçek özelliklerini belirlemenin ve dolayısıyla potansiyelini değerlendirmenin tek yoludur [41]. Bu aşamada, derinlik, kapsam, sıcaklık, ısı içeriği ve hidrotermal özellikler dahil olmak üzere rezervuar özelliklerini tahmin etmek için rezervuar modelleri kullanılır. Sondaj genellikle arama maliyetlerinin büyük bir bölümünü oluşturur. Arama sondajları (Şekil 7), önerilen rezervuar modelini çekirdeklerden, kuyu içi sıcaklık ölçümlerinden ve üretim testlerinin sonuçlarından elde edilen verilerle doğrulamak için kullanılmalıdır [34].

Şekil 7. Arama sondaj çalışması

Arama sondajları tarafından sağlanan veriler, yüzey araştırmalarının sonuçlarından ayrıntılı olarak hazırlanan tüm hipotezleri ve modelleri doğrulayabilmeli ve rezervuarın verimli olduğunu ve amaçlanan kullanım için yeterli özelliklere sahip ve yeteri kadar sıvı içerdiğini gösterebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle keşif kuyularının yerleştirilmesi çok hassas bir işlemdir [18].

Arama sondajı, yüzeyden yapılan araştırmanın sonu ve derinden yapılacak arama aşamasının başlangıcıdır. Yapılacak arama sondajları, derin aramanın bir parçası olurlar. Sondaj yerleri jeolojik, jeofizik ve jeokimyasalkriterleri göz önünde bulundurarak yapılmalıdır. Jeolojik açıdan, derinlerde geçirgenlik ve

gözenekliliğin olması, rezervuar işletmesinin yapılacağı derinlikte düşeye yakın fayların kesilmesi öngörülmelidir. Jeokimyasal açıdan, yüzey aktivite tipine göre seçim yapılmalıdır. Sıcak su sistemlerinde yüksek sıcaklıklı ve yeraltı su karışımının az olduğu yerler seçilmelidir. Fumerollerde ise geldiği kaynak araştırılmalıdır. Jeofiziksel açıdan, önemli süreksizlik ve fay zonlarının tahmin edildiği ve araştırılan derinlikte en düşük özdirenç değerlerinin olduğu yerler seçilmelidir. Arama sondajının yapılacağı ilk kuyunun seçiminde olası sistem hakkında yeterli verinin alınacağı, akışkan üretilmesi için gerekli koşulların sağlanacağı yer olmasına dikkat edilmelidir. "Derin arama" kuyularının seçiminde ya "birinci kuyu başarılı ise aynı jeolojik özellikleri taşıyan zonda diğer kuyuları delmek ve o zonu geliştirmek" ya da "başarılı 1. kuyudan sonra olası jeotermal alanın farklı kısımlarını araştırmak" stratejilerinden biri arama yapanlar tarafından seçilmelidir [25].

3. Sonuçlar

Jeotermal arama, jeolojik, jeokimyasal ve jeofizik araştırmalar gibi faaliyetleri içeren çok disiplinli bir uygulamadır. Bu araştırma faaliyetleri, jeotermal alanların araştırılmasında, geliştirilmesinde ve gözlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Ancak, olası jeotermal sahaları tanımlamak için tek bir yöntem yeterli değildir. Bu yüzden jeoloji, jeokimya ve jeofizik bilim dalları birbiriyle değerlendirmek yararlı olacaktır. Araştırma metotları, bir jeotermal sistemin özelliklerini belirlemeyi amaçlar. Bir jeotermal kaynağın varlığı için tüm arama yöntemleri ile elde edilen entegre verilere dayalı olarak uygun sondaj sahaları belirlenir. Jeotermal arama, sıralı ve sistematik bir süreçtir. Arama aşamalarının her biri adım adım ve koordineli yürütülür. Jeotermal aramalar yüksek maliyetlidir. Bu yüzden aramalarda kullanılan doğru arama metotları ile başarılı bir yüzey araştırması sonucunda maliyet en aza indirilerek doğru sondaj noktaları belirlenmiş olur.

KAYNAKLAR

1. L. Marini, Geochemicaltechniquesfortheexplorationandexploitation of geothermalenergy.DipartamentoperloStudio del Territorio e dellesueRisorse, UniversitadegliStudidiGenova, Italy, 2000.
2. L.T. Grose, Geothermalenergy: Geology, exploration, anddevelopments. Part I. Colo. Sch. Min.,Miner. Ind. Bull. United States, 14, 6, 1971.
3. W.F. Giggenbach,Redoxprocessesgoverningthechemistry of fumarolicgasdischargesfrom White Island, New Zeland. Appl. Geochem. 2, 143-161, 1987.
4. W.H. Lee and S. Uyeda,Review of heatflow data. GeophysicalMonograph Series, Terrestrialheatflow, 8, pp. 87-190, 1965.
5. E.R. Oxburghand D.L. Turcotte, Thermalstructure of islandarcs. GeologicalSociety of AmericaBulletin, 81.6: 1665-1688, 1970.
6. K. Árnasonand G. Gíslason, Geothermalsurfaceexploration. Paperspresented at "Short Course on Surface Exploration forGeothermalResources", organizedby UNU-GTP andLaGeo, in AhuachapanandSantaTecla, El Salvador, 7 pp., 2009.
7. L. Ochieng, Overview of surfacegeothermalsurfaceexplorationmethods, Geothermal Development Company, Nakuru Kenya, 2013.
8. G. W. Grindley, Geology of New Zealandgeothermalsteamfields: UN Conf. InProceedings, Vol. 2, pp. 237-245, 1964.
9. H. Guptaand S. Roy, An alternativeresourceforthe 21st century, Elsevier, UK, pp. 1-71, 2006.
10. E. Kurowskaand K. Schoeneich, Geothermalexploration in Nigeria. InProceedings World geothermalcongress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
11. F. van der Meer, C. Hecker, F. vanRuitenbeek, H. van der Werff, C. de Wijkersloothand C. Wechsler, Geologicremotesensingforgeothermalexploration: A review. International Journal of Applied Earth ObservationandGeoinformation, 33, 255-269, 2014.
12. C. Wangie, Overview of geothermalsurfaceexplorationmethods, Presented At Short Course VII for Exploration Of GeothermalResources, pp. 1-15, 2012.
13. W. M. Calvin, M. Coolbaugh, C. Kratt, R.G. Vaughanand W. Calvin, Application of remotesensingtechnologytogeothermalexploration. InGeologicalSociety of Nevada Symposium: Windowtothe World, Reno, Nevada, pp. 1083-1089,2005.

14. M. Pipan, Remote sensingandgeophysicalmethodsforgeothermalexploration.Paperpresented at the School on Geothermics, organisedby ICTP, ICS-UNIDO and IAEA, Trieste, Italy, 2009.
15. P.K. Srivastavaand D.K. Gupta, Study of geothermalprospects in Gujaratthroughremotesensingapproach, Unpublished Report, pp. 1- 13, 2013.
16. B.N. Amara, D.E. Aissa, S. Maouche, M. Braham, D. Machaneand N. Guessoum, Hydrothermalalterationmappingandstructuralfeatures in theGuelmabasin (NortheasternAlgeria): contribution of Landsat-8 data. ArabianJournal of Geosciences, 12(3), 94, 2019.
17. S.M. Mwangi, Application of geochemicalmethods in geothermalexploration in Kenya, Procedia Earth andPlanetaryScienceVol. 7, pp. 602-606, 2013.
18. M.H. Dicksonand M. Fanelli, What is geothermalenergy. IstitutodiGeoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy, 2002.
19. S. Pasvanoglu, Geochemicalstudy of thegeysergeothermalfield in Haukadalur, S-Iceland. Geothermal Training Programme, Iceland, pp. 281-318, 1998.
20. M. H. Reed, Hydrothermalalterationanditsrelationshiptoorefluidcomposition. Geochemistry of hydrothermaloredeposits, 303-365, 1997.
21. S. Arnórsson, Isotopicandchemicaltechniques in geothermalexploration, developmentanduse. International AtomicEnergyAgency, 109-111, 2000.
22. C.J. Bruton, J.N. Murrayand P.S. Powell, Geochemicalanalysis of fluid mineral relations in theTiwigeothermalfield, Philippines.Conference: 22. Stanford workshop on geothermalreservoirengineering,pp. 1-9, Stanford, CA (United States), 27-29January 1997.
23. T. Meidav, Progress in geothermalexplorationtechnology. BulletinGeothermalResourcesCouncil, 27, 6,178-181, 1998.
24. G.B. Dawsonand D.J. Dickinson, Heatflowstudies in thermalareas of the North Island of New Zealand. Geothermics, 2, 466-473, 1970.
25. Ü. Serpen, Jeotermal enerji arama teknikleri. Jeotermal enerji semineri, 21-31, 2001.
26. B. Moskowitzand D. Norton, A preliminaryanalysis of intrinsicfluidandrockresistivity in activehydrothermalsystems, Journal of GeophysicalResearch, 82(36), pp. 5787-5795, 1977.
27. M. Burçak, H. Dünya ve Ö. Hacısalihoğlu, Örtülü jeotermal sahaların aranmasında yeni yaklaşımlar: Kütahya-Şaphane-Karacaderbent gömülü jeotermal sahası. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 147(147), 127-151, 2013.

28. W. Heise, T.G. Caldwell, H.M. Bibbyand C. Brown, Anisotropyandphasesplits in magnetotellurics. Physics of the Earth andPlanetaryInteriors, 158 (2-4), pp. 107-121, 2006.
29. K. Vozoff, Themagnetelluricmethod. ElectromagneticMethods in AppliedGeophysics, Vol:2, Society of Exploration Geophysicist, M. N. Nabighian (Ed.), Oklahoma, pp. 641-712, 1991.
30. S. Sahapal, A. Sircar, A. Singh, D. Vaidya, M. Shahand S. Dhale, Geothermalexploration in Gujarat: casestudyfromUnai. International Journal of LatestTechnology in Engineering, Management &AppliedScience, 4(5), 38-47, 2015.
31. A. Sircar, M. Shah, S. Sahajpal, D. Vaidya, S. Dhaleand A. Chaudhary, Geothermalexploration in Gujarat: casestudyfromDholera. GeothermalEnergy, 3(1), 1-25, 2015.
32. J.A. Rivas, Seismicactivity, gravityandmagneticmeasurements. Paperpresented at "Short Course V on ConceptualModelling of GeothermalSystems, organizedby UNU-GTP andLaGeo, in SantaTecla, El Salvador, 17 pp. 2013.
33. K. Árnason, Geothermalexplorationanddevelopment of theHengillhigh-temperaturefield (presentation). In: L.S. Georgsson, D.H. Holm, S.M. Simiyu, C. Ofwona, Shortcourse II on surfaceexplorationforgeothermalresources, UNU-GTP &KenGen, Naivasha, Kenya, UNU-GTP CD SC-05, 29 pp. 2007.
34. P. Kruger,Geothermalenergy. AnnualReview of Energy, 1(1), 159-180, 1976.
35. J. Rivas, Gravityandmagneticmethods. A shortcourse on Surface Exploration forGeothermalRecoursesorganizedby UNU-GTP andLaGeo. AhuachapanandSantaTecla, pp.1-13, 2000.
36. S. Şahin, Gediz grabeni Alaşehir bölgesinin jeotermal potansiyelinin jeofizik yöntemlerle araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
37. D.Jennejohn, Researchanddevelopment in geothermalexplorationanddrilling. GeothermalEnergyAssociation, pp. 1-25, 2009.
38. A. Pırtı, H.E. Özdemir ve R.G. Hoşbaş, Madencilik çalışmalarında sismik veri toplama ve uydu ölçme tekniklerinin analizi. Geomatik, 5(3), 160-171, 2020.
39. K. Young, T. Reberand K. Witherbee, Hydrothermalexplorationbestpracticesandgeothermalknowledgeexchange on OpenEI. Inproceedings, ThirtySeventh Workshop on GeothermalReservoirEngineering, California, pp. 1-13,2012.

40. S.M. Simiyu, Application of micro-seismicmethodstogeothermalexploration: Examplesfromthe Kenya Rift. Proceedings of theShort Course VIII onExplorationforGeothermalResources, Lake Naivasha, Kenya, 31, 2009.
41. J. CombsandL.I.P.Muffler, Explorationforgeothermalresources. SeeRef. 1, Chap. 5, 1973.

KALSİYUM LİGNOSULFONAT İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLLİ BİR ZEMİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Erdinç KESKİN[1]
İnşaat Yüksek Mühendisi Şükrü Çağdaş KALKAN[2]

[1]Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-8728-2906
[2]Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-7881-6785

1. Giriş

Karayolu projelerinde taşıma gücü, oturma ve şişme gibi problemlerle karşılaşılmaktadır. Bu tarz problemlerle karşılaşılması durumunda sıklıkla yüzeysel zemin iyileştirme tekniklerine başvurulmaktadır. Zemine katkı katılması suretiyle zeminin fiziksel ve dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi yüzeysel zemin iyileştirme teknikleri arasında öne çıkmaktadır. Karayolu taban zeminlerinin iyileştirilmesi sonucunda zeminin dayanımı artmakta ve buna bağlı olarak temel ve alt temel tabaka kalınlıkları azalmaktadır. Temel ve alttemel tabaka kalınlıklarının azalması ile paralel olarak yol yapım maliyetleri de azalmaktadır. Ayrıca zemin özelliklerinin iyileştirilmesi ile birlikte oturma ve şişme problemleri de minimuma indirilerek karayolunun ekonomik ömrü de uzamaktadır.

Katkı ile zemin iyileştirme yöntemleri incelendiğinde yaygın olarak kireç, çimento, uçucu kül, mermer tozu vb. katkılar kullanıldığı görülmektedir. Kireç ve çimento gibi ürünler direk yapı malzemesi olarak üretilmekte ve kullanılmaktadır. Uçucu kül, mermer tozu, pirinç kabuğu külü, lignosülfonat vb. katkı malzemeleri ise başka amaçlar için kullanılan malzemelerin atık malzemesi olarak ortaya çıkmaktadır. Atık malzemelerin tekrar değerlendirilerek kullanılması hem maliyet hem de çevresel etkiler göz önüne alındığında oldukça avantajlıdır [1-3].

Lignosülfonat, odun hamuru ve kağıt üretimi sürecinde yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Lignosülfonat ağırlıklı olarak inşaat (seramik, çimento üretimi, beton üretimi) ve tarım (gübre ve koruyucu olarak) alanında kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak son yıllarda zemin iyileştirmesi amacıyla da lignosülfonat kullanılmaya başlamıştır. Bu alanda yapılan literatür çalışması aşağıda özetlenerek sunulmuştur.

Noorzad ve Ta'negonbadi (2018) çalışmalarında killi bir zemini % 0.75 lignosülfonat kullanarak iyileştirmiş ve iyileştirme sonucunda kıvam limitleri, şişme oranı ve konsolidasyon katsayısındaki değişimleri incelemiştir. Çalışma sonucunda plastik limit değerinde önemli bir değişiklik gerçekleşmezken likit limit değerinde ise azalma meydana gelmiştir. Ayrıca zeminin lignosülfonat ile iyileştirilmesi sonucunda şişme değerlerinde azalma gözlemlenmiştir [4].

Chen ve diğerleri (2014) çalışmalarında siltli kum bir zeminin lignosülfonat ile iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda optimum lignosülfonat yüzdesini % 2 olarak bulmuşlardır. Katkılı ve katkısız zemin numunelerinin esneklik modüllerini karşılaştırmışlar ve lignosülfonat katkılı zeminlerin esneklik modüllerinin daha büyük olduğunu göstermişlerdir [5].

Alazigha ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmalarda doğal zemin olarak sitli kil kullanmışlardır. Zemin numunesini hem çimento hem de lignosülfonat kullanarak iyileştirmişlerdir. İyileştirilen numuneler hem donma-çözülme hem de şişme potansiyelleri konusunda incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda lignosülfonatın zemin iyileştirmesinde yeni bir katkı olarak kullanılmasının ve atık malzemelerin sürdürülebilir kullanımı açısından çevresel etkilerinin olumlu olduğunu savunmuşlardır [6].

Alazigha ve diğerleri (2016) çalışmalarında lignosülfonat ile iyileştirilmiş bir zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Bu amaçla iyileştirilmiş zemin örnekleri üzerinde bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmaların sonucunda zemine lignosülfonat katılması ile birlikte zeminde su geçirmezlik sağlandığı ve şişme potansiyelinde azalma meydana geldiğini göstermişlerdir [7].

Vijayan ve Sasikumar (2019) yaptıkları çalışmada lignosülfonat ile kaolin kilinin özelliklerindeki değişimi incelemek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Zemine lignosülfonat katılması ile birlikte likit limit ve optimum su muhtevası değerlerinde azalma, plastik limit ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış meydana geldiğini ortaya koymuşlardır [8].

Fernandez ve diğerleri (2020) çalışmalarında Arjantin'de bulunan doğal bir kilin iyileştirilmesinde kalsiyum lignosülfonat kullanmışlardır. Kağıt endüstrisinin bir alt ürünü olarak elde edilen lignosülfonatın hem ekonomik hem de çevresel faktörler düşünüldüğünde iyi bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceğini savunmuşlardır. Kilin fiziksel özelliklerindeki değişimi incelemek amacıyla zemine farklı oranlarda lignosülfonat karıştırarak kıvam limitleri, katyon değişim kapasitesi ve özgül yüzey alanı deneyleri yapılmıştır [9].

Konnur ve Antaratani (2017) yaptıkları çalışmada killi bir zeminin iyileştirilmesinde sodyum lignosülfonat kullanmışlardır. Zemine sodyum lignosülfonat katkısı katılmasıyla birlikte kıvam limitleri ve kompaksiyon parametrelerindeki değişimleri incelemişlerdir. İncelemeleri sonucunda katkı miktarının artmasıyla birlikte likit limit değerinin azaldığı plastik limit değerinin ise arttığı sonucuna ulaşmışlardır [10].

Vinod ve diğerleri (2012) % 95 kaolin, % 5 montmorillonitten oluşan bir kil karışımı hazırlayıp bu karışımı lignosülfonat ve çimento kullanarak iyileştirmişlerdir. Katkılı ve katkısız zemin numuneleri için yapılan deneyler sonucunda elastisite modülü ve elektriksel iletkenlik değerleri belirlenmiştir[11].

Koohpeyma ve diğerleri (2013) çalışmalarında lignosülfonat ile iyileştirilmiş killi bir kumun aşınabilirliği üzerine çalışmalar yapmıştır. Zemine lignosülfonat

katılması ile birlikte aşınma konusunda lignosülfonatın etkili bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kompaksiyon özelliklerini de incelemişler ve bunun sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında lignosülfonatın büyük bir etkisi olmadığını göstermişlerdir [12].

Vakili ve diğerleri (2018) çalışmalarından dispersif killerin iyileştirilmesinde lignosülfonat ve polipropilen lif kullanmışlardır. Kullanılan iki iyileştirme yöntemi zemin numunesi üzerine hem ayrı ayrı hem de bir arada uygulanmıştır. Çalışmaları sonucunda her iki yöntemin bir arada kullanılması durumunda en iyi sonuca ulaşılabileceği gösterilmiştir[13].

Wu ve diğerleri (2020), kalsiyum lignosülfonat kullanılarak killi bir zemini iyileştirmişlerdir. İyileştirmenin ardından % 4 kalsiyum lignosülfonat katkılı zemin numunelerinin 28 günlük serbest basınç mukavameti değerlerinde katkısız zemin numunelerine oranla % 56.5 artış meydana geldiğini göstermişlerdir. Ayrıca yaptıkları x-ışını kırınımı, x ışını tomografisiyöntemleri sonucunda katyon değişimi mekanizmalarının oluştuğunu, kalsiyum lignosülfonatın zeminin gözenekliliğini azalttığını ve gözenek dağılımını optimize ettiğini göstermişlerdir [14].

Ta'negonbadi ve Noorzad (2018) yaptıkları çalışmada lignosülfonat kullanarak yüksek plastisiteli bir kili iyileştirmişlerdir. Doğal zemine farklı oranlarda lignosülfonat karışıtırarak iyileştirme öncesi ve iyileştirme sonrasında fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Sonuç olarak zemine lignosülfonat katılması ile birlikte plastisite indisinde ciddi bir azalma meydana geldiğini ve serbest basınç mukavemeti değerlerinde ise % 44 düzeyinde artış meydana geldiğini belirtmişlerdir [15].

Adams (1988), lignosülfonatın biyolojik olarak parçalanabilir olduğunu söylemişlerdir. Bu nedenle uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlere ve geleneksel katkılara nazaran çevreye daha az zarar vereceğini savunmuşlardır. Bu nedenle çalışmalarında toksik olmayan, insan sağlığı ve çevreye zararsız olan bu katkının diğer geleneksel katkılara tercih edilebileceğini belirtmişlerdir [16].

Bu çalışmanın amacıgenellikle problemli zemin olarak kabul edilen killi bir zeminin lignosülfonat katkısı kullanılarak iyileştirilmesidir. Özellikle karayolu altyapılarında bu tarz sorunlu zeminlerle sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu tarz zeminler özellikle işlenebilirlik ve şişme potansiyelleri açısından büyük sorunlara neden olabilmektedir. Çalışma kapsamında kalsiyum lignosülfonat ile iyileştirme yapılan zeminin fiziksel özellikleri ve karayolu altyapılarında kullanılabilirliği irdelenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

Çalışmada ince daneli bir zemine kalsiyum lignosülfonat katılması ile zeminin fiziksel özelliklerindeki değişimin irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kullanılan malzemeler ve yöntem bu bölümde sunulmuştur.

2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma kapsamında killi bir zemine kalsiyum lignosülfonat katkısı katılması suretiyle zeminin fiziksel özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Bu amaçla kullanılan zemin numunesi ve kalsiyum lignosülfonata ait özellikler bu bölümde açıklanmıştır.

2.1.1. Zemin Numunesi

İyileştirilme de kullanılan zemin numunesi Kırklareli ili merkezinde bulunan bir araziden temin edilmiştir.

Şekil 1. Deneysel çalışma kapsamında iyileştirilen zemin

Şekil 1'de zemine ait fotoğraf verilmiştir. Zemin numunesinin bazı fiziksel özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin numunesinin bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Optimum Su Muhtevası (%)	% 12.5
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN m^{-3})	17.85
Özgül Ağırlık	2,72
Likit Limit (%)	51
Plastik Limit (%)	19
Plastisite İndisi (%)	32

2.1.2. Kalsiyum Lignosülfonat

Çalışma kapsamında doğal zemin numunesinin kalsiyum lignosülfonat ($C_{20}H_{24}Ca_{10}S_2$) kullanılarak iyileştirilmesi planlanmıştır. Kullanılan kalsiyum lignosülfonat 25 kg paketler halinde kuru bir ortamda saklanarak özelliğini kaybetmemesi sağlanmıştır. Araştırmada kullanılan kalsiyum lignosülfonatın fotoğrafı Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2. Kalsiyum lignosülfonat

Deneysel çalışmada kullanılan kalsiyum lignosülfonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

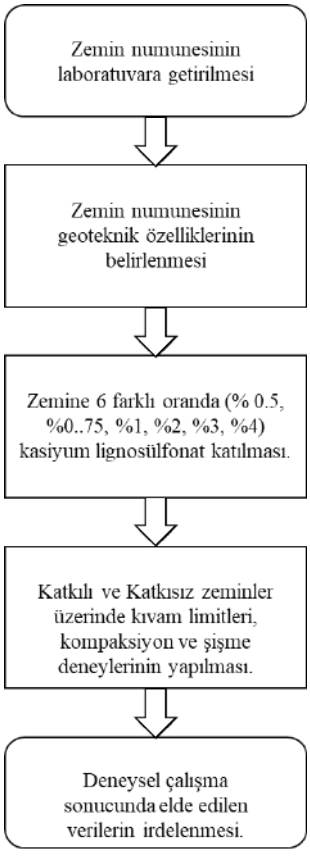
Tablo 2. Kalsiyum lignosülfonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Formülü	$C_{20}H_{24}Ca_{10}S_2$
Renk	Kiremit rengi
Lignosülfonat içeriği	>%50 ~ 65
pH	4-6
Suda Çözünme	≤ %0,5 ~ 1,5
Nem	≤%7
Moleküler Ağırlık (g/mol)	528,60656
Hidrojen Bağı Donör Sayısı	1
Hidrojen Bağı Alıcı Sayısı	10
Dönebilen Tahvil Sayısı	10
Tam Kütle(g/mol)	528,04368
Monoizotopik Kütle (g/mol)	528,04368
Topolojik Polar Yüzey Alanı	179 A^2
Ağır Atom Sayısı	33

Karmaşıklık	732
Kovalent Bağlı Birim Sayısı	2
Kuru Madde	% 95
Şeker	% 25
Kül	% 12
Çözünürlük	Suda kolay çözünür

2.2. Yöntem

Deneysel çalışma iki aşamalı olarak planlanmıştır. Birinci aşama zemin numunesi üzerinde elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık, kıvam limitleri, kompaksiyon deneyleri yapılarak zemin numunesinin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise zemin numunesine 6 farklı oranda kalsiyum lignosülfonat (% 0.5, % 0.75, %1, %2, %3 ve %4) katılarak kıvam limitleri, kompaksiyon ve şişme özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Deneysel çalışmaya ait akış şeması Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Deneysel çalışmaya ait akış şeması

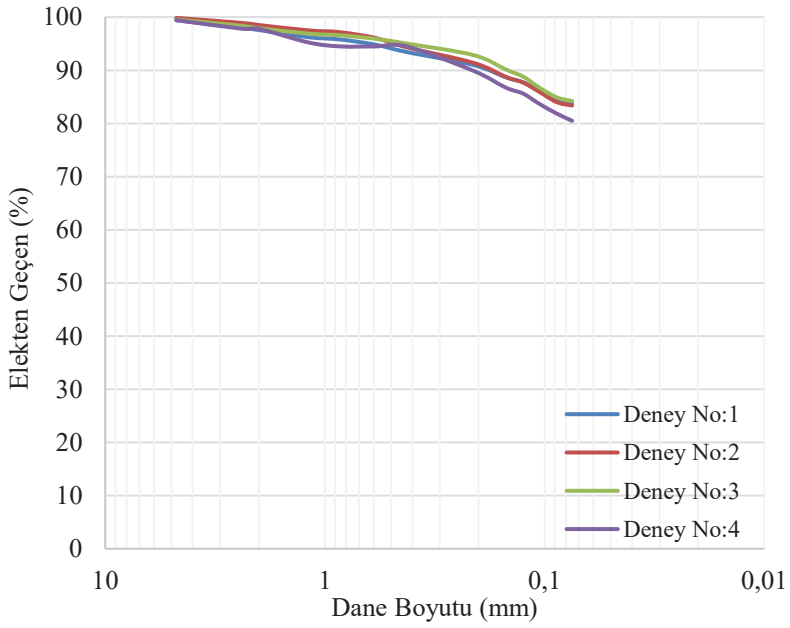
Deneysel çalışma, ASTM D1557-12, ASTM D422-63, ASTM D4318, ASTM D854-14 standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır [17-20].

3. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalar Kırklareli Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında yapılmıştır. İlk olarak araziden getirilen zemin numunesinin sınıflandırılması ve bazı fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla elek analizi, kıvam limitleri, özgül ağırlık ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Ardından zemin numunesine farklı oranlarda kalsiyum lignosülfonat katılarak zemin özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

3.1. Katkısız zemin numunesi üzerinde yapılan çalışmalar

Zemine ait dane dağılımının belirlenebilmesi amacıyla yıkamalı elek analizi deneyine başvurulmuştur. Örneklemenin zemini doğru temsil edebilmesi amacıyla elek analizi yapılacak zemin numuneleri dört farklı çuvaldan alınmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen granülometri eğrisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Elek analizi deney sonuçları

Şekil 4 incelendiğinde yapılan 4 deneyinde birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Deney sonuçlarından da görüldüğü üzere zeminin ince malzeme oranı % 80 ile % 85 arasında değişmektedir.

Zeminin plastik özellikleri kıvam limitleri deneyleri sonucunda belirlenmiştir. Katkısız zemin üzerinde yapılan likit ve plastik limit deneyleri sonucunda zemin numunesinin likit limit ve plastik limit değerleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda likit limit değeri % 51, plastik limit değeri % 19 ve plastisite indisi değeri % 32 olarak bulunmuştur.

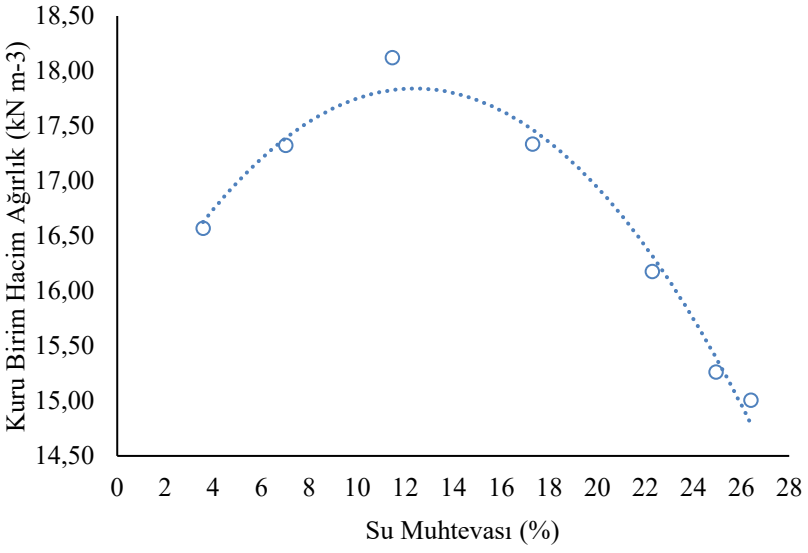
Elek analizi ve kıvam limitleri deney sonuçlarına göre zemin sınıfı birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak bulunmuştur.

Katkısız zemin numunesinin özgül ağırlık değerinin belirlenebilmesi amacıyla zemin numunesi üzerinde 6 tekrar olacak şekilde özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen özgül ağırlık değerlerinin

Tablo 3. Katkısız zemin numunesine ait özgül ağırlık değerleri

	Deney No						
	1	2	3	4	5	6	Ortalama
G_s	2.72	2.71	2.72	2.73	2.71	2.73	2.72

Zemin numunesine ait optimum maksimum kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası değerleri kompaksiyon deneyleri sonucunda belirlenmiştir. Deney sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Katkısız zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi

Şekil 5'ten görüldüğü üzere kompaksiyon deneyi sonucunda katkısız zemin numunesinin optimum su muhtevası %12.5, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise 17.85 kN m^{-3} olarak bulunmuştur.

3.2. Katkılı zemin numunesi üzerinde yapılan çalışmalar

Zemine kalsiyum lignosülfonat katılması durumunda zemin özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0.5, % 0.75, % 1, % 2, % 3 ve % 4'ü oranlarında kalsiyum lignosülfonat katılmıştır.

Katkılı zemin numunelerinin özgül ağırlık değerlerindeki değişimi incelemek amacıyla 6 farklı kalsiyum lignosülfonat oranında 6 tekrar olmak üzere toplam 36 adet özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen özgül ağırlık değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kalsiyum lignosülfonat katkılı zeminin özgül ağırlık değerleri

	Kalsiyum lignosülfonat oranı						
	% 0	% 0.5	% 0.75	% 1	% 2	% 3	% 4
G_s	2.72	2.63	2.62	2.59	2.61	2.60	2.53

Tablo 4 incelendiğinde zemine kalsiyum lignosülfonat katılması ile birlikte özgül ağırlık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Özgül ağırlık değerindeki en büyük değişim zemine % 4 kalsiyum lignosülfonat katılması ile birlikte gerçekleşmiştir. Bu durumda özgül ağırlık değeri yaklaşık olarak %7 oranında azalmıştır.

Katkı oranının artması ile birlikte özgül ağırlık değerindeki değişimler incelendikten sonra kıvam limitlerindeki değişim de incelenmiştir. Bu amaçla katkısız ve katkılı zeminler üzerinde likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Tablo 5'te sunulmuştur.

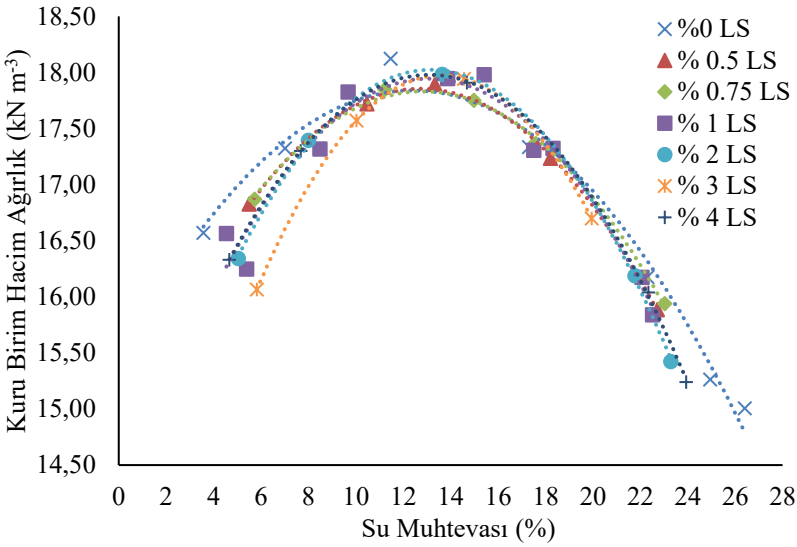
Tablo 5. Katkılı ve katkısız zemin numuneleri için kıvam limitlerindeki değişim

	Kalsiyum Lignosülfonat Oranı						
	% 0	% 0.5	% 0.75	% 1	% 2	% 3	% 4
Likit limit (%)	51	38	37	39	38	39	37
Plastik limit (%)	19	19	19	20	20	20	20
Plastisite İndisi (%)	32	19	18	19	18	19	17

Tablo 5'de görüldüğü üzere kalsiyum lignosülfonat katkılı zeminlerin likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma meydana geldiği plastik limit

değerinde ise bir miktar artış olmasına rağmen büyük bir artış meydana gelmediği görülmektedir.

Şekil 6'da kompaksiyon deneyi sonucunda katkısız ve katkılı zemin numuneleri için elde edilen kompaksiyon eğrileri gösterilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ufak bir azalma meydana geldiği görülürken, optimum su muhtevası değerlerinde ise bir miktar artış meydana geldiği görülmektedir. Yine grafikten kompaksiyon eğrisinin kollarında az da olsa bir daralma meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6. Kalsiyum lignosülfonat katkılı zeminin kompaksiyon eğrileri

Katkılı ve katkısız zemin numuneleri için katkı oranına bağlı olarak optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6 ve Şekil 6 detaylı olarak incelendiğinde katkılı zeminlerin optimum su muhtevasının katkısız zeminlerin optimum su muhtevasına göre yaklaşık olarak %1 daha fazla çıktığı görülmektedir.

Tablo 6. Katkılı ve katkısız zemin numuneleri için maksimum kuru birim hacim ağırlık – optimum su muhtevası değişimi

	Kalsiyum Lignosülfonat Oranı						
	% 0	% 0.5	% 0.75	% 1	% 2	% 3	% 4
Optimum Su Muhtevası (%)	12.50	12.70	13.00	13.20	13.10	13.30	13.10
Mak. Kuru BHA (kN m^{-3})	17.85	17.86	17.86	17.95	17.99	17.99	17.98

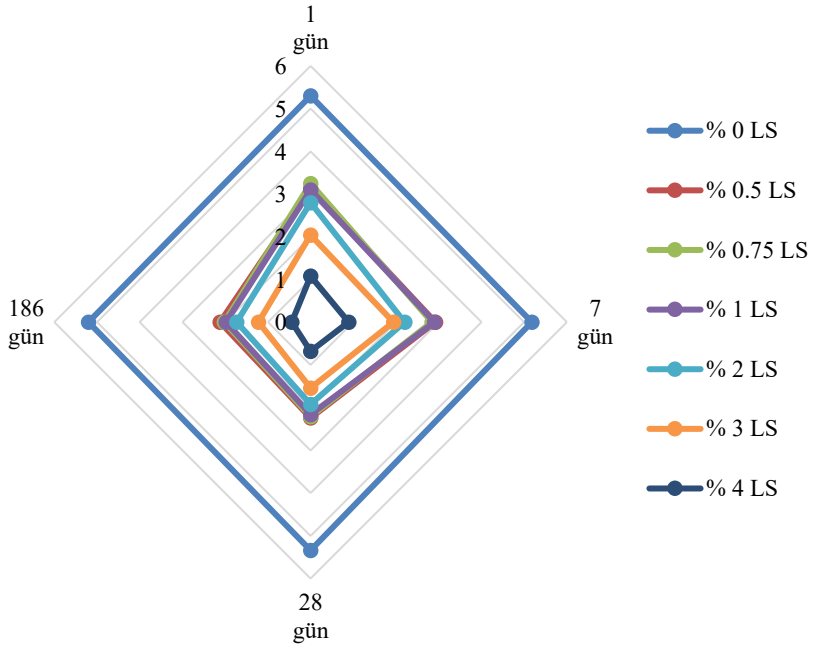
Tablo 6'da verilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine baktığımızda, katkı miktarının artmasıyla birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin arttığı söylenebilir. Fakat meydana gelen bu artış miktarının çok düşük miktarda olduğu ve bu nedenle zemine katılan kalsiyum lignosülfonatın maksimum kuru birim hacim ağırlığa büyük bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir.

Katkılı ve katkısız zemin numunelerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlendikten sonra bu zeminlerin şişme potansiyelleri araştırılmıştır. Şişme potansiyellerinin belirlenmesi için katkılı ve katkısız zemin numuneleri belirlenen optimum su muhtevalarında Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) kalıplarına yerleştirilmiştir. Ardından CBR kalıplarına yerleştirilen zemin numuneleri su dolu kür tanklarına koyularak 4 gün boyunca su içerisinde bekletilmiştir. Bu süreçte zemin numunelerinde meydana gelecek serbest şişme değerlerinin takip edilebilmesi için zemin numunelerinin üzerine deformasyon saatleri yerleştirilmiş ve su içerisinde kaldıkları sürede meydana gelen şişme değerleri okunmuştur. Elde edilen değerler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Farklı kür süreleri için katkılı ve katkısız zemin numunelerinin şişme değerleri

	Kalsiyum Lignosülfonat Oranı						
	% 0	% 0.5	% 0.75	% 1	% 2	% 3	% 4
Kür Süresi	Şişme Miktarı (mm)						
1 gün	5.30	3.13	3.25	3.10	2.80	2.04	1.08
7 gün	5.18	2.92	2.84	2.90	2.20	1.94	0.89
28 gün	5.34	2.24	2.21	2.16	1.92	1.54	0.68
186 gün	5.20	2.12	2.02	1.98	1.73	1.22	0.44

Tablo 7'de verilen şişme oranları incelendiğinde kür süresi ve kalsiyum lignosülfonat oranının artması ile paralel olarak şişme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Katkısız zemin numunesinin şişme miktarı yaklaşık 5 mm değerinde iken % 4 kalsiyum lignosülfonat katkılı zeminlerdeki şişme miktarı 1 mm'nin altına kadar düşmektedir.

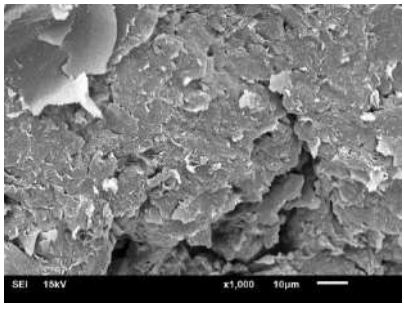


Şekil 7. Kür süresi ve kalsiyum lignosülfonat oranına göre şişme değerlerindeki değişim

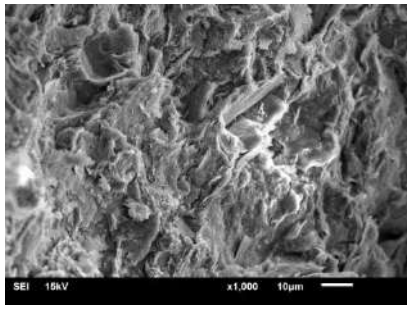
Şekil 7'de şişme miktarındaki değişimin daha net gösterilmesi amacıyla şişme değerleri grafik olarak sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere zemin numunesine kalsiyum lignosülfonat eklenmesi ile birlikte şişme değerlerinde yaklaşık %90'lık bir azalma meydana gelmiştir.

Katkılı ve katkısız zeminlerin mikro yapıdaki değişimleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak incelenmiştir. SEM görüntüleri 1000, 5000, 10000 ve 20000 kat yakınlaştırma değerleri için alınmıştır. Şekil 8'de farklı katkı miktarları için 1000 kat yakınlaştırılmış SEM görüntüleri verilmiştir.

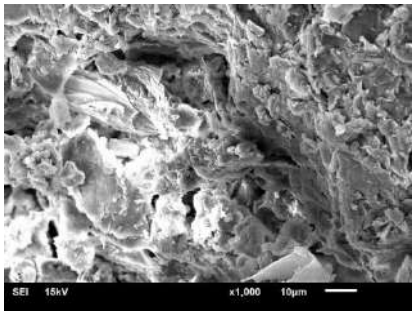
SEM görüntüleri kalsiyum lignosülfonat katkısının mikro yapıda katkısız duruma göre belirgin bir şekilde değişiklikler meydana geldiğini göstermiştir. Zemine katkı katılması ile birlikte zemin daneleri arasındaki boşlukların azaldığı ve çimentolaşma ürünlerinin oluştuğu görülmektedir.



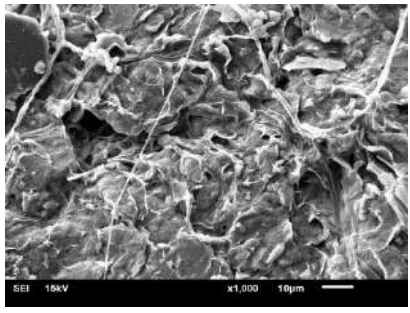
a) Zemin + % 0 LS



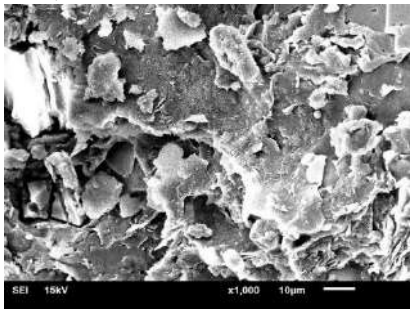
b) Zemin + % 0.5 LS



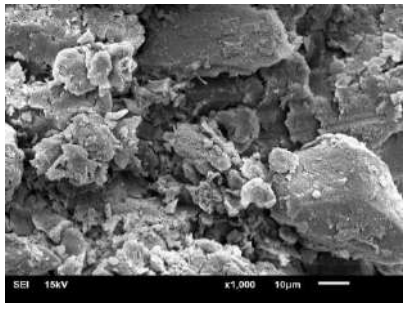
c) Zemin + % 0.75 LS



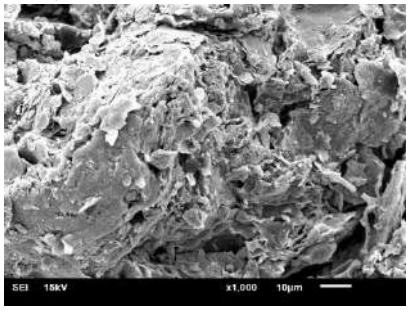
d) Zemin + % 1 LS



e) Zemin + % 2 LS



f) Zemin + % 3 LS



g) Zemin + % 4 LS

Şekil 8. 1000 kat yakınlaştırılmış SEM görüntüleri

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında yüksek plastisiteli bir kile kuru zemin ağırlığının % 0.5, %0.75, %1, %2, %3 ve %4'ü oranlarında kalsiyum lignosülfonat katkısı katılması ile birlikte bazı fiziksel özellikleri ve şişme özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Doğal zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerler sırasıyla % 51, % 19 ve % 32 olarak belirlenmiştir. Doğal zemine kalsiyum lignosülfonat katılması ile birlikte likit limit değerinde ve ona bağlı olarak plastisite indisi değerinde önemli ölçüde bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Zemine katkı oranı olarak en düşük oran olan %0.5 kalsiyum lignosülfonat katılması ile birlikte likit limit değeri %38'e düşmüştür. Katkı oranının arttırılması durumunda ise yine %38'e yakın değerler bulunmuştur. Sonuç olarak bu zemin numunesi için likit limit değerinin, zemine katılan kalsiyum lignosülfonattan ciddi anlamda etkilendiği fakat kalsiyum lignosülfonatın miktarının arttırılmasından çok fazla etkilenmediği söylenilebilir.
- Katkı miktarının arttırılması ile birlikte özgül ağırlık değerlerinin düştüğü görülmüştür. Doğal zemin numunesinin özgül ağırlık değeri 2.72 iken zemine % 4 kalsiyum lignosülfonat katılması ile birlikte özgül ağırlık değerinin 2.53'e düştüğü görülmektedir.
- Doğal zemin numunesinin optimum su muhtevası % 12.5 iken zemine kalsiyum lignosülfonat katılması ile birlikte %12.7 ile % 13.30 arasında değişen değerlere kadar artış göstermiştir. En yüksek optimum su muhtevası zemine % 3 oranında kalsiyum lignosülfonat katılması ile elde edilmiştir. Maksimum birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde ise doğal zeminin birim hacim ağırlığı 17.85 kN m^{-3}iken katkılı zemin numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri 17.86 ile 17.99 kN m^{-3} aralığında değişmektedir. Kompaksiyon eğrisi incelendiğinde zemine kalsiyum lignosülfonat katılması ile kompaksiyon eğrisinin kollarının daraldığı görülmektedir. Eğrinin kollarının daralması su muhtevasından daha fazla etkileneceği anlamını taşımaktadır. Arazide sıkıştırma işlemi yapılırken optimum su muhtevası değerinin kalsiyum lignosülfonat katkılı zeminlerde doğal zeminlere oranla daha dikkatli bir şekilde takip edilmesi gerekmektedir.
- Şişme değerleri incelendiğinde, doğal zemin CBR kalıbına sıkıştırıldıktan ve 4 gün su içerisinde bekletildikten sonra yaklaşık olarak 5 mm şişme yapmıştır. Zemine kalsiyum lignosülfonat katıldıktan ve 4 gün su içerisinde bekletildikten sonra ise şişme değerleri kür süresine bağlı olarak % 40 ila

% 90 oranında azalmıştır. Kür süresinin ve kalsiyum lignosülfonat miktarının artmasının numunenin şişme miktarına katkısı olumlu olmuştur.

Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların en önemli sebeplerinden birinin karayolu altyapılarındaki sorunlar olduğu bilinmektedir. Bu sorunlar zeminlerin şişme potansiyelleri altyapı malzemelerinin düzgün sıkıştırılamaması vb sebeplerden ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen kalsiyum lignosülfonatın, zeminlerin işlenebilirliği ve şişme potansiyellerine yaptığı katkılar olumlu bulunmuştur. Bu nedenle zemin iyileştirmesinde sıklıkla kullanılan kireç, çimento, uçucu kül vb. katkılara alternatif olarak kalsiyum lignosülfonatın da zemin iyileştirmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. James, J., Tagore Engineering College, Kasinatha Pandian, P., & Karpaga Vinayaga College of Engineering and Technology. (2018). Strength and microstructure of micro ceramic dust admixed lime stabilized soil. *Revista de La Construcción*, 5–22. doi:10.7764/rdlc.17.1.5
2. Puppala, A., & Hanchanloet, J. (1999). Evaluation of a new chemical treatment method on strength and resilient properties of a cohesive soil. In *Annual Meeting*. Transportation Research Board.
3. Tingle, J. S., & Santori, R. (2003). Stabilization of clay soils with non-traditional additives. *Transportation Research Record*, *1819*, 72–84.
4. Noorzad, R., & Ta'negonbadi, B. (2018). Mechanical properties of expansive clay stabilized with lignosulphonate. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *51*(4), 483–492. doi:10.1144/qjegh2017-050
5. Chen, Q., Indraratna, B., Carter, J., & Rujikiatkamjorn, C. (2014). A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt. *Computers and Geotechnics*, *61*, 316–327. doi:10.1016/j.compgeo.2014.06.010
6. Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., & Heitor, A. (2018). Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture. *Transportation Geotechnics*, *14*, 81–92. doi:10.1016/j.trgeo.2017.11.001
7. Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., & Ezeajugh, L. E. (2016). The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Ground Improvement*, *169*(3), 182–193. doi:10.1680/jgrim.15.00002
8. Vijayan, G., & Sasikumar, A. (2019). Stabilization of clayey soil by using lignosulfonate. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *6*(2), 1963–1967.
9. Fernández, M. T., Orlandi, S., Codevilla, M., Piqué, T. M., & Manzanal, D. (2021). Performance of calcium lignosulfonate as a stabiliser of highly expansive clay. *Transportation Geotechnics*, 27(100469), 100469. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100469
10. Konnur, S., & Antaratani, S. (2017). Ground improvement by stabilization technique using Pond Ash and Sodium ligno sulphonate. *Technial Research Organisation India*, 4(11), 8-16.
11. Vinod, J. S., Indraratna, B., & Mahamud, M. A. A. (2012). Elastic modules of soils treated with lignosulfonate. *ANZ Conferance Proceedings* (pp. 487–492).

12. Koohpeyma, H. R., Vakili, A. H., Moayedi, H., Panjsetooni, A., & Nazir, R. (2013). Investigating the effect of lignosulfonate on erosion rate of the embankments constructed with clayey sand. *The Scientific World Journal*, *2013*, 587462. doi:10.1155/2013/587462
13. Vakili, A. H., Kaedi, M., Mokhberi, M., Selamat, M. R. B., & Salimi, M. (2018). Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application. *Applied Clay Science*, 152, 1–8. doi:10.1016/j.clay.2017.11.039
14. Wu, D., She, W., Wei, L., Zuo, W., Hu, X., Hong, J., & Miao, C. (2020). Stabilization mechanism of calcium lignosulphonate used in expansion sensitive soil. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, *35*(5), 847–855. doi:10.1007/s11595-020-2329-y
15. Ta'negonbadi, B., & Noorzad, R. (2018). Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: An experimental investigation. *Transportation Geotechnics*, *17*, 41–50. doi:10.1016/j.trgeo.2018.09.001
16. Adams, J. W. (1988). Environmental effects of applying ligno-sulfonate to roads, Daishowa chemicals Incorporated.
17. ASTM D1557-12, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3))", ASTM International, West Conshohocken, PA. (2021)
18. ASTM D422-63, "Standard test method for particle-size analysis of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA. (2007)
19. ASTM D4318, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA. (2000)
20. ASTM D854-14, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", ASTM International, West Conshohocken, PA. (2014)

VAN GÖLÜ KİRLİLİK DURUMU VE GELECEĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA*

Erkan MARHAN[1]
İbrahim KOÇ

**Bu çalışma Çevre Mühendisi Erkan MARHAN'a ait Yüksek Lisans Tezi'nden üretilmiştir.*

[1] Bilim Uzmanı, Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, ORCID NO: 0000-0003-3426-1666.
[2] Doç. Dr., Mardin Artuklu Üniversitesi, Kızıltepe Meslek Yüksekokulu, ORCID NO: 0000-0003-0803-6801.

1. Giriş

Doğa, insan nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte direkt ya da dolaylı olarak birçok başlıkta zarar görmüş ve görmeye devam etmektedir. Bu zarar, doğal kaynakların (orman,toprak, su kaynakları, petrol ve kömür gibi) daha çok kullanılması ve kirletilmesi (hava, toprak ve su), insan ve doğa kaynaklı afetlerle daha da derinleşmektedir. Tüm bunlar, doğanın paydaşları olan başta insanlar olmak üzere canlı ve cansız tüm varlıkları olumsuz etkilemektedir. Yerküre, üzerinde bulundurduğu milyonlarca canlının varlığını ekolojik bir denge şartı ile sürdürmektedir.Erginyürek (2018: 3), bu ekolojik dengenin olduğu önemli yerlerden bir tanesi Van Gölü'nün bulunduğu Van Gölü Havzası'dır.Kapalı havza özelliği gösteren (Elp vd., 2016: 563) bu alan,ülkemizin en büyük ikinci kapalı havzası özelliğindedir (Aydın &Öz, 2021: 441). Havza, adını büyük durgun su kaynağı olan Van Gölü'nden almaktadır (Elp vd., 2016: 563-564). Van Gölü merkezi, 38.5°N enlemi ve 43°E boylamı üzerinde bulunan, etrafı yüksek dağlar ve platolar ile çevrili bir alandır (Turunçoğlu& Dalfes, 2008). Sahip olduğu 3.713 km²'lik alan ileTürkiye'nin en büyük gölü ve dünyadaki en büyük soda gölüdür(Çiftçi vd., 2008: 52). Havzada bulunan 101 adet akarsu, Van Gölüne farklı miktarlarda su taşımakta (Deniz, 2008) olup, bunlardan bazıları; Karasu, Bendimahi, Deliçay, Zilan, Sapur ve Engil akarsularıdır (Elp vd., 2016: 564). Gölün kıyı kesimi, yerleşme ve tarıma elverişlidir (Deniz, 2008). Van Gölü, bulunduğu havzadaki nüfusun artışı ve iç göçlerden ötürü kirlilik tehlikesi altındadır (Turunçoğlu &Dalfes, 2008; Garipağaoğlu& Uzun, 2021: 350-351). Havzadaki akarsular, insan aktiviteleri ile kirlenen su ve toprağın kirlilik yükünü Van Gölü'ne taşımaktadır (Kılıçel vd., 2008b). Evsel katı atıklar ve lağım suları, buradaki kirlilik kaynakları arasında başı çekmektedir (Deniz, 2008). Kullanımı artan gübre ve pestisitlerden ötürü Van Gölü zaman geçtikçe kirlenmektedir (Aslan vd., 2008). Havzadaki son alıcı ortam, Van Gölü'dür (Çiftçi vd., 2008: 45). Dışa akışının olmamasından kaynaklı göl, gün geçtikçe biraz daha kirlenmektedir (Deniz, 2008). Bilindiği üzere, havza alanları doğal ve beşeri birçok faktörü barındırmaktadır. Bu alanlardameydana gelecek herhangi bir değişim çeşitli sorunlara yol açabilir (Garipağaoğlu& Uzun, 2021: 350-351).Bu ihtimalin önüne geçebilmek için, insanların bilinçlendirilmesi, yerel ve merkezi yönetimlerin ortak hareket etmelerihayati önem taşımaktadır (Kılıçel vd., 2008b).

Bu kitap bölümü, literatür taraması yöntemi kullanılarak derleme türünde bir araştırma şeklinde yapılmıştır. Ayrıca, çalışma alanında araştırmacı tarafından gözlemler yapılarak, fotoğraf çekimleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın, Van

Gölü'nün korunması ve sürdürülebilirliğine yönelik yapılacak çalışmalara katkı sunacağı öngörülmektedir.

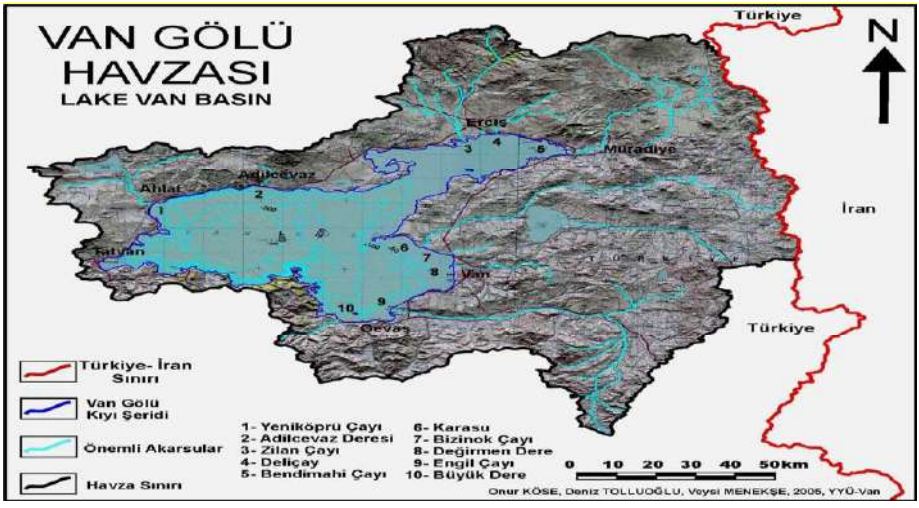
2. Çevre Kirliliği, Van Gölü Havzası ve Van Gölü Kirlilik Durumu

Çevre; "Bir canlı organizmayı veya bir canlı topluluğunu yaşama süresince etkileyen her türlü, biyotik ve abiyotik (sosyal, kültürel, tarihsel, iklimsel ve fiziksel) faktörlerin tümü" olarak adlandırılmakta (Yücel & Morgil, 1998: 84), Çevre kirliliği ise "Çevrede meydana gelen ve canlıların sağlığını, çevresel değerleri ve ekolojik dengeyi bozabilecek her türlü olumsuz etki" şeklinde ifade edilmektedir (Çevre Kanunu, 2872, 09.08.1983, Tertip:5, Cilt:22). Çevre kirliliği, doğal kirlilik ve insan kaynaklı kirlilik şeklinde sınıflandırılabilmektedir (Appannagari, 2017: 151).

Ülkemizde bulunan 26 havzadan bir tanesi olan Van Gölü Havzası (Koyuncu ve Karakılçık, 2018: 20),kapalı bir havza özelliği göstermekle birlikte yaklaşık 20.000 km^2'lik bir doğal yaşam alanına sahiptir. Bir milyon civarı insan ve bu rakamın birkaç katı kadar besi hayvanı barındıran önemli bir alandır (Yiğit vd., 2017: 170). Van Gölü Havzası, adını gerek ülkemiz ve gerekse dünya için önemli büyük durgun su kaynağı olan Van Gölü'nden almaktadır (Elp vd., 2016: 563-564). Van Gölü, Nemrut Dağı Volkan'ından (Fotoğraf 2.1.) çıkan lavların oluşturduğu set ile şekillenmiş ve buranınzamanla sularla dolması veMurat Irmağı'nın lavlarla tıkanması ile birlikte meydana gelmiştir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).

Fotoğraf 2.1. Tatvan Nemrut Dağı (Marhan, 2022)

Van Gölünün, etrafı dağlarla çevrili (Çiftçi vd., 2008: 52-53) olup, güneyinde metamorfik, kuzey ve batısında tümüyle volkanik ve doğusunda ise baskın olarak sedimanter kayaçlar mevcuttur (Yiğit vd., 2017: 167-170). Gölün suyu acı, tuzlu ve sodalıdır. Ülkemizin en büyük gölü olması ile birlikte yeryüzündeki en büyük soda gölüdür (Çiftçi vd., 2008: 52-53). Van Gölü, tatlı su ve deniz suyundan farklı bir sucul ekosisteme sahiptir (Yiğit vd., 2017: 167-170). Van gölü havzası, su kaynakları bakımından çeşitlilik göstermektedir (Harita 2.1.). Van Gölü'ne ortalama olarak yılda 2.6 milyar m^3 yüzeysel su dahil olmaktadır (Çiftçi vd., 2008: 53).



Harita 2.1. Van Gölü Havza sınırları ve ana akarsular (Çiftçi vd., 2008: 47)

Yeraltı suyu depolama kapasitesi bakımından, havza Türkiye'nin düşük kapasitesi olan bir bölgede yer almaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). Havzanın çevresindeki nüfusun artması ile birlikte Van Gölü'nü besleyen kaynakların azaldığı ve su seviyesinin düştüğü saptanmıştır (Altan-Aydın & Doğu, 2018: 183; Erginyürek, 2018: 3). Havzadaki ovalarda yapılan sulama projeleri sonuçlandırıldığında, Van Gölüne dâhil olan su miktarında yaklaşık 500 milyon m^3'lük bir azalma olacağı ön görülmektedir. Ayrıca, Yaz ve kış ayları arasında, göldeki su seviyesinde 50-60 cm'lik bir oynama görülmektedir (Çiftçi vd., 2008: 53-54).

Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan jeotermal kaynaklar, volkanik alanlar ile fay hatlarının geçtiği alanlarda olup, belirlenen kaynakların ise düşük ve orta sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir (Elmastaş, 2008: 93).Kaplıca kaynaklarının oluşumuna etki eden faktörler açısından, Van Gölü çevresi Tatvan-Van fay hattının güney ve kuzey bölümleri ile iki ayrı özellik göstermekte olup, hattın

kuzeyinde kalan bölgelerde çok sayıda sıcak su kaynağı tespit edilmiştir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).Van Gölü'ne yılda 1.4 Milyon m^3 civarı sıcak su deşarj olmaktadır (Çiftçi vd., 2008: 57) (Fotoğraf 2.2.).

Fotoğraf 2.2. Tatvan Kıyıdüzü Köyü kaplıca suyu (Marhan, 2022)

Van Gölü, tabanında bulundurduğu uranyum ve kendi kimyasal özellikleri ile dikkatleri üzerine çekmiştir (Yılmaz &Günay, 2021: 554). Van Gölü Havzasında, antik dönemlerden günümüze kadar yapılmış ve hala yapılmakta (kalker ocakları, doğal agrega, kırmataş ve pomza işletmesi, jips ocakları ve skorya konileri vs) olan madencilik faaliyetlerinden kaynaklı çevresel kirlilik oluşmuştur. Ayrıca, havzanıngelişigüzel kazılmasıile düşen yağışın sızmasına-yer altı suyuna katılmasına ve erozyonun hızlanmasına sebep olmaktadır. Dolayısı ile Van Gölü'ne dahil olan askıda katı madde miktarı artmakta, su kalitesi olumsuz etkilenmekte, kimyasal kontaminasyon olmakta ve göl tabanındaki sedimantasyon hızı yükselmektedir(Çiftçi vd., 2008: 45-75). Van Gölü Havzasında bulunan illerden Bitlis ilinde, doğal ve beşeri faktörlerden kaynaklıhava, su ve toprak kirliliği insan sağlığını tehdit edici boyutlara varan çevre sorunlarına yol açmış ve ilde önemli derecede yeşil alan kayıpları oluşmuştur (Alkan, 2015: 11). Yapılan bir araştırmada, Bitlis belediyelerinin Van Gölünü yeterli düzeyde korumadığı ifade edilmiştir (Yılmaz &Günay, 2021: 574).Havzada, bulunan tuzlu su kaynaklarının su kaliteleri ve ağır metal kirlilik düzeyleri ile ilgili yapılan bir çalışmada, ağır metal indeksi kalite sınıfına göre genel anlamda "kullanılamaz su" sınıfına dahil olduğu bildirilmiştir (Atıcı vd., 2021: 284). Van Gölü çevresindeki tarım arazilerinin çoğunluğunda erozyon problemi görülmektedir (Yılmaz &Günay, 2021: 554).Bilgili vd. (1995: 445), Van Gölü suyunun doğal kalitesini yansıtan

özellikleri ve inci kefali (*Chalcalhurnus tarichi*, Pallas 1811) örneklerinde yaptıkları incelemeler sonucunda; göl suyunun içerdiği katyon ve anyonlar bakımından, Türkiye Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne göre oldukça kirlenmiş (IV. sınıf su kalitesinde), yüksek derecede tuzlu ve sert su niteliğinde olduğunu beyan etmişlerdir. Ayrıca, inci kefali balıklarında ölçülen kurşun düzeylerinin insan sağlığı bakımından riskler taşıyacak kadar yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.Yarsan vd. (2000: 93), 1994-1995 yılları arasında dört mevsimi kapsayacak şekilde Van Gölü'nden topladıkları midye (*Unio stevenianus* Krynicki) örneklerinde; metal yoğunluklarının, kabul edilen normal değerler içerisinde olduğunu bildirmişlerdir.Ogun vd. (2005: 1031), Edremit ve Zeve ilçeleri arasında Van Gölü suyundaki kirlilik oranı ve heterotrofik bakteri popülasyonunu değerlendirmek amacı ile kıyıdan 10 ve 100 m uzaklıkta (kıyı boyunca yaklaşık 20 km) seçtikleri 8 istasyondan aldıkları örneklerde; fiziko-kimyasal karakterinin önemli ölçüde değiştiği bulgusunun yanı sıra su örneklerinde aktinomiset saptamamışlardır. Göle büyük oranda organik madde akmasına karşın, yüksek soda içeriği ve yüksek pH nedeni ile daha az kirlendiğini ve Van Gölü'nün doğu sahil şeridini korumak için bir an önce önlem alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.Özgökçe vd. (2008),2004-2006 yıllarında Van gölü kıyı şeridinde yaptıkları örneklemlerde 14'ü Rotifera, 3'ü Hexapoda, 4'ü Copepoda ve 2'si Branchipoda sınıflarına ait olmak üzere toplamda 23 tür saptamışlardır. Van gölü kıyı şeridinde; *Keratella quadrata, Notholca squamula, Colurella colurus, Lecane grandis, Lecane ohiensis* ve *Lecane lamellata* türleri ilk defa tespit edilmiş ve bu türler su kirliliğinin göstergesi olarak örnekleme istasyonlarının tamamında bulunmuştur. Gölün baskın türlerini meydana getiren *H. mira* ve *B. Pilicatilis* ise kirlilik ve ötrofikasyon göstergesi olarak kabul edilmiştir.Kılıçel vd. (2008a), Van şehir çöplerinin döküldüğü yerlerdeki topraklarda, Zn dışındaki elementlerin kirlilik oluşturacak seviyede olduğunubelirlemiştir. Bu kirliliğin, yağışlar aracılığı ile Sıhke Göletine taşındığı ve gölet suyunun sulama suyu olarak kullanıldığı, Akköprü deresi aracılığı ile Van Gölü'ne döküldüğü ve yer altı sularına karıştığını bildirmişlerdir.Kılıçel vd.(2008b), Van Gölü'ne dökülen akarsulardan aldıkları numunelerde; Cu, Pb, ve Co konsantrasyonlarının yüksek, Cd, Mn, Zn, Ni, Cr ve Fe konsantrasyonlarının normal veya normal değerlerin altında olduğunu bildirmişlerdir. Toprak örneklerinde ise Cu, Cd, Cr, Pb ve Ni konsantrasyonlarının yüksek; Zn, Co ve Mn konsantrasyonlarının da normal değerlerde olduğunu ifade etmişlerdir.Omeroglu vd. (2022: 2), dört mevsimi temsil edecek şekilde 7.5 metre derinlikten göl suyu ve tortusundan aldıkları numunelerde toplam arsenik miktarının mevsimsel olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Zorer vd. (2009: 46), 2005 yılının Mayıs-Ağustos aylarında

Bendimahi Çayı'ndan aldıkları toprak, su ve tortu numunelerinde brüt-alfa ve brüt-beta radyoaktivite konsantrasyonlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak; Bendimahi Çayı havzasındaki su örneklerinin çoğunda, gros-alfa ve brüt beta radyoaktivite konsantrasyonlarının DSÖ tarafından içme suyu için verilen kılavuzlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Elde ettikleribulgulara göre,tarım alanlarının ve jeolojik oluşumun doğal radyoaktivite oluşumunu güçlü bir şekilde etkilediğini saptamışlardır.Yıldız &Yener (2010: 80), gölün doğu kısmından belirledikleri üç sediment korunda C.R.S. modeli ile birlikte kullanarak sediment birikim hızı ve denge üstü ^{210}Pb profil dağılımları ile ^{210}Pb akısını hesaplayarak her katmanın tarihlemesini yapmışlardır. Korlardaki ortalama sediment birikim hızlarını 0.031±0.011, 0.046±0.021 ve 0.077±0.051 $g.cm^{-2}.y^{-1}$ olarak saptamışlardır. İnsan aktivitelerinin ve akarsu ile tarımsal alanlardan taşınımın yüksek olduğu kesimde sediment birikim hızlarının çok daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, ^{137}Cs izotopunun iki sediment koru boyunca dağılımlarını incelmiş ve 1954-1963 yıllarındaki nükleer silah denemeleri sonucunda ve 1986 yılındaki Çernobil kazasında çevreye yayılan ^{137}Cs'nin varlığını bildirmişlerdir. Ayrıca endüstriyel, kentsel, tarımsal atıklar ve havzanın jeolojisiyle ilişkili olan ağır metal konsantrasyonlarını (Cd, Cu, Cr ve Pb) tespit etmişlerdir.Zorer & Şahan (2011: 417), gölden aldıkları 18 yüzey suyu numunesinden brüt α, brüt β aktiviteleri ve ^{238}U konsantrasyonlarını belirlemek amacı ile bir araştırma yapmışlardır. Sonuç olarak; yüzey sularındaki brüt α ve β aktiviteleri için sırasıyla 0.001 ile 0.021 Bq L^{-1} ve 0.111 ile 2.794 Bq L^{-1} arasında değişen konsantrasyonları saptamışlardır. Ayrıca, su numunelerindeki brüt α radyoaktif kontaminasyonun, içme suları kılavuzunda önerilen değerlerden daha düşük olduğunu ve su numunelerindeki brüt β aktivitelerinin çoğunun aynı prosedürdekilerden daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır. ^{238}U konsantrasyonlarının ise uranyum için kılavuz değerlerden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.Yiğit vd. (2017: 169), gölün 8 farklı nokta ve 9 farklı derinliğinden aldıkları örneklerden, göl suyunun doğal kalitesini gösteren anyon ve katyonların konsantrasyon düzeylerini (kalsiyum 355.3, ortalama pH değerinin 9.52 düzeyinde, sodyum 8 612.6, magnezyum 117.1, potasyum 473.6, lityum 0.3 ppm; klorür 10.5, florür 4.8, nitrat 3.7, fosfat 13.6, bromür 20.5 ve sülfat 2 900.4 ppm) belirlemişlerdir. Mevzuatbakımından,iyonik bileşenler açısından göl suyunun "Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği"nde IV. sınıf su kalitesinde olduğunu beyan etmişlerdir.Kayakökü & Doğru (2017: 231), göl kıyısından topladıkları toprak örneklerinde, yüksek saflıkta bir germanyum dedektörü aracılığı ile^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ve ^{137}Cs radyoaktif izotoplarının konsantrasyonlarını ölçmeyi amaçlamışlardır. Toprak örnekleri için hesapladıkları ortalama ^{226}Ra, ^{232}Th ve

^{40}K aktivite konsantrasyonlarının UNSCEAR tarafından bildirilen dünya ortalama değerlerinden daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ünal vd. (2018: 1), 2018 yılı Mart ayında Tatvan-Ahlat ilçeleri sahil boyu gölden aldıklarısu numunelerinin bazı mikrobiyolojik ve fiziko-kimyasal parametrelerin Türk Standartları Enstitüsü (TSE) değerlerine uygun olduğunu saptamışlardır.Kayakökü (2018: 1), gölün aktif fay hatlarının geçtiği kuzey ve batı kıyısından(Tatvan, Ahlat, Adilcevaz ve Erciş ilçeleri)aldığı su, dip çamuru ve toprak örneklerinde doğal radyoaktif (^{238}U, ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K) analizlerinin yanı sıra komşu ülkelerdeki enerji üretiminden kaynaklı radyoaktifbulaşmanın olup olmadığını belirlemek amacıyla, ^{137}Cs, 90Sr ve 129I radyoizotop analizlerini de gerçekleştirmiştir. Ayrıca, Zn, Fe, Mn, Ni, Cu, Cr ve Co gibi ağır metal ve ana element (Mg, Ca, Na ve K) konsantrasyonlarını araştırmıştır. Sonuç olarak; Van Gölü su örneklerinde Cu elementi dışında ciddi bir kirlilik durumunun mevcut olmadığını bildirmiştir. Süphan fay hattının geçtiği 11 nolu istasyonun olduğu bölgedeki toprak ve sulardaki radon içeriğinin etkilenmesi beklenen bir durum olduğunu ortaya koymuştur. Demir-Yetiş &Özgüven (2020: 831), Edremit kıyı açıklarında, 2019 yılıMayıs-Ağustos ayları süresince ağır metal konsantrasyonlarını belirlemek üzere 8 farklı noktadan yüzey suyu örneklemesi yapmışlardır. Sonuç olarak; Bor bakımından IV. sınıf, Cd bakımından III. sınıf ve Cr açısından da II. sınıf su kalitesi özelliği gösterdiği ortaya konulmuştur.Atıcı vd. (2021: 285), 2019 yılı Temmuz ayında gölün 7 noktasından aldığı numunelerde ağır metal kirlilik indeksini hesaplamışlardır. Sonuç olarak; Mo> Mn> Al> Zn> Fe> Cr> Co> Ni> As tespitleri ile birlikte, N1'in, "iyi" sınıftaki tek istasyon olduğunu ve diğer numune noktalarının "uygun olmayan su" sınıfına dâhil edildiğini ortaya koymuşlardır.Aydın vd. (2021: 132), 2015 yılı Haziran-Eylül ayları arasında gölün 29 farklı noktasından aldıkları su numunelerinde; fekal koliform, toplam koliform ve enterokok varlığını saptamaya çalışmışlardır. Aldıkları 232 numunenin 196'sında (%84) herhangi bir bakteriyel kirlilik görülmezken, 36 örneğin (%16) fekal koliform, toplam koliform ve enterokok türleri ile kontamine olduğunu bildirmişlerdir. Sonuç olarak; mikrobiyolojik kirlilik görülen noktalarda halk sağlığı bakımından gerekli önlemlerin alınması konusunda uyarılarda bulunmuşlardır. Atici vd. (2022: 1), Kasım 2019'da Van Körfezi'nde 335 µm ağ örgülü bir manta trolü aracılığı ile mikroplastik (MP) kirlilik 15 istasyondan alınan su örnekleri ile araştırmışlardır. En sık gözlenen MP tipi, boyutu, şekli ve renk sınıfları sırası ile fiber (%40.5), <0.1 mm (%52.3), düzensiz (%40.8) ve mavi (%57.1) olduğunu beyan etmişlerdir. En yüksek MP bolluğunun ise göl akıntısının etkili olduğu 14 ve 15 nolu istasyonda gözlemişlerdir. İstasyon 6'da, yoğun nüfuslu şehir merkezinden geçen Akköprü ve Kurubaş derelerine yakın

olması nedeniyle ciddi plastik kirlilik baskısı altında olduğu bildirilmiştir. İncelenen tüm MP'lerin, kimyasal yapısının polietilen (%60.2), ardından polipropilen (%20.4), polietilen tereftalat (%17.2) ve poli(metil akrilat) (%2.2) olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak; Van Körfezi yüzey sularının yüksek oranda MP'ler ile kirlendiğini ortaya koymuşlardır.Van Gölü Havza'sında, bulunan atıkların yaptığı kirliliklerin (fotoğraf 2.3., fotoğraf 2.4.), Van ve Tatvan gibi şehirlerin yer aldığı koylardır. Van gölü çevresinde bulunan bu kıyılarda çıkan atıkların depolanmadığı, bir birikim sahasına dönüştüğü ve buralardaki plajların kaybetme durumuna dönüştüğü ifade edilmiş, Van Gölü çevresinde belli başlı yerlerde birçok alanda ve kentlerin kıyılarında organik atıkların olduğu yosunlaşmaya yol açmaktadır (Yiğit vd., 2017: 169).

Fotoğraf 2.3. Tatvan mezbahana'den Van Gölüne atık girişi (Marhan, 2022)

Fotoğraf 2.4. Van gölü Tatvan sahili kirlilik durumu (Marhan, 2022)

3. Van Gölü'nün Geleceği

Van Gölü Havzası, fiziki coğrafyası bakımından renkli olmasının yanı sıra, farklı kültür ve medeniyetlerin etkisinde kalmış özel bir bölgedir (Alaeddinoğlu, 2014: 267). Gerek Van Gölü'nün bulunduğu havza ve gerekse Van Gölü, hassas ekolojik dengeye sahip (Erginyürek, 2018: 3), bir milyondan fazla insan nüfusunu ve bir o kadarda hayvan ve bitki çeşitliliğini barındırmaktadır (Çiftçi vd., 2008: 46-47; Yiğit vd., 2017: 170).Van Gölü Havza'sı, Dünya'daki en önemli kuş göçü yollarından birine yakın olup,üç yüz civarı kuş türüne ev sahipliği yapmaktave ülkemizdeki sulak alanlarının yaklaşık 1/5'ine sahiptir (Alaeddinoğlu & Aydın, 2018: 370). Burası, endemik tür çeşitliliği açısından zengin bir yer olup, havzada yayılış gösteren balık türlerinin tamamı endemiktir (Elp vd., 2016: 563).Van Gölü Havzası'nın jeolojik-jeomorfolojik yapısı, sıcak su deşarjları, erozyon, kontrolsüz madencilik gibi faaliyetlerden kaynaklı (Çiftçi vd., 2008: 45; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022), tarım ve hayvancılık gibi faaliyetlerdenkaynaklı (Van Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Van İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu, 2022; Bitlis Valiliği Çevre Ve Şehircilik İl Müdürlüğü Bitlis İli 2020 Yılı Çevre Durum Raporu, 2022;

Tarım ve Orman BakanlığıGıda Ve Kontrol Genel Müdürlüğü, 2022) ve insanların yaşamsal faaliyetlerinden kaynaklı oluşan kirlilikten dolayı havza kirlenmektedir. Havzada, son alıcı ortam Van Gölü'dür (Çiftçi vd., 2008: 45). Günümüzde, çevre sorunlarının başında şüphesis küresel ısınma ve iklim değişikliği gelmektedir (Büyükyıldız & Yılmaz, 2011: 1061). Dünya Bankasının,1975-2008 yılları arasındaki verilerinden anlaşılacağı üzere son 55 yılın içinde afet sayısında yaklaşık 10 katlık bir artışolmuştur (Ersoy, 2009: 2). Türkiye'de, afetler daha sık görülür hale gelmiş (Şahin, 2019: 181) veülkemiz afetlerden ötürü oluşan kayıplar (mal, can ve ekonomik) bakımından OECD ülkeleri arasında ilk sıralarda yer almıştır (Dölek, 2016: 322). Ülkemizde, önem sırasına göre oluşan afetler; depremler, heyelanlar, su baskınları, kaya düşmeleri, yangınlar, çığ ve fırtına'dır (Ersoy, 2009: 1). Afetler, gerek meydana geldiği sırada birden çok çevresel probleme yol açabilmekte ve gerekse afetlerden sonra oluşan gaz, katı ve sıvı kirleticileri yağış, sel, sızma, rüzgâr gibi faktörlerin etkisi ile çevre felaketlerine kaynaklıkedebilmektedir(Özel, 2020: 39). Van Gölü Havzasındakigerek arazinin coğrafik konumu ile jeolojik yapısı ve gerekse meteorolojik koşullarından kaynaklı oluşan/oluşacak kuraklık, sel, deprem, heyelan, su baskını, kaya düşmesi, çığ ve gölün su seviyesinin yükselmesi gibi afetler(Özşahin, 2013: 1; Ekinci vd., 2020: 1; Aydın & Arif, 2021: 44; Giyik vd., 2022: 178), Van Gölü'nü olumsuz etkileyecektir.Van Gölü, Van Gölü Havza'sındaki faaliyetlerin son uğrak yerinin olması sebebi ile gerek doğa kaynaklı afetler ve gerekse insan faaliyetlerden ötürü kirlenmektedir. İnsanların, özellikle Van Gölü etrafına yerleşmesi, yapılaşması (fotoğraf 2.3. ve fotoğraf 2.4.), alt yapı sıkıntıları gibi problemler ile birlikte oluşacak afetler Van Gölü'ne verilecek zararı katlayacaktır.

Fotoğraf 2.3. Erciş maden ocağı (Marhan, 2022)

Fotoğraf 2.4. Van beton santralı (Marhan, 2022)

4. Sonuç

Ülkemizde bulunan 26 havzadan bir tanesi olan Van Gölü Havzası (Koyuncu & Karakılçık, 2018: 20), dünya üzerindeki diğer kapalı havza gölleri gibi hassas ekolojik bir dengede (Erginyürek, 2018: 103), yaklaşık 20.000 km^2'lik bir doğal yaşam alanına ile bir milyondan fazla insan nüfusunu ve bir o kadarda hayvan ile bitki çeşitliliğini barındırmaktadır (Çiftçi vd., 2008: 46-47). Van Gölü Havzasında en büyük alıcı ortam Van Gölü olup, havzanın içe akışlı olmasından ötürü ortamın jeokimyasının değişmesi, tüm havzadaki yaşamı derinden etkilemektedir (Çiftçi vd., 2008: 56). Havzanın kapalı özellik göstermesinden ötürü, artan insan nüfusu ile birlikle göldeki kirlilik oranı da artmaktadır (Çiftçi vd., 2008: 45; Aydın vd., 2018: 1761). Nüfusun artışı ile birlikte Van Gölü'nü besleyen kaynaklardaki su miktarı azalmıştır (Erginyürek, 2018: 3). Ayrıca, sıcaklık, yağış ve buharlaşma parametreleri bakımından da havzanın geleceğine dair olumsuz sonuçlar ortaya çıkmıştır (Alaeddinoğlu, 2014: 264).Dünyada,1990-2000 yılları süresince oluşan doğal afetlerin sayısı 1900-1940 yılları arasında oluşan doğal afet sayısından 7 kat fazla olmuştur. Bu durumun yaşanmasında, artan nüfus ile birlikte, sanayileşme, çarpık kentleşme, yanlış seçilen yerleşim alanları ve doğanın tahrip edilmesi gibi önemli etkenler yatmaktadır (Dölek, 2016: 315).Su konusu, gerek nüfusun artması ile hızla artan su talebi, gerek küresel ısınma ve gerekse suyun yanlış kullanımından dolayı zamanla kullanılabilir su kaynaklarının azalması gibi sebeplerden ötürü uluslararası gündemde ilk sıraya taşınmıştır (Aküzüm vd., 2010: 67). Gölde, doğa ve beşeri kökenli sebeplerden dolayı önemli değişimler yaşanmaktadır (Altan-Aydın & Doğu, 2018: 183). Yılmaz ve Günay (2021: 574) tarafınca yapılan bir araştırmada, Van Gölü'nün büyük bir kısmında bulunan Bitlis il ve ilçe belediyelerinin gölden faydalanma ve korunması bağlamında yaptıkları faaliyetlerin yeterli düzeyde olmadığını bildirmişlerdir. Van Gölü, yüzyıllardır tüm varlığı ile tarihe tanıklık eden önemli bir değerdir (Yılmaz ve Günay, 2021: 577), sahip olduğu özellikleri ile gerek ülkemiz ve gerekse dünya bağlamında kaybedilemez bir konumdadır. Gölün kirliliği (doğal ve antropojenik), su seviyesindeki değişimlerden ötürü oluşan/oluşacak kuraklık ya da taşkınlığın yanı sıra havzada meydana gelen/gelecek doğal (çığ, sel, kaya düşmesi, heyelan ve deprem gibi) ya da insan kaynaklı faaliyetlerden (fabrika, tesis, alt yapı, çarpık kentleşme, turizm, göl taşımacılığı vs.) ötürü risk altındadır. Van Gölü, yeryüzünde farklı sebeplerden ötürü yok olmuş göller arasında olması istenilmiyorsa gerek bulunduğumuz zaman dilimi ve gerekse gelecek açısından hem kirlilik boyutu ve hem de afet boyutu ile korunması gerekmektedir. Van Gölü'nün korunması için yapılabilecek bazı faaliyetleri şöyle sıralayabiliriz;

1. Artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte doğa tahribatının arttığı görülmekte olup, bu durumun engellenmesi hayati önem taşımaktadır (Dölek, 2016: 318).
2. VanGölü'ne dökülen tüm akarsularda kalite ve kirletici kaynaklara yönelik kapsamlı çalışma yapılmalı ve göl suyu kalitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir (Aydın vd., 2018: 1761).
3. Su kayıplarının önlenmesi amacı ile su kaynaklarının kullanımının (tarım, sanayi ve evsel amaçlı) geliştirilmesi (Aküzüm vd., 2010: 67), suyun miktarı ve kalitesine göre ürün çeşidi planlaması yapılmalıdır (Demir & Şen, 2021: 102).
4. Drenaj ve atık suların yeniden kullanım olanakları geliştirilmelidir (Çakmak vd., 2007: 879).
5. Havzada yapılan madencilik ve bahçe toprağı temini için yapılan kontrolsüz kazı faaliyetlerinin çevre duyarlılığı bilincinde yapılması gerekmektedir (Çiftçi vd., 2008: 45).
6. Van Gölü etrafında kurulu bütün yerleşim alanlarında atık su arıtma tesislerinin kurulması hayati önem taşımaktadır.
7. Van Gölü'nü besleyen kaynak ve yağmur sularının göle taşıdığı katı atıkların toplanması amacıyla süzme görevini görecek file, çelik süzgeç veya tel süzgeçleri gibi engelleyiciler ile suların göle ulaştığı noktalara kurulum yaparak devamlı kontrolü sağlanmalı ve temizlenmelidir.
8. Van Gölü Havza Koruma Eylem Planı ve Uygulama Programı kapsamında; sıfır atık, mavi liman temizliği, dip tarama faaliyeti, ulaşım faaliyetleri kaynaklı kirleticiler ve bahsi geçen bu hususlara ulaştıracak faaliyet planına uyulmalı ve kontrol edilmesi gerekmektedir.
9. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Tabiat Varlıklarını Koruma Merkez Komisyonunun doğal sit alanları koruma ve kullanma koşulları ilke kararlarına uyulmalıdır.
10. Özellikle Van Gölü kıyı şeridinde bulunan yerel yönetimler, gölün korunması, tanıtılması ve geliştirilmesi konularında işlevlerini artırmaları (Yılmaz & Günay, 2021: 554) ve havza yönetiminden sorumlu olan 12 kurum ile kuruluş yetkilileri arasında koordinasyon sağlanmalıdır (Koyuncu & Karakılçık, 2018: 20).

Teşekkür: Bu kitap bölümü, Doç. Dr. İbrahim KOÇ danışmanlığında ve Çevre Mühendisi Erkan MARHAN tarafından yazılmış "Van Gölü Kirlilik Durumu, Geleceği ve Meydana Gelebilecek Afetlerden Etkilenme Durumu Üzerine Bir Araştırma" adlı Yüksek Lisans Tezi'nden üretilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Aküzüm, T., Çakmak, B., & Gökalp, Z. (2010). Türkiye'de su kaynakları yönetiminin değerlendirilmesi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, (1), 67-74.
2. Alaeddinoğlu, F. (2014). Van Gölü Havzası'nda Nüfusun Ve Yerleşmelerin Yükselti Basamaklarına Göre Dağılışı. TÜCAUM VIII. Coğrafya Sempozyumu, 263-274.
3. Alaeddinoğlu, F., & Aydın, B. (2018). Van'da Sulak Alanların Mevcut Durumu ve Turizme Konu Olma Yeterlilikleri. TÜCAUM 30. Yıl Uluslararası Coğrafya Sempozyumu International Geography Symposium, 370-381.
4. Alkan, A. (2015). Bitlis şehrinin çevre sorunları ve alınması gereken önlemler. Doğu Coğrafya Dergisi, 20(33), 11-36.
5. Altan-Aydın, F., & Doğu, A. F. (2018). Göllerde seviye değişimleri ve nedenleri: Van Gölü örneği. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (41), 183-208.
6. Aslan, Ş., Gürbüz, B., Çiner, F. (2008). Van ilinde tarım ilacı kullanımı ve Van Gölüne olası etkilerinin değerlendirilmesi. Van Gölü Hidrolojisi ve Kirliliği Konferansı, 21-22 Ağustos 2008, DSİ XVII. Bölge Müdürlüğü, Van.
7. Atici, A. A., Sepil, A., Sen, F., & Karagoz, M. H. (2022). First evaluation of microplastic pollution in the surface waters of the Van Bay from Van Lake, Turkey. Chemistry and Ecology, 38(1), 1-16.
8. Atıcı, A. A., Sepil, A., & Şen , F. (2021). Van Gölü havzası tuzlu sularının su kalitesi özellikleri ve ağır metal kirlilik indeksinin belirlenmesi. Ege Univ. Ziraat Fak. Derg., 58(2): 285-294.
9. Appannagari, R. R. (2017). Environmental pollution causes and consequences: A study. North Asian Int Res J Soc Sci Humanit, 3(8), 151-161.
10. Aydın, M., &Öz, A. (2021). Van Gölü Havzasında hidrometeorolojik verilerin eğilim analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(2), 441-456.
11. Aydın, M. C, Avşar, E., Büyüksaraç, A., Işık, E., & Kuluöztürk, M. F. (2018).Van Gölüne Dökülen Kotum Deresinde Endüstriyel Kaynakların Oluşturduğu Kirliliğin Tespiti, Uluslararası Su ve Çevre Kongresi SUÇEV, 1756-1762.
12. Bilgili, A., Yarsan, E., Sağmanlıgil, H., Çetinkaya, N., & Turel, İ. (1995). Van Gölü suyunun doğal kalitesi ve buradan avlanan İnci Kefali

(Chalcalburnus tarichi, Palla 1811) örneklerinde bazı ağır metal düzeyleri. Ankara Üniv. Vet. Fak. Derg. 42, 445-450.
13. Büyükyıldız, M., & Yılmaz, V. (2011). Türkiye'deki bazı göllerin su seviyesiyndeki değişimlerin incelenmesi. Engineering Sciences, 6(4), 1061-1073.
14. Çakmak, B., Ucar, Y., & Akuzum, T. (2007). Water Resources Management, Problems and Solutions for Turkey. In International Congress on river basin management,867-880.
15. Çevre Kanunu-2872, 09.08.1983, Tertip:5, Cilt:22.
16. Çiftçi, Y., Işık, M. A., Alkevli, T., &Yeşilova, Ç. (2008). Environmental geology of Lake Van Basin. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 32(2), 45-77.
17. Demir-Yetiş, A., & Özgüven, A. (2020). Van Gölü Edremit kıyısı yüzey sularında ağır metal kirliliğinin araştırılması. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 25(2), 831-848.
18. Demir, M., & Şen, F. (2021). Yılında görülen kuraklığın Van ilindeki bazı su kaynakları ve balıkçılığa etkileri. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 94-104.
19. Deniz, O. (2008). Van Gölü Havzası'nda su kirliliği. 300-308. İCANAS 38.(Uluslar arası Asya ve Kuzey Afrika Çalışmaları),, Ankara, Türkiye, cilt.1, ss.299 (tam metin bildiri). https://www.ayk.gov.tr/wp-content/uploads/2015/01/DEN%C4%B0Z-Orhan-VAN-G%C3%96L%C3%9C-HAVZASI%E2%80%99NDA-SU-K%C4%B0RL%C4%B0L%C4%B0%C4%9E%C4%B0.pdf)
20. Dölek, İ. (2016). Türkiye'nin Fiziki Coğrafyası.Türkiye'de doğal afetler. (ss. 1-54).
21. Erginyürek, M. (2018). Van gölü kapalı havzasında yağış-akım analizleri ve göl seviye değişimi. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
22. Ekinci, R., Büyüksaraç, A., Ekinci, Y. L., & Işık, E. (2020). Bitlis ilinin doğal afet çeşitliliğinin değerlendirilmesi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(1), 1-11.
23. Elmastaş, N. (2008). Bitlis ili jeotermal su kaynakları. Doğu Coğrafya Dergisi, 13(19), 89-104.
24. Elp, M., Atıcı, A. A., Şen, F., & Duyar, H. A. (2016). Van Gölü Havzası balıkları ve yayılım bölgeleri. YYÜ Tar Bil Derg, 26(4), 563-568.
25. Ersoy, Ş. (2009). Afetler Çağı. YTÜ Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi. 1-4. https://www.researchgate.net/publication/268740404_Afetler_Cagi

26. Garipağaoğlu, N., & Uzun, M. (2021). Development stages of basin management and different models. International Journal of Geography and Geography Education (IGGE), 43, 338-357.
27. Giyik, C., Oyguç, R. A., & Anıtkar, S. (2022). Van ilinin afetselliği ve afet konutlarında yer seçimi uygulamaları. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8(2), 178-195.
28. Kayakökü, H. (2018). Van Gölü batı ve kuzey kıyısında radyoaktivite, radon ve ağır elementlerin analizi [Yayımlanmamış doktora tezi]. Fırat Üniversitesi.
29. Kayakökü, H., & Doğru, M. (2017). Radioactivity analysis of soil samples taken from the western and northern shores of Lake Van, Turkey. Applied Radiation and Isotopes, 128, 231-236.
30. Koyuncu, B., & Karakılçık, Y. (2018). Van Gölü Havzasının Yönetiminden Sorumlu Olan Paydaşlar. Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 4(2), 20-36.
31. Kılıçel, F., Durak, H., Arılık, A. (2008a). Van katı atık depolama alanındaki toprakların bazı ağır metal içeriklerinin tespiti ve Van Gölü kirliliğine etkilerinin araştırılması. Van Gölü Hidrolojisi ve Kirliliği Konferansı, 21-22 Ağustos 2008, DSİ XVII. Bölge Müdürlüğü, Van.
32. Kılıçel, F., Güler, Y., Talay, P. (2008b). Van şehir merkezinden geçerek van gölü'ne dökülen akarsuların ve bu akarsuların geçtiği yerlerdeki çamurların ağır metal içeriklerinin araştırılması. Van Gölü Hidrolojisi ve Kirliliği Konferansı, 21-22 Ağustos 2008, DSİ XVII. Bölge Müdürlüğü, Van.
33. Marhan, E. (2022). Van gölü kirlilik durumu, geleceği ve meydana gelebilecek afetlerden etkilenme durumu üzerine bir araştırma [Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Bitlis Eren Üniversitesi.
34. Ogun, E., Atalan, E., & Ozdemir, K. (2005). Some pollution parameters in water samples from Lake Van, Turkey. Fresenius Environmental Bulletin, 14(11), 1031-1035.
35. Omeroglu, E. E., Sudagidan, M., & Ogun, E. (2022). Evaluation of arsenic pollution and anaerobic arsenic-metabolizing bacteria of Lake Van, the world's largest soda lake. Environmental Monitoring and Assessment, 1-16. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1664846/v2
36. Özşahin, E. (2013). Türkiye'de Yaşanmış (1970-2012) Doğal Afetler Üzerine Bir Değerlendirme. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 1-8.

37. Özel, S. (2020). Afetlerden sonra kirlilik ve ikincil kirliliği afet olarak değerlendirmek için bir tartışma.İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi, 1(1), 39-48.
38. Özgökçe, M. S., Karaca, İ., Atlıhan, R., Kasap, İ., Özgökçe, F., Yıldız, Ş., Polat, E. (2008). Van Gölü kıyı kirliliğinin gösterge türlerle tayini. Van Gölü Hidrolojisi ve Kirliliği Konferansı, 21-22 Ağustos 2008, DSİ XVII. Bölge Müdürlüğü, Van.
39. Şahin, Ş. (2019). Türkiye'de afet yönetimi ve 2023 hedefleri. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 1(2), 180-196.
40. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2022, Şubat). https://www.tarimorman.gov.tr/Sayfalar/PageNotFoundError.aspx?requestUrl=https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/havza%20koruma%20eylem%20planlar%20%C4%B1/Van_Golu_web.pdf
41. T. C. Bitlis Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Bitlis İli 2020 Yılı Çevre Durum Raporu. (2022, Ocak). https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/b-tl-s_-cd2020-20210930185135.pdf
42. T.C. Tarım ve Orman BakanlığıGıda Ve Kontrol Genel Müdürlüğü. (2022, Eylül). İl Düzeyinde Bitki Koruma Ürünlerinin Kullanım (Zirai Mücadele Uygulamalarında) Miktarları, 2021).https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/DB_Bitki_Koruma_Urunleri/Istatistik/Il_Duzeyinde_BKU_Kullanim_Miktar_2021.pdf
43. T. C. Van Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Van İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu. (2022, Şubat). https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/van-2021-ilcdr-20221019155705.pdf
44. Turunçoğlu, U.U., Dalfes, H.N. (2008). Van. Van gölü'nün üç boyutlu dolaşım modeli. Van Gölü Hidrolojisi ve Kirliliği Konferansı, 21-22 Ağustos 2008, DSİ XVII. Bölge Müdürlüğü.
45. Ünal, S., Çığcı, K., &Koç, İ. (2018). A Research on The Determination of Some Parameters of Van Lake Water in Tatvan-Ahlat Shore Side Sampling. 1st İnternational Engineering and Technology Symposium (1st IEST), 1.
46. Yarsan, E., Bilgili, A., & Türel, İ. (2000). Heavy Metal levels in mussels (Unio stevenianus Krynicki) obtained from Van Lake. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences, 24(1), 93-96.
47. Yücel, S., & Morgil, F. İ. (1998). Yüksek öğretimde çevre olgusunun araştırılması. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 14(14), 84-91.

48. Yılmaz, V., & Günay, M. C. (2021). Van Gölü'nün Korunmasına Yönelik Yapılan Faaliyetlerinin Değerlendirilmesi: Adilcevaz, Ahlat ve Tatvan Belediyeleri Örneği. Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, 4(3), 574-583.https://doi.org/10.33712/mana.1031371
49. Yıldız, N., & Yener, G. (2010). Van Gölü'nde sediment birikim hızı, radyoaktif ve ağır metal kirliliğinin tarihlemesi. Ekoloji, 19(77), 80-87.
50. Yiğit, A., İrak, Z. T., Öztürk, D., Öztürk, E., Alpaslan, D., Şahan, T., & Aktaş, N. (2017). Van Gölü suyunun iyon karakterizasyonuyla su kalitesinin belirlenmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(4), 169-179.
51. Zorer, S.Ö., & Şahan, T. (2011). The concentration of ^{238}U and the levels of gross radioactivity in surface waters of the Van Lake (Turkey). Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 288(2), 417-421.
52. Zorer, S.Ö., Ceylan, H., & Doğru, M. (2009). Gross alpha and beta radioactivity concentration in water, soil and sediment of the Bendimahi River and Van Lake (Turkey). Environmental monitoring and assessment, 148(1), 39-46.

MARMARA DENİZİ İSTANBUL-TEKİRDAĞ HATTINDA, SEDİMENTTEKİ, KENTSEL VE SANAYİ KAYNAKLI AĞIR METAL VE ORGANİK MADDE KİRLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÖNLEMLER

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah YİNANÇ

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
ORCID: 0000-0002-8144-8266

1. Giriş

Marmara Denizi'nde görülen, organik madde ve inorganik madde konsantrasyonlarındaki yükseklik ciddi bir kirlilik problemidir. Marmara Denizi'nin bir iç deniz olması ve çevresinde, kentsel yerleşimlerin fazlalığı, hem evsel, hem de endüstriyel olarak, Marmara denizini kirlenmeye karşı savunmasız halde bırakmaktadır (Kam ve Yümün 2021). Deniz suyunda ağır metal ve organik madde konsantrasyonlarının yüksekliği kirliliğinin en büyük göstergesidir. Ağır metallerin doğal kaynakları arasında rüzgarla savrulan toprak döküntüleri, orman yangınları, volkanik patlamalar, biyojenik süreçler ve deniz tuzu bulunur (Blaser vd., 2000;). Ağır metallerin antropojenik kaynakları ise sanayi tesislerinden çıkan katı, sıvı ve gaz atıklar, madencilik faaliyetleri ve tarımsal faaliyetlerdir (Kam ve Önce 2016; Önce vd., 2021; Dinçer vd., 2019). Tüm ağır metaller belirli bir konsantrasyonun üstünde toksik etki gösterirler (Egemen 2006). Bu sebeple Pb, Zn, Cu, Cr, Cd ve bazı diğer metaller çevresel risk değerlendirmelerinde insan kaynaklı toksik etki gösterme potansiyeline sahip metaller olarak kabul edilir (Valdes vd., 2014). Deniz ortamındaki ağır metal konsantrasyonlarının etkin bir şekilde izlenmesi oldukça önemlidir (Kahlon vd., 2018).

Denizel ortamlarda dip sedimentleri ağır metal depoları olduğu için ağır metal kirliliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Yümün, 2017; Yümün ve Önce 2017; Yümün 2016, Dinçer vd., 2019, Önce vd., 2021). Bunun en önemli nedenleri arasında sedimentteki birikimin anlık değişim göstermemesi ve uzun süreçlere dayanmasıdır. Bu sedimentlerin, elementlerin sucul ortamlarda depolandığı rezervler olması, pek çok canlının yaşam ile beslenme ortamını oluşturması, canlılar ve çevre için oldukça tehlikeli olabilmektedir (Türkmen ve Akbulut 2015, Kam vd., 2021). Denizel sedimentler, potansiyel bir depo olarak görev yapar, kendini çevreleyen sudan ayrılır ve uzun zamanlı birikimden dolayı suya oranla daha fazla metal biriktirme potansiyeline sahiptir. Bu noktada suyun içkin özelliğinin bozulmasıyla ortaya çıkan su kirliliğinin insan ve çevre kaynaklı zararları da olduğu düşünüldüğünde (Cansaran, 2018). Marmara Denizindeki kirlilik sorunsalı gözardı edilmemesi gereken bir durumdur.

Sucul ortamlara karışan kontaminantların %1'i dahi suda kalmamakta, nerdeyse tümü sedimentte çökerek depolanmaktadır (Salomons ve Stigliani, 1995). Zhaovd., 2013). Ağır metallerin yanı sıra, organik kirlilikler de denizel ortamları tehdit eden önemli unsurlardandır. Denizel ortamlarda organik maddeler ince taneli killi veya kimyasal kayaçlar (şeyller, kiltaşları ve kireçtaşları) içerisinde bulunmaktadır. Kil içerisinde biriken organik maddeler bozunmaya uğramadan kalabilirler. Organik maddelerin birikimi, ağır

metallerin birikim süreçleri ile de yakından ilişkilidir (Türkmen vd., 2006). Organik kirlilik özellikle evsel nüfusun fazla olduğu bölgelerde yoğunluk kazanmaktadır. Deterjanlar, pestisitler, proteinler ve fenoller evsel atıksu kompozisyonundaki organik bileşenleri oluşturmaktadır. Evsel atıksuların yüksek karbon, fosfor ve azot içeriği arıtılmadan denizel ortama karıştığında organik kirlilik meydana gelmektedir (Alaş ve Çil 2002). Bu organik, inorganik kirleticiler ve ağır metaller aynı zaman-da hava kirliliğine de neden olmaktadır (Cansaran, 2017). Atomik TOC/N oranı, organik maddeyi denizden ya da karadan ayırır. Karasal organik madde, nitrojene göre karbon bakımından zengindir ve yüksek bir TOC/N oranı gösterir. Karasal bitkiler selüloz bakımından zengindir ve algler azot bakımından zengin bileşikler içerir. Karasal organiklerin TOC/N oranı 12 ile 14 arasındadır. TOC/N oranı 6 ile 8 arasında ise planktonik deniz kökenli organik maddenin doğasını yansıtır. TOC/N = 10 değeri, deniz ve karasal kaynaklar arasındaki karışım bölgelerinin karakteristiğini yansıtır. (Lallier-Verges vd., 1998). Organik madde, özellikle ötrofikasyon için önemli bilgiler verir (Bayram vd., 2011). TOC değeri oldukça değişkendir; deniz suyu veya yer altı sularında 1 mg / L, göl veya nehir sularında 2-10 mg / L, bataklıklarda ise 10 g/L'ye kadar değişik değerler gözlenmektedir (Cwqgs, 1996). Alt yüzey sedimentindeki organik karbon içeriği, litolojiye, mikro biyolojik bozulma oranına, su sütunu üretkenliğine ve ekstarklastların ortama getirim oranına bağlıdır. Önceki yıllarda birçok araştırmacı konu ile ilgili araştırmalar yapmıştır. Yümün (2017) çalışmasında Batı Marmara Denizi denizel sedimentlerinde ağır metal konsantrasyon ve oranlarını incelemiştir. Bu incelemeler sonucunda ağır metal sonuçlarını yorumlamak için Pollution Index (PI) olarak tanımlanan bir korelasyon katsayısı geliştirmiştir.

Bu katsayı (PI) sayesinde Pb, Hg, Cu, Ni gibi elementlerin antropojenik kaynaklar sonucu zenginleştiğini tespit etmiştir. Yümün ve Önce (2017) çalışmalarında Edremit Körfezi denizel sedimentlerinde ağır metal konsantrasyonlarını inceleyerek bölgeyi kirlilik zonlarına ayırmıştır. Çalışmada kirliliğin ekosisteme verdiği zararı belirlemek için biyoindikatör olarak foraminiferleri kullanmışlardır. Yümün vd., (2021) çalışmalarında Gemlik Körfezi denizel sedimanlarındatoksik ve radyoaktif elementlerin varlığını araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre yapay yollarla ortaya çıkan Cs-137 gibi radyoaktif elementlerin varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca tarımsal ve endüstriyel faaliyetler sonucu toksik elementlerde zenginleşme belirlenmiştir. Dinçer vd., (2019) çalışmalarında Edremit Körfezi denizel sedimanlarında TOC, TN, TC ve IC analizleri gerçekleştirmiştir. Körfezin tarımsal olarak yoğun olduğu alanlarda organik kirliliğin oluştuğu belirlenmiştir. Atmaca ve

Erdem (2016) çalışmalarında Tekirdağ merkez ilçesindeki bazı akarsu yataklarındaki toprakların özelliklerini tayin etmişlerdir. Sarı (2008) yaptığı çalışmada Marmara Denizi'nin güney akarsu (Kocasu, Gönen, Biga ve kolları) drenaj havzalarındaki ağır metallerin kaynaklarını ve olası kirliliğin etkilerini yüzeysel sedimentlerin organik karbon ve ağır metal (selektif özümleme dahil) analizleriyle belirlemiştir. Çalışma sonucunda nüfusun yoğunlaştığı bölgelerden alınan numunelerde organik madde değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada da, Batı Marmara (Tekirdağ-İstanbul) denizel sedimanların da ağır metal ve organik madde kirliliği araştırılmıştır. Analizi yapılan toksik metaller; Al, As, Cd, Hg, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni, ve Zn'dir. Organik madde kirliliğini belirlemek için sedimanda TOC, TN, TC ve IC analizleri ve hesaplamaları yapılmıştır. Analizler sonucunda su kalitesi açısından riskli bölgelerde kirlenmenin varlığı görülmüştür.

2. Materyal Metod

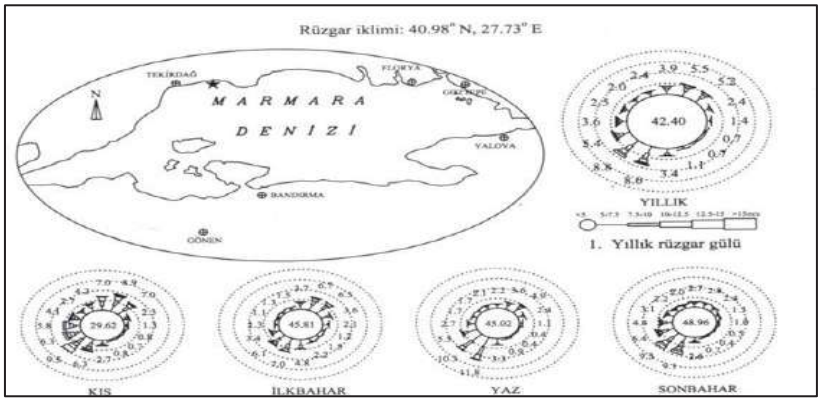
2.1. Numune alma

Çalışma alanından 11 adet sediment numunesi gravite kor yöntemi ile toplanmıştır. Numuneler ortalama olarak kıyıdan 1800 metre uzaklıktan, 35-50 m su derinliğinde toplanmıştır. Numuneler saklama kaplarında havayla teması kesilecek şekilde saklanmıştır ve analizlere kadar 20 C^0'nin altında tutulmuştur (Yümün vd., 2021). Numuneler Marmara Denizi'ne dökülen derelerin deşarj noktalarından, evsel atıksuların döküldüğü yerlerden, turizm alanlarından ve sanayi kuruluşlarının yoğun olduğu bölgelerden alınmıştır. Çalışma alanı konumu ve örnek noktalar Tablo 1'de gösterilmiştir. Türkiye Kıyıları Rüzgar ve Derin Deniz Dalga Atlası çalışma alanı için Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışma alanı numune koordinatları

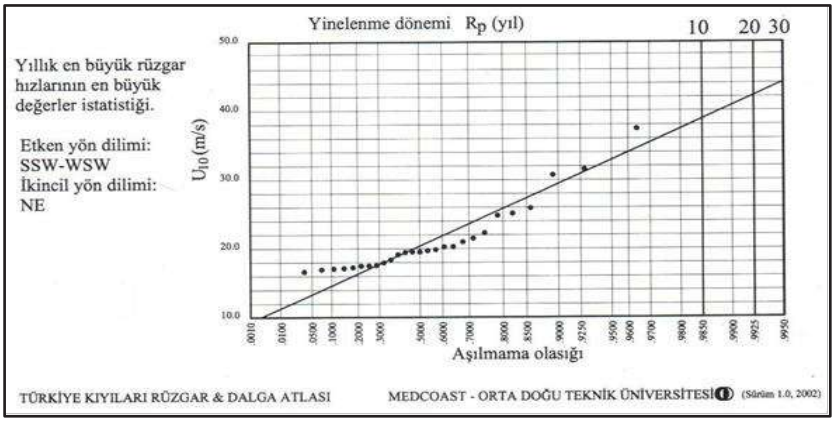
Numune Lokasyonu	X	Y
TK-1	543318.77 d D	4535338.03 m K
TK-2	546021.00 d D	4535981.00 m K
TK-3	549813.00 d D	4536638.00 m K
TK-4	555755.00 d D	4537973.00 m K
TK-5	565984.00 d D	4538188.00 m K
TK-6	578029.00 d D	4533258.00 m K
TK-7	590526.00 d D	4544513.00 m K
TK-8	602825.41 d D	4545761.19 m K
TK-9	608082.38 d D	4544428.65 m K
TK-10	611381.91 d D	4544291.05 m K
TK-11	624144.19 d D	4538755.11 m K

Rüzgar verileri istatistiksel analize tabi tutulmuş ve yapılan karşılaştırmalar neticesinde elde edilen rüzgar hızlarının diğer veri gruplarına göre küçük kaldığı görülmüş, Tekirdağ Meteoroloji İstasyonu'ndaki ve dalga atlasındaki veriler değerlendirmeye alınmıştır.

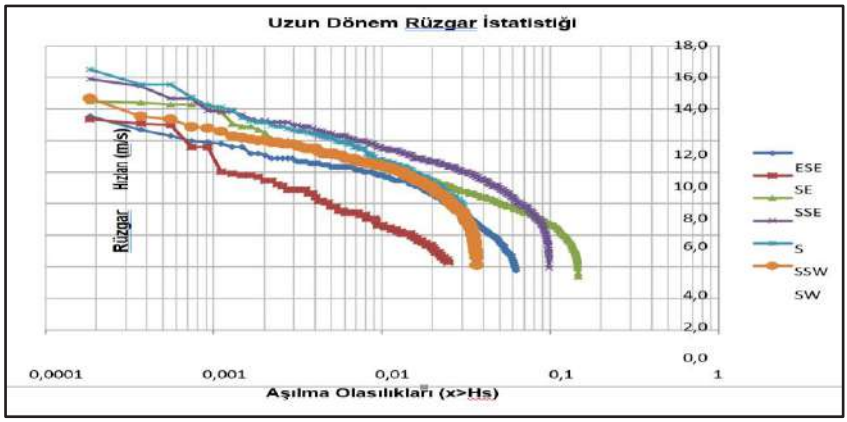


Şekil 1. Tekirdağ Meteoroloji İstasyonu'ndaki ve Dalga Atlasındaki veriler, rüzgar gülleri

Tekirdağ Meteoroloji istasyonu verileri kullanılarak ortalama bir yıl içerisinde belirli aşılma olasılıkları ve görülmesi beklenen uzun dönem rüzgar özellikleri ile rüzgar istatistiği çalışması yapılmış, aşılma olasılıkları her bir yönün (tüm yönler içerisindeki) görülme yüzdeside dikkate alarak kümülatif olasılık olarak hesaplanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Marmara DeniziİstanbulAvrupa yakası-Tekirdağ açıkları dalga atlası ekstremrüzgar hızı dağılımı(Ergene Derin deşarj)



Şekil 3. Tekirdağ meteoroloji istasyonu verileri ile elde edilen uzun dönem rüzgar-hız dağılımı (Ergene Derin deşarj)

Rüzgar verileri kullanılarak yürütülen uzun dönem rüzgar istatistiği çalışmaları neticesinde, 5 m/s hıza sahip S (South)-W (West) bandından gelen rüzgarların görülme olasılığı yılda toplam 65 gün olarak elde edilmiştir. Tekirdağ rüzgar verileri değerlendirilirken istasyonun konumu itibariyle batılı rüzgarlara kapalı olduğu ve bunun da sonuçlara yansıdığı Tablo 3'de özet halinde sunulmuştur.

2.2. Laboratuvar Analizleri

2.2.1. ICP-OES analizi

Element analizi yapılacak sediman numunelerinden yaklaşık 150-200 gram numuneler alınmıştır. Bunlar alüminyum kaplara konularak 4 saat etüvde 50ºC'de kurumaya bırakılmıştır. Kurumuş olan numuneler havan yardımı ile dövülmüş ve 250 mikronluk elekte elenmiş ve iri taneler ayrıştırılmış, analiz yapılmak üzere laboratuvara götürülmüştür. Katı örnekler analiz aşamasından önce çözelti haline getirileceğinden yakma tüplerine konulan numunelere eritme için 12 ml HNO_3 ve 4 ml HCl eklenip, 98 ºC'de 1 saat, 200 ºC'de 1,5 saat yakılmış ve okumalar gerçekleştirilmiştir (Yümün vd., 2019, Yümün ve Kam 2019).

2.2.2. Organik madde analizleri

Toplam Organik Karbon (TOC), su numunesinin organik moleküllerine kovalent bağ ile bağlanmış tüm organik karbon atomları konsantrasyonunun toplamıdır (Doğanay, 2014). Hem doğal hem de suni tüm organik maddelerini içine almaktadır. Pratik olarak Toplam Organik Karbon aşağıdaki yer alan formülle hesaplanmaktadır (Fil vd., 2018).

TOC=TC-TİC (1)

Analizler için alınan sediman numunelerilaboratuvar ortamına getirilerek analiz edilmiştir. Sondaj derinliği boyunca toplanan 11lokasyondaki toplam organik karbonun analizi için TOC-L serisi analizörler kullanılmıştır. Tüm lokasyonlarda C/N oranını belirlemek için toplam azot(TN) ölçümleri yapılmıştır. TOC ölçümünde hem toplam karbon (TC) hem de inorganik karbon (IC) ölçülmüştür. Toplam organik karbon miktarı, toplam karbon içeriğinden inorganik karbon miktarının çıkarılmasıyla elde edilebilir (Dinçer vd., 2019).

Top.Org.Karbon(TOC) = Top.Karbon-Top.İnorg. Karbon

3. BULGULAR VE SONUÇLAR

3.1. Element Analizlerinin Sonuçları ve Bulgular

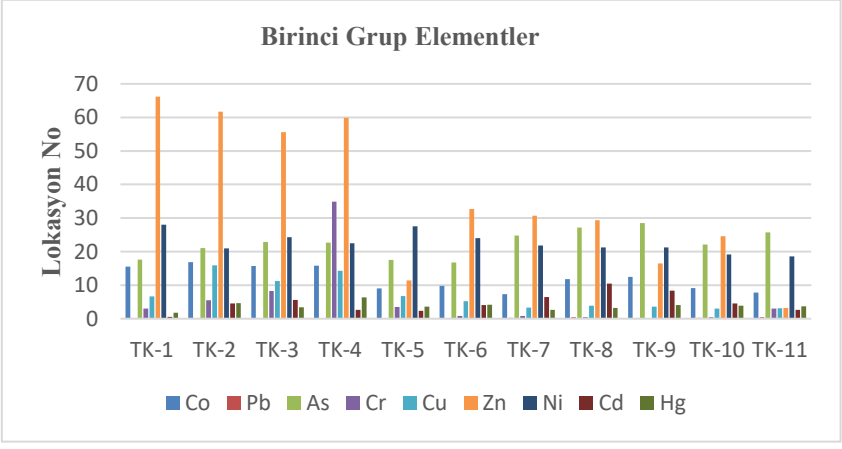
Denizden alınan sediment numunelerdeki kalıcı kirlilik derecesini belirlemek amacıyla laboratuvarda ICP-OES cihazı ile element analizi ve organik madde analizleri yapılmıştır. Toksik element analiz sonuçları tablo 2'de, organik madde analiz sonuçları ise tablo 3'de verilmiştir. Analizlerden elde edilen konsantrasyon değerlerini daha görsel hale getirmek ve korelasyonunu kolaylaştırmak amacıyla grafik olarak da görselleştirilmiştir (Şek. 4 ve 5).

Co, Pb, As, Cr, Cu, Zn, Ni, Cd ve Hg elementlerin konsantrasyon değerleri 1000 ppm den daha küçük olduğu için bu elementler birinci gurup elementler olarak değerlendirilmiş ve şekil 4'deki grafikte sunulmuştur. Fe, Al ve Mn konsantrasyon değerleri 1000 ppm'den daha büyük olduğu için bu elementlerin diğer elementlerden farklı değerlendirilmesine karar verilmiştir.

Şekil 5'de As'ni genelde tüm lokasyonda yüksek olduğu görülmektedir. Bu lokasyonların ya yerleşim sahalarına komşu olduğu, yada denize kirletilmiş akarsuların deşarj olduğu görülmektedir. Ayrıca, diğer elementlerinde bu lokasyonlarda çok yüksek olduğu dikkat çekicidir. Bu analizlerde deniz sedimentlerindeki kirliliklerin ana nedeninin karadan denize deşarj edilen akarsular ve dereler kaynaklı olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Çalışma alanına ait sediman,toksik element analiz sonuçları (mg/L)

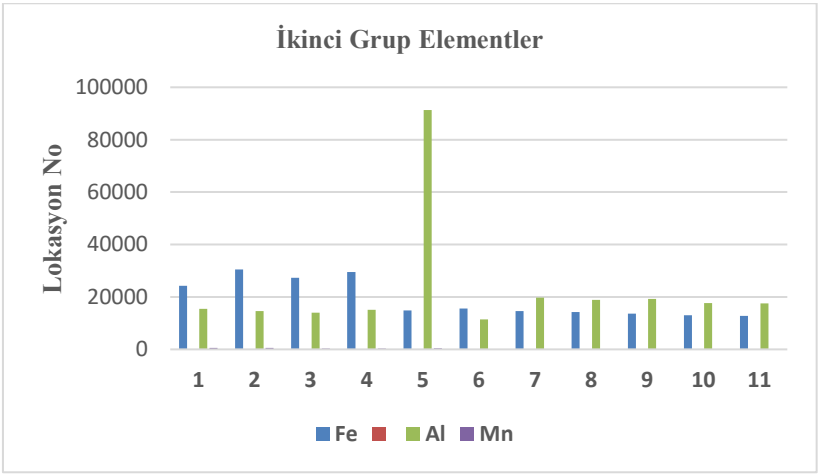
Birinci Grup Elementler										İkinci Grup Elementler		
Lok. No	**Co**	**Pb**	**As**	**Cr**	**Cu**	**Zn**	**Ni**	**Cd**	**Hg**	**Fe**	**Al**	**Mn**
TK-1	15,50	0,00	17,58	3,00	6,60	66,20	28,00	0,50	1,80	24287,5	15409,8	590,2
TK-2	16,87	0,10	21,06	5,50	15,90	61,70	21,00	4,52	4,60	30528,5	14632,1	561,5
TK-3	15,74	0,00	22,86	8,30	11,20	55,60	24,30	5,60	3,40	27361,4	13992	330,7
TK-4	15,83	0,00	22,65	34,90	14,30	59,90	22,50	2,60	6,40	29538	15088,1	361,1
TK-5	9,04	0,12	17,52	3,50	6,70	11,40	27,50	2,32	3,60	14881	91316,4	386
TK-6	9,78	0,00	16,74	0,80	5,17	32,70	24,04	4,06	4,20	15615,8	11396,8	81,5
TK-7	7,34	0,23	24,76	0,80	3,32	30,70	21,83	6,45	2,60	14611,9	19735,8	46,4
TK-8	11,79	0,45	27,15	0,40	3,89	29,40	21,21	10,50	3,20	14216,6	18894,2	47,7
TK-9	12,46	0,00	28,47	0,10	3,56	16,50	21,29	8,40	4,10	13652,3	19256,1	55,6
TK-10	9,12	0,24	22,14	0,40	3,06	24,60	19,18	4,52	3,90	13003,6	17631,4	57,9
TK-11	7,83	0,45	25,77	3,00	3,09	3,20	18,54	2,60	3,70	12825	17482,8	52,2



Şekil 4. Birinci Grup Elementler

3.2 Organik Madde Analizlerinin Sonuçları ve Bulgular

Denizel ortamda özellikle kara kökenli organik madde kirliliklerinin incelenmesi amacıyla denizel sediment analizleri yapılmıştır (Tablo 3). Element analizlerinde görülen denize deşarj olan akarsuların kirletme etkisinin, organik madde analizlerinde de görülebilirliği de değerlendirilmiştir.

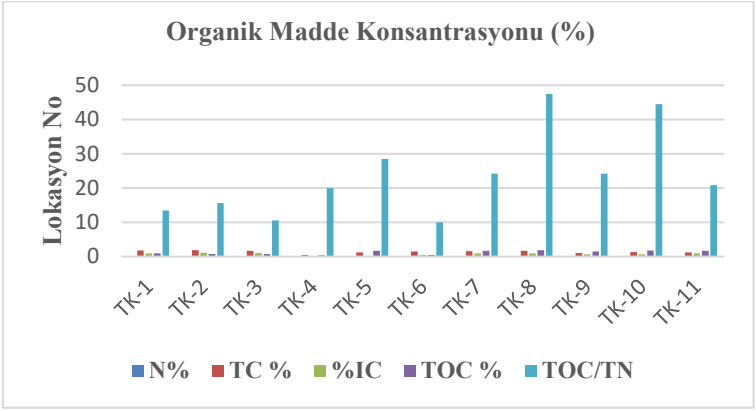


Şekil 5. İkinci Grup Elementler

Bazı lokasyonsediment örneklerinden elde edilen organik karbon (%TOC) yüzdesi % 1'den büyüktür. Bu değerler özellikle akarsuların denize deşarj noktalarında organik karbon (%TOC) olarak oldukça yüksektir. Burada, TOC değerinin yüksek olması kirliliğin kıta içi bitkisel kökenli olduğunu göstermektedir. Lokasyonlarda Azot değerlerinin düşük olması (%N: 0,04-0,09)kirliliğin alglerin ürettiği organik madde kaynaklı olduğunu göstermektedir. Sedimentteki yüksek karbon konsantrasyonları, karbonlu maddelerin biyolojik bozulmanın yavaş olduğunu göstermiştir. Çoğu lokasyonda TOC/TN oranı 4'ten büyük olarak bulunmuştur. Bu bölgede kıta içi kirliliğin etkin olduğuna bir işarettir. Toplam azot değerinin düşük oluşu ise deniz tabanında biyolojik aktivitenin yüksek oluşunu göstermektedir.

Tablo 3. Çalışma alanına ait sediman organik madde analiz sonuçları

Lokasyon No	%N	%TC	%IC	%TOC	TOC/TN
TK 1	0,07	1,82	0,9	0,94	13,428
TK 2	0,05	1,86	1,11	0,78	15,6
TK 3	0,07	1,72	1,01	0,74	10,58
TK 4	0,02	0,49	0,01	0,4	20,0
TK 5	0,06	1,20	0,11	1,71	28,5
TK 6	0,05	1,46	0,46	0,5	10,0
TK 7	0,07	1,56	0,89	1,7	24,2
TK 8	0,04	1,65	0,89	1,9	47,5
TK 9	0,06	1,02	0,67	1,45	24,17
TK 10	0,04	1,34	0,66	1,78	44,5
TK 11	0,08	1,24	0,98	1,67	20,88



Şekil 6. Organik Madde Konsantrasyonu (%)

3.3. Ağır Metal Kirliliğinin Denizel Ortamlarda Değerlendirilme Yöntemleri

3.3.1. Zenginleşme faktörü

Zenginleşme faktörü, akarsu, göl, deniz ve topraklarda sucul ekosistem çökellerinde antropojenik kaynaklı ağır metal kirlilik oranının tespit edilebilmesi amacıyla kullanılan indekslerden biri olmaktadır. Bu oran, kullanılan çeşitli normalizasyon elementleri (Fe, Al, Livb,) ve öncel çalışmalarda verilen background (geçmiş) değerlerden yararlanarak bulunmaktadır (Abrahim ve Parker 2008). Referans elementin seçimiyle alakalı belirleyici bir kural bulunmamaktadır. Referans elementin numunedeki konsantrasyonunun hemen hemen tamamı kabuk (litojenik) kaynaklı olarak kabul edilmektedir, Elementlerin konsantrasyonları yerine zenginleşme faktörü değerlerinin kullanılmasının nedeni referans elementin değeriyle tane boyu, karbonat seyreltme ve mineral içeriğinde olan büyük farklılıkların etkisini ortadan kaldırarak normalizasyonunu sağlamaktır (Park ve Presley 1997). Fakat Schiff ve Weissberg'in (1999)'e göre, referans element olarak demir seçildiği zaman anoksik çökellerde yeniden taşınma ve çökelme süreçleri kirletici/Fe oranlarında değişime sebep olabilmektedir (Albut 2014).

Mevcut çalışmada normalleştirme elementi olarak zenginleşme faktörü hesaplanırken Fe kullanılmıştır. Benzer birçok çalışmada da demir elementi kullanılmıştır (Abrahim ve Parker 2008; Shafie vd., 2013). Demir elementine göre normalizasyon yapılması, Gemlik Körfezi, Arnavutluk ve İskenderun Körfezi gibi bulunduğu alanda mafik ve ultramafik girdisi fazla olan bölgelerde daha iyi sonuç vermektedir. Denizel sedimanların metal içeriklerinin değerlendirilmesinde ortalama şeyl metal konsantrasyonları esas alınmaktadır (Aksu vd., 1997; Abrahim ve Parker 2008). Bu nedenle, sediman analiz

sonuçlarının değerlendirilmesinde, her bir metal için elde edilen veriler, şeyl ortalama değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ağır metal analiz sonuçları kullanılarak metallerin (Zn, As, Co, Cu, Ni, Pb ve Mn) zenginleşme faktörü (EF) hesaplanmıştır. Zenginleşme Faktörü aşağıdaki bağıntı (2) kullanılarak hesaplanmaktadır;

EF= (Cn/Cref)/(Bn/Bref) (2)

Formüldeki; EF: Zenginleşme faktörü, Cn: Çalışmada ölçülen metal değeri, Cref: Çalışmada ölçülen referans elementin değeri, Bn: Ölçülen elementin kabuk (background) değeri, Bref: Referans elementin kabuk (background) değerini temsil etmektedir. Tablo 4'te bazıjeolojikreferanskayaçlarınağır metal içerikleriverilmektedir.

Hesaplanan EF değeri sonucunun 1'e yakın (EF<1) olması kabuk kökenine, 1-3 arası az zenginleşme, 3-5 arasında olması tartışmalı olarak kabuk kökenine (çok zenginleşme), EF>5'ten büyük değerlerinde ise kabuk kökenli olmadığı (aşırı zenginleşme) yönünde bir kabul görmektedir (Galuszkavd,, 2014;Halstead vd,, 2000). Bu faktörün hesabında ve değerlendirilmesinde, diğer kirlilik indekslerine göre farklı nokta, referans element seçilerek normalleştirme yapılmasıdır. Bu çalışmada, demir elementi karot içerisinde büyük varyasyonlar göstermemesi sebebiyle referans element şeklinde değerlendirilmiştir. Zenginleşme faktörü analizinde en dikkat çekici sonuç tüm lokasyonlarda Arsenik Zenginleşme Faktörünün (EF_{As}) çok yüksek olmasıdır. Bu sonucun bölgede yapılan yoğun tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4. Bazıjeolojikreferanskayaçlarınağır metal içerikleri [159, 160].

	Fe %	**Mn ppm**	**Co ppm**	**Ni ppm**	**Cu ppm**	**Zn ppm**	**Pb ppm**	**As ppm**
Yerkabuğu [154]	5	950	25	75	55	70	13	1,8
Şeyl [155, 156]	4,7	850	19	70	45	95	20	13
Kumtaşı [155]	0,9	50	<1	2	5	16	7	1
Kireçtaşı [155, 157]	0,4	1100	<1	20	4	20	9	1
Ultrabazikler [158]	5,7	700-2600	75-101	1700-2900	46-62			
Bazalt[156, 157]	8,6	1500	48					

Tablo 5. Çalışma alanından alınan sediment numunelerin Zenginleşme Faktörleri

EF	KOR (1)	KOR (2)	KOR (3	KOR (4)	KOR (5)	KOR (6)	KOR (7)	KOR (8)	KOR (9)	KOR (10)	KOR (11)
EF_{Zn}	1,94	1,44	1,45	1,44	0,55	1,50	1,50	1,48	0,86	1,35	0,17
EF_{Mn}	1,28	0,97	0,63	0,64	1,37	0,27	0,17	0,18	0,21	0,23	0,21
EF_{As}	20,1	19,2	23,2	21,2	32,7	29,78	47,06	53,06	57,93	47,29	55,7
EF_{Co}	1,27	1,1	1,15	1,08	1,21	1,25	1,0	1,66	1,83	1,40	1,22
EF_{Cu}	0,25	0,47	0,37	0,44	0,41	0,30	0,21	0,25	0,24	0,21	0,22
EF_{Ni}	0,77	0,46	0,59	0,5	1,23	1,03	1,0	0,99	1,04	0,98	0,96

3.3.2. Kontaminasyon Faktörü (Cfi) (Hakanson, 1980)

Kontaminasyon faktörü,mevcut durum hakkında önemli veriler sağlayan ve sedimentte bulunan ağır metallerin araştırıldığı çalışmalarda en sık kullanılan yöntemdir. Hesaplama sonuçlarının yorumlanmasında kullanılan kirlilik faktörü sınıflaması tablo 6'da verilmiştir. Background değeri olarak kullanılan bazı elementlerin ortalama değerleri tablo 7'de verilmiştir.

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (3)$$

C i : sedimentte ölçülen metal değeri

Cn^i : metale ait endüstri öncesi referans değeridir,

Tablo 6. Kirlilik Faktörü Sınıflaması (Hakanson, 1980)

Toksik Elementler	Zn	As	Fe	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Mn
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Yer Kabuğu [154]	70	1,8	5000	-	25	-	55	75	13	950
*Şeyl [155, 156]	95	13	47000	0,3	19	90	45	70	20	850
Kumtaşı [155]	16	1	900	-	<1	-	5	2	7	50
Kireçtaşı [155, 157]	20	1	400	-	<1	-	4	20	9	1100
Ultrabazikler [158]	-	-	5700	-	75-101	-	46-62	1700-2900	-	700-2600
Bazalt [156, 157]	-	-	8600	-	48	-	-	-	-	1500

Tablo 7. Bekground değeri olarak kullanılan bazı elementlerin dünya ortalama değerleri

C_f	**Sediman Kalitesi**
C_f <1	Az Kirlenme
1 < C_f < 3	Orta Kirlenme
3 < C_f < 6	Önemli ölçüde kirlenme
C_f >6	Çok yüksek kirlenme

İnceleme alanından alınan sediment numunelerinin element sonuçlarının kontaminasyonfaktörü ($\boldsymbol{Cfi}$) hesaplanmıştır (tablo 8).

Tablo 8. İnceleme alanından alınan sedimentlerin element analiz sonuçlarının kontaminasyonfaktörü ($\boldsymbol{Cfi}$)

Numune Lokasyon	**C_f Mn**	**C_f Fe**	**C_f Ni**	**C_f Cu**	**C_f Zn**	**C_f Co**	**C_f As**
TK 1	0,62	0,49	0,37	0,12	0,94	0,62	9,8
TK 2	0,59	0,60	0,28	0,29	0,88	0,67	11,7
TK 3	0,35	0,55	0,32	0,2	0,79	0,63	12,7
TK 4	0,38	0,59	0,3	0,26	0,86	0,63	12,6
TK 5	0,4	0,29	0,37	0,12	0,16	0,36	9,7
TK 6	0,09	0,3	0,32	0,09	0,47	0,39	9,3
TK 7	0,05	0,29	0,29	0,06	0,44	0,29	13,75
TK 8	0,05	0,28	0,28	0,07	0,42	0,47	15,1
TK 9	0,06	0,27	0,28	0,06	0,24	0,5	15,8
TK 10	0,06	0,26	0,26	0,06	0,35	0,36	12,3
TK 11	0,055	0,26	0,25	0,06	0,05	0,31	0,05

Tablo 8'de Arsenik Kontaminasyon Faktörünün (**C_f As: 7,2-14,7**) bu lokasyonlarında çok yüksek olduğu ve kirlenmeyi açıkça gösterdiği anlaşılmaktadır. Tüm lokasyonlarda diğer elementler için Kontaminasyon Faktörünün az kirlenmeyi (C_f <1) gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum Zenginleşme Faktöründe de görülmektedir.

3.3.3. Kirlilik İndeksi (PI (Yümün, 2017))

Deniz sedimanlarının kirlilik durumlarını belirlemede ve yorumlanabilmesini sağlayabilmek amacıyla Yümün (2017) tarafından bir bağıntı geliştirilmiştir. Kirlilik İndeksi (PollutionIndeks (PI) değeri, bağıntıda ağır metal ölçüm değerlerinin ortalama değere oranlarının toplamlarının ölçüm sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Kirlilik İndeksi şu bağıntı ile hesaplanmıştır (Tablo 9).

$$\mathbf{PI = [(MV_1/MV_{ort})+(MV_2/MV_{ort})+ \ldots+(MV_n/MV_{ort})]/n} \quad (4)$$

Bağıntıda kullanılan parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmekte ve elde edilen parametrelerin değerlendirilmesi için Tablo 10'da verilen aralıklar önerilmiştir.

PI: Kirlilik İndeksi

MV_1: Ağır Metal Ölçüm Değeri (ppm)

MV_{ort}: Ağır Metal Ölçüm Değeri Ortalaması (ppm)

n: Ölçümü yapılan ağır metal sayısı

Bu bağıntı diğer kirlilik analizlerine göre yerel verileri "background değer" olarak kullanması bakımından daha gerçekçi bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu maksatla önceden yapılmış tüm çalışmalarda elde edilen jeokimyasal analiz sonuçları derlenerek ortalama değerleri alınmıştır**.**

Tablo 9. Çalışma alanından elde edilen numunelere ait Kirlilik indeksi hesaplamaları

Lokasyon No	Al	As	Co	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Mn	Hg	Fe	z (PI)
TK 1	15409	18	16	0,0	0,50	3,0	6,6	66	28	590	1,8	24287	0,82
TK 2	14632	21	17	0,1	4,52	5,5	16	62	21	561	4,6	30528	1,00
TK 3	17375	26	20	0,0	9,13	18	20	72	31	685	5,2	35554	1,33
TK 4	15088	23	16	0,0	2,60	35	14	60	22	361	6,4	29538	1,07
TK 5	91316	17	9	0,12	2,32	3,5	6,7	11	27	386	3,6	14881	0,91
TK 6	11396	17	9,8	0,0	4,06	0,8	5,2	33	24	81	4,2	15615	0,49
TK 7	19735	25	7,3	0,23	6,45	0,8	3,3	31	22	46	2,6	14611	0,56
TK 8	18894	27	12	0,45	10,50	0,4	3,9	29	21	47	3,2	14216	0,68
TK 9	19256	29	12	0,0	8,40	0,1	3,6	16	21	55	4,1	13652	0,55
TK 10	17631	22	9,1	0,24	4,52	0,4	3,1	24	19	57	3,9	13003	0,50
TK 11	17482	26	7,8	0,45	2,60	3,0	3,1	3,2	18	52	3,7	12825	0,49
Ort. Değer	17067	23	34	6,9	38	126	15	81	107	404	1191	29833	3,84
Asıl Değer	21445	22	17	0,45	6,8	12,6	7,5	42	28	227	60	23775	0,92

Şekil 7. Silivri-Tekirdağ Marmara Ereğlisi hattı kirlilik görüntüsü

Bu çalışma için hesaplanan ortalama değerler Marmara Denizi'ni kapsayan tüm kirlilik analizi çalışmalarda "background değer" olarak kullanılabilecektir, Kirlilik analizlerinde Tablo 10'da verilen sınıf aralıkları kullanılmıştır.

Tablo 10. Önerilen Kirlilik İndeksi Aralıkları (Yümün 2017)

Parametre Aralığı	**Değerlendirme**
PI>1	Kirli Ortam
PI<1	Temiz Ortam
PI=1	Kritik Ortam

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Tekirdağ ve İstanbul nüfus yoğunluğu, tarım, sanayileşme ve deniz taşımacılığı bakımından Türkiye'nin önemli bir bölgesidir. Bölgede gerek evsel atıklar gerekse tarım ve sanayi atıklarının kontrolsüz deşarjları karasal alanda akarsuların kirlenmesine neden olabilmektedir. Marmara Denizi'de doğrudan ve/veya dolaylı olarak (Kirletilmiş akarsuların deşarjı nedeniyle) bu kirliliklerden etkilenmektedir. Kirlenmeler; 1. Deniz suyunun kirlenmesi, 2. Taban sedimentlerinin kirlenmesi, olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Deniz suyu dalga ve su akıntılar nedeniyle yenilenebileceğinden geçici kirlilik olarak değerlendirilmiştir. Dip sedimentlerinde oluşan kirlilikler ise kalıcıdır ve temizlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle denizler zaman zaman suyun berrak bile olsa bu denizin temiz olduğu anlamına gelmemelidir.

Bu nedenle, Marmara Denizi'nin Tekirdağ ile İstanbul arasında kalan bölümünde sedimentlerin kirlilik analizlerinin yapılmasına karar verilmiştir.

Çalışmada ise, inceleme alanındaki güncel denizel sedimentlerin ağır metal ve organik madde kirliliklerinin kökeni ve alınması gereken önlemler

araştırılmıştır. İnceleme alanında Arsenik'in (As) ve Çinko (Zn)'nuntabloda görülen lokasyonlarda çok yüksek olduğu saptanmıştır. Bu lokasyonlardadiğer elementlerin de normalden daha yüksek olduğu dikkat çekicidir. Zn ve As'ni denizel ortamda fazla olması bölgedeki tarımsal ilaçlama ve gübre kullanımının ve sanayi faaliyetlerinin bir sonucu olduğu anlaşılmaktadır. Kobalt (Co) değerlerinin çok yüksek olduğu lokasyonda bir akarsuyun denize döküldüğü görülmektedir. Özellikle akarsuların denize deşarj noktalarında organik karbon yüzdesi (%TOC) yüksektir. TOC değerinin yüksek olması kirliliğin kıta içi bitkisel kökenli olduğunu göstermektedir. Fakat bu lokasyonlarda Azot konsantrasyonları düşüktür (% N: 0,04-0,09). Azot (N) değerlerinin 20 g/kg'ın altında olduğu bölgelerde ötrofikasyonun az olabileceğini göstermektedir. Sedimentteki yüksek karbon konsantrasyonları ise karbonlu maddelerin biyolojik bozunmanın yavaş olduğunu göstermiştir.

Burada saptanan kirliliklerinin önüne geçilebilmesi için tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübre ve ilaçların kontrol altına alınması önerilmektedir. Sanayi atıklarının ileri arıtma tesislerinde arıtıldıktan sonra denizlere deşarj edilmeli ve deniz taşımacılığında gemilerin atıklarının denize deşarj edilmesinin önüne geçilmelidir. Bu önlemler Marmara Denizi'nin korunması ve sürdürülebilir bir çevre politikası açısından hayati önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

1. Abrahim, G. M. S.,&Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichmentfactorsandthedegree of contamination in marinesedimentsfromTamakiEstuary, Auckland, New Zealand. *Environmentalmonitoringandassessment*, 136(1), 227-238.
2. Aksu, A. E. (1998). Assessment of marinepollution in Izmir Bay: Heavy metal andorganiccompoundconcentrations in surficialsediments. *TurkishJournal of EngineeringandEnvironmentalSciences*, *22*(5), 387-416.
3. Albut, G. (2014). Gemlik Körfezi çökellerinde ağır metal ve organik kirliliğin zaman içindeki evrimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Atmaca, B. (2016). Properties of Soils in SomeStreambeds in Tekirdag Central. *Journal of SoilWater*, 5(1) 1-7,
5. Bayram, A., Önsoy, H., Akinci, G., & Bulut, V. N. (2011). Variation of total organiccarboncontentalongthestreamHarsit, Eastern Black SeaBasin, Turkey. Environmentalmonitoringandassessment, 182(1), 85-95.
6. Blaser, P.,Zimmermann, S., Luster, J., &Shotyk, W. (2000). Critical examination of trace element enrichmentsanddepletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, andZn in Swissforestsoils. *Science of the Total Environment*, *249*(1-3), 257-280.
7. Cansaran, D. (2017). Bir Çevre Sorunsalı Olarak Hava Kirliliği: Kırıkkale İli Örneği. Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7, 79-94.
8. Cansaran, D. (2018). Su Kirliliği Sorunsalının Nedenleri ve Tehditlerine Yönelik Değerlendirmeler, Sosyal Bilimler, Yönetim ve Çevre Bilimsel Araştırmalar Kitabı (Ed. Çavuş,M. F. ve Demirkelle, İ.) ,ankara: Akademisyen Kitabevi, İSNB: 97860525806.
9. Cwqgs, "CanadianWaterQualityGuidelines, Parameter-Specific Background İnformation", Ottawa:CanadianCouncil Of Research ve Environment Ministers, 1996.
10. Çil, O. H. Ş. (2002). Aksaray iline içme suyu sağlayan bazı kaynaklarda su kalite paremetrelerinin incelenmesi. Ekoloji, 11, 40-44.
11. Dinçer, A. R., Yumun, S., Önce, M., &Yümün, Z. Ü. (2019). Investigation of InlandPollution Using Total Carbon (Tc), Total OrganicCarbon (Toc), InorganicCarbon (Ic), Total Nitrogen (Tn) andToc/TnRatios. *AppliedEcologyandEnvironmentalResearch*, *17*(6), 14751-14765.
12. Doğanay, E. (2014). AB Su Çerçeve Direktifine göre ülkemiz sularının fizikokimyasal ve kimyasal parametreler açısından izlenebilmesi için kullanılabilecek analiz metotlarının değerlendirilmesi. Uzmanlık Tezi, T,C Orman Ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara.
13. Egemen, Ö (2006) Su Kalitesi, Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir,

14. Fil, B, A., Z, Gündüz, A, Güngör, M, Korkmaz, S, Uzuner, S, Sertkaya, Y, Süzen, E, Çalgan, "Çevre Mühendisliği Laboratuvarı Deney Föyü-2 ", Balıkesir Üniversitesi, 2018,
15. Hakanson, L. (1980). An ecological risk indexforaquaticpollutioncontrol. A sedimentologicalapproach. *Waterresearch*, *14*(8), 975-1001.
16. Irizuki, T.,Ito, H., Sako, M., Yoshioka, K., Kawano, S., Nomura, R., &Tanaka, Y. (2015). Anthropogenicimpacts on meiobenthicOstracoda (Crustacea) in themoderatelypollutedKasado Bay, SetoInlandSea, Japan, overthepast 70 years. *Marine PollutionBulletin*, *91*(1), 149-159.
17. Kahlon, S. K.,Sharma, G., Julka, J. M., Kumar, A., Sharma, S., &Stadler, F. J. (2018). Impact of heavymetalsandnanoparticles on aquaticbiota. *Environmentalchemistryletters*, *16*(3), 919-946.
18. Kam, E, Önce, M. (2016). PollutionPotential of HeavyMetals in TheCurrentSeaSedimentsBetweenBandirma (Balikesir) ve Lapseki (Çanakkale) in the Marmara Sea, Journal of EngineeringTechnology ve AppliedSciences 1(3), 141-148.
19. Kam, E,,Yümün, Z, Ü,Açıkgöz, G,, Önce, M., (2021). Investigation of SedimentRecords of Kulakçayiri Lake (Istanbul), Journal of EngineeringTechnology ve AppliedSciences, 6(3):135-142.
20. Kam, E.,&Yümün, Z. Ü. (2021). Geographical Distribution of ToxicElements in Northeast Marmara SeaSedimentsand Analysis of Toxic Element PollutionByVariousPollution Index Methods (Istanbul/Turkey). *AppliedEcologyandEnvironmentalRearch*, 19 (3), 1869-1893.
21. Lallier-Verges, E,,Perrussel, B, P,, Disnar, J, R,, Baltzer, F. (1998). RelationshipsBetweenEnvironmentalConditions ve TheDiageneticEvolution of OrganicMatterDerivedfromHigherPlants İn A Modern MangroveSwampSystem (Guadeloupe, French West Indies), – OrganicGeochemistry 29(5-7): 1663-1686.
22. Muhammad, S,,Shah, M,T, Khan, S. (2011). Health risk assessment of heavymetals ve theirsourceapportionment in drinkingwater of Kohistanregion, northern Pakistan, Microchem, J, 98(2): 334–343.
23. Önce M, Balnan İ, Kam N. (2021). Determination of Heavy Metal Distribution of Yenikapı (Istanbul) SeaSediments Using LibsMethod Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 60-64.
24. Park, J.,& Presley, B. J. (1997). Trace metal contamination of sedimentsandorganismsfromtheSwan Lake area of Galveston Bay. *EnvironmentalPollution*, *98*(2), 209-221.
25. Salomons, W,, ve Stigliani, W,M. (1995). Biodynamics of pollutants in soils ve sediments: risk assessment of delayed ve non-linearresponses, SpringerVerlag, Berlin,

26. Sarı, E. (2008). Source anddistribution of heavymetals in riversedimentsfromthesoutherndrainagebasin of thesea of Marmara, Turkey. *FreseniusEnvironmentalBulletin*, *17*(12), 2007-2019.
27. Schiff, K. C.,&Weisberg, S. B. (1999). Iron as a reference element fordeterminingtrace metal enrichment in Southern California coastalshelfsediments. *Marine environmentalresearch*, *48*(2), 161-176.
28. Shafie, N. A.,Aris, A. Z., Zakaria, M. P., Haris, H., Lim, W. Y., & Isa, N. M. (2013). Application of geoaccumulationindexandenrichmentfactors on theassessment of heavy metal pollution in thesediments. *Journal of EnvironmentalScienceandHealth, Part A*, *48*(2), 182-190.
29. Türkmen, A., Türkmen, M., Tepe, Y., Mazlum, Y., &Oymael, S. (2006). Heavy metal levels in bluecrab (Callinectessapidus) andmullet (Mugilcephalus) in Ýskenderun Bay (North EasternMediterranean, Turkey). *BulletinEnviron. Contam. Toxicol*, *77*, 186-193.
30. Valdés, J.,Guiñez, M., Castillo, A., &Vega, S. E. (2014). Cu, Pb, andZncontent in sedimentsandbenthicorganismsfrom San Jorge Bay (northernChile): Accumulationandbiotransference in subtidalcoastalsystems. *CienciasMarinas*, *40*(1), 45-58.
31. Yümün Z,Ü,, Kam E,, Dinçer A,R,, Önce M, Yümün S. (2021). Theinvestigation of toxic element pollution ve radioactivityanalyses of marinesediments in theGulf of Gemlik, AppliedEcology ve EnvıronmentalResearch 19(2): 881-900,
32. Yümün Z,Ü. (2016), Theeffects of heavy metal concentrations in the Çanakkale strait (Turkey): morphologicaldifferences in theHoloceneforaminiferalassemblages, Journal of EngineeringTechnology ve AppliedSciences, 1,2, 77-88,
33. Yümün, Z, Ü,, Kam, E,, Önce, M, (2019). Analysis of Toxic Element withIcp-Oes ve LibsMethods in Marine SedimentsAroundtheSea of Marmara in KapidağPeninsula, Journal of EngineeringTechnology ve AppliedSciences 4 (1), 43-50,
34. Yümün, Z, Ü,, Önce, M. (2017). MonitoringHeavy Metal Pollution in ForaminiferafromTheGulf of Edremit (NortheasterAegeanSea) Between İzmir, Balikesir ve Canakkale (Turkey), Journal of African Earth Sciences 130, 110-124,
35. Yümün, Z, Ü. (2017). TheEffect of Heavy Metal Pollution on Foraminifera in the Western Marmara Sea (Turkey), – Journal of African Earth Science 129, 346-365,
36. Yümün, Z. Ü.,& Kam, E. (2019). Ecologicalanalysis of heavy metal andradioactivitypotential of Holocenesediments in Iznik Lake. *Nukleonika*. 64(3):103−109,

PARSEL VE ADA BAZLI YAPILAŞMANIN KARŞILAŞTIRMASI VE ŞEHİRLEŞMEYE ETKİLERİ; OSMANİYE ÖRNEĞİ

Fazıl NACAR

1. Giriş

Konut geçmişten günümüze iletişim, etkileşim, zaman ve yer kavramlarının organize bir şeklidir. Konutların mimari özellikleri nihayetinde inşa edildikleri tarih ve kültür hakkında detaylı bilgi vermektedir (Ören, K. ve Yüksel, H.,2013). Güvelik ve barınma gereksinimleri dikkate alarak ortaya çıkarılan konutlar ve her dönemde değişik formlarda var olmaya devam etmiştir (Ören, K. ve Yüksel, H.,2013; . Şahin, Y,2011)

Konut yapımında çevre, planlama, inşa ve değer ele alınması gereken önemli unsurlardır. Konutların planlı bir şekilde üretilmesi ülke genelinde siyasi, ekonomik kriterler değerlendirilerek nüfusun belli kentlerde yoğunlaşmasını önlemede bölgeler arasında dengeli dağılımının sağlanmasında önemlidir. Kullanıcının mutluluğu refahı ve rahatı iyi konutla doğru orantılıdır. (Kellekçi, Ö. L. ve Berköz, L.,2006)

Güneşlenme ve ısınma amaçlı pasif enerji kazanımı elde etmenin yanı sıra, doğal ışık ve sağlıklı yaşam ortamlarına erişimin sağlanması da konutlar için gereklidir. (Knowles, 2003). Kentsel çevrede, özellikle sınırlı bir alanda, binaların güneş enerjisinden yararlanması isteniyorsa, bunların göreli konumları, yükseklikleri (F. Canan, İ. Bakır) ve biçimsel özellikleri güneşlenmenin kurallarına göre belirlenmesi gerekmektedir. ve biçimsel özellikleri güneşlenme kurallarına göre belirlenmelidir.

Konut sunum biçimlerinin dönüşümü de büyüme odaklıdır. Tek bir ev veya apartman dairesi ile başlayan konut üretimi, zamanla blokların veya tek evlerin bir araya gelmesiyle oluşan sitelere dönüşmüştür. Bu dönüşüm, ilerleyen yıllarda ölçeğini büyüterek yeni tipolojiler üretmiş ve konaklama birimlerine eklenen farklı işlevlerin entegrasyonu veya hizmet sektörünün konaklama birimleriyle bütünleşmesiyle oluşan bu yeni sunum biçimleri varlığını sürdürmeye devam etmiştir.. (Koca,D., 2015)

İmar planlarında belirtilen TAKS (taban alanı kat sayısı), KAKS (kat alanı katsayısı), EMSAL gibi yoğunluk , çekme mesafesi , yükseklik ve kat sayısı gibi değerler, güneşlenmeden gerektiği kadar faydalanmayı genellikle sağlayamamaktadır: (Canan, 2008).

İmar planları yapılırken, kentsel yaşam alanları oluşturmaktan ziyade insanlar için ilgi çekici nesneler olarak konumlanan yapılar daha önemli hale gelmekte ve bu yaklaşım nedeniyle "kamu yararı" yerine ""kişisel çıkarların" içinde bulunduğu bir kentsel şekillendirme sürecine girmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. (Ünlü, 2018).

Bu süreçte amaç tek tek yapıların oluşmasını sağlamak değil, yapıların kamusal alanla ilişkileri çerçevesinde yerel düzeyde farklılaşmayı sağlamak,

diğer bir deyişle özgün özelliklerini, kimliğini ve yerin karakterini açığa çıkarmaktır.. (CARMONA, M. (1998).

Parsel düzeni esas alınarak yapılan incelemede binaların tek tek parseller halinde gelişeceği, parsellerde plan hükümlerine uygun olarak yeterli bahçe alanlarının bırakılacağı ve bu parsellerin bir araya gelmesiyle yapılaşmayı oluşturacağı düşünülmektedir. Bu çerçevede, "ağaçlara tek tek bakmakta,ormanı görememekteyiz. (BADEMLİ, R. (2002).

Kentsel yapılı çevrenin üretilmesi, parsel bazında, planlı olmaktan çok parsele bağlı plan değişiklikleriyle bina yapımı şeklinde gerçekleşmiştir. Parsel bazında üretilen mimari yapıların,yapı adaları ve parsel aralarında, tanımsız kentsel boşluklar oluşmuştur. (Uysal,F.2022)

Kalkınma odaklı planların temel amacı bireysel parseller üretmektir. Tek bir parsel, hem planlama sürecinde hem de plan uygulama sürecinde üretilmesi gereken temel birim haline gelir, çünkü nicel olarak kontrol edilebilirliği yüksektir. Parsel bazlı yaklaşım, parsellerin birleşmesinden yapılaşmanın oluşmasını sağlarken, önemli olan imar haklarının nasıl dağıtıldığıdır. Bu anlamda öncelik kentsel bir mekan yaratmak değil, imar hakkının dağıtılması ve parsellere yapı ruhsatı verilmesidir. Bu açıdan imar planları katı, statik ve esnek olmayan yapıları ile engelleyici ve tepkisel bir içerik kazanmaktadır. (Bademli, R. (2002);

İmar planı değişikliklerinin yanı sıra özellikle "yönetmelik hükümlerine tabi kontrol alanlarında" parsel birleşmeleri ve parsel bölünmeleri de etkili olmaktadır. Bu süreç beraberinde prototip üretimini de getiriyor, şehirler kendi özgün karakterlerini yaratmaktan ve yerel özgünlüklerini korumaktan uzak şekillenmektedir.. (Ünlü,T.2006)

Şehir bloklarının içindeki işlemsel parsel üretimi için interaktif bir yöntem sunulmuşladır. Yaklaşım, gerçek dünya kentlerinde gözlemlenene çok benzeyen parsellerin mekansal konfigürasyonlarını oluşturur ve canlı düzenleme operasyonları altındaki parsellerin içerdikleri bloklara göre tutarlı konumlarını desteklemektedir. (Carlos A. Vanegas,, Tom Kelly, Basil Weber, Jan Halatsch, Daniel G. Aliaga, and Pascal Müller) (2012)

Mevcut uygulama sürecine hakim olan imar parseli üretme anlayışı, kısa vadede taşınmaz maliklerinin menfaatine hizmet edecek gibi görünse de, kentsel mekan oluşumunun göz ardı edilmesi bağlamında ciddi bir kalite sorunu yaratmaktadır. uzun vadede taşınmazların değeri ve kentsel çevrenin kalitesi. üzerinde olumsuz etkiler yarattığı gözlenmektedir gözlenmektedir.. Meşhur,M.Ç, 2008)

Belediyece inşaat ruhsatı verilen ve özel sektör aracılığı ile yapılan kentsel dönüşüm ve yapılaşmalarda ise ada bazlı yapılaşma yerine parsel bazlı

yapılaşmaların tercih edilmesinden dolayı sosyal donatı alanlarının dikkate alınmadığı değerlendirilmiştir.(Nacar,F. And Erdem, N,(2017)

Plan uygulamasının (cephe ve derinlik anlamında) imar mevzuatının öngördüğü en alt sınırlarda, yapılaşmaya uygun imar parsel üretilmesi şeklinde algılandığı bu süreç, mekân oluşturmanın ötesinde, kadastral parselden imar parseline dönüşen alanların paylaşımı üzerine temellenmektedir. Plan uygulamasının (cephe ve derinlik açısından) imar mevzuatının öngördüğü en alt sınırlarda yapılaşmaya uygun imar parsellerinin üretilmesi olarak algılandığı bu süreç, kadastral parsellerden imarlı parsele dönüştüren alanların paylaşılmasına dayanmakta ,mekan oluşturma amacına uymamaktadır. (Meşhur,M.Ç,2008)

(Meşhur,M.Ç,2008) çalışmasında "Arazi ve arsa düzenlemesini (18. Madde)"ele almış ve uygulamasına yönelik eleştirilerde bulunmuştur.Bu çalışmada imar parseli oluşturmaya yönelik tüm uygulamalar değerlendirilmiştir.Ve "Arazi ve arsa düzenlemesinin" imar parseli oluşturma açısından diğer parsel bazlı uygulamalara göre daha olumlu olduğu vurgulanmıştır.

İmar programına dayalı, güncelliği onaylı imar planları üzerinden imar uygulaması yapılmalı; yola terk, yoldan ihdas ve sınır düzeltmesi gibi basit uygulamalar dışında parsel bazında uygulamalar yasaklanmalıdır. İmar programına dayalı ve güncel olarak onaylanmış imar planlarında imar uygulaması yapılmalı; Yola terk etme, yol oluşturma, sınır düzeltme gibi basit uygulamalar dışında parsel bazlı uygulamalar yasaklanmalıdır. (İnam Ş, Çay T and İşcan,F,2015)

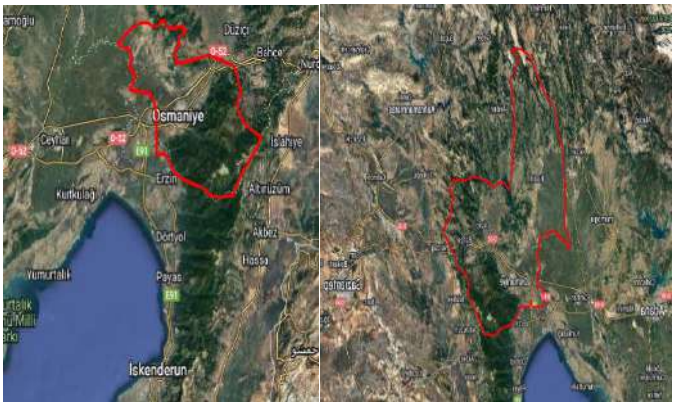
(İnam ve ark, 2015) yaptıkları çalışmada genel olarak planlama ve uygulama mevzuatını değerlendirmişler ve yeni imar yasası konusunda perspektif sunmuşlardır.Yaptıkları değerlendirmede bu çalışmayla uygun olan parsel bazlı yapılaşmaya sebeb olan uygulamaların yasaklanmasını önermişlerdir.

(İnam ve Akdeniz,2020) yaptıkları çalışmada imar planı uygulama yöntemlerini ele almışlar ve parsel bazlı uygulama yönteminin plan bütünlüğünü yansıtmayacağını ve planın özüne aykırı olacağını vurgulamışlardır.,Arazi ve arsa düzenlemesinin planın bütünlüğüne en az bir imar adası büyüklüğünde oluşturulan düzenleme sahasının yani ada bazında uygulamanın, ada üzerinde üretilecek yapılaşmaya uygun imar parselleri ve donatı alanları bütünlüğünde zemine uygulandığı için planlamadan beklenen amaca ulaşılacağını belirtmişler ve imar planı uygulamalarının mali yönü üzerinde durmuşlardır. Parsel bazlı yapılaşmanın uygulaması olan ayırma, birleştirme v.b tek parsellik uygulamaların kişi menfaatine hizmet ettiği ancak arazi düzenlemesinin yani ada bazlı uygulamalarin daha çok kamu menfaatine hizmet ettiğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada özellikle tek parsellik imar uygulaması örneklerini incelenmiş vaziyet planları değerlendirilmiş, ada bazlı imar uygulamaları örnekleriyle incelenmiş ve ada bazlı yapılaşmanın vaziyet planlarıyla karşılaştırılmıştır. Parsel bazlı yapılaşmanın sakıncaları ve ada bazlı yapılaşmanın olumlu yönleri ortaya konmuştur.Son dönemde yapılan mevzuat değişikliğine ait uygulama örnekleri değerlendirilmiş ve olumlu ve olumsuz etkileri açıklanmıştır.

1.2 Osmaniye İli Genel Görünümü

Türkiye'nin güneyinde Akdeniz bölgesinde doğu Çukurova da yer alan Osmaniye ili ,Hatay, Adana, K.Maraş ve Gaziantep illeriyle komşudur. İlin güneyinde Amanos dağları ve batısında ise verimli Çukurova toprakları bulunmaktadır. Doğuda Gaziantep, güneyde Hatay, batıda (Şekil 1). 1996 yılında Adana ilinden ayrılarak Türkiye'nin 80. İli olan Osmaniye, 3222 km2 yüzölçüme sahip ve Akdenize 20 km mesafede bulunmakta olup denizden yüksekliği 121 m dir.Kuş uçuşu güneyden kuzeye 88 km , doğudan batıya ise 74 km dir.Ulaşım bakımından çok elverişli bir konuma sahip olan Osmaniye ili, Doğu ve güneydoğu illerini batıya bağlayan karayolu güzergahı üzerinde yer almaktadır.



Şekil 1. Osmaniye ili ve merkez ilçenin konumu (URL.2)

Demografik Yapısı; Osmaniye, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) değerlerine göre otuzbir Aralık 2021 tarihi baz alındığında Osmaniye'nin il nüfusunda yüzde 8.1 lik artışla 553in 012 kişi olmuştur. Osmaniye'nin toplam nüfusunun 278 bin 847'inin erkek, 274 bin 165 kişinin de kadınlardan oluştuğu kaydedilmiştir. Osmaniye'nin nüfus yoğunluğu 172 kişi /km^2 açıklanırken, yıllık nüfus artışının ise yüzde 12,6 olduğu belirtildi. Osmaniye merkez ilçe nüfusu ise 279 bin 992 olarak açıklanmıştır. (URL1.)Osmaniye'ye Son 50 yılda başta Kahramanmaraş, Şanlıurfa olmak üzere

doğu ve güneydoğu illerinden yoğun göç almıştır. Osmaniye merkez ilçesi nüfsu olarak ülkemizin 30. Büyük yerleşim yeridir. (Koç,2008)

İnşaat Sektörü; İnşaat sektöründeki hareketlilik , toplumun gelir seviyesiyle doğru orantılı olduğundan, gelir düzeyinin yükselmesi inşaat sektörünü canlandıracaktır.Osmaniyenin il olmasıyla başyalan ekonomik hareketlilik, bölgedeki teşviklerin yaygınlaşması , Organize Sanayi Bölgesindeki yatırımların artmasını sağlamış, inşaat sektörü ve diğer iş kollarında canlanama sağlamıştır (Tablo 1). Osmaniye il merkezi, 4209 hektar yüzölçümlü mücavir alana ve 3800 hektarlık belediye sınırlarına sahiptir. Belediye ve valilik sınırları içinde kalan 14000 adet parsel üzerinde 47000 adet konut kurulmuştur . (Koç,2008).2022 verilerine göre Osmaniye belediyesi sınırları içerisinde yaklaşık 121.000 bağımsız bölüm ve 42700 civarında bina bulunmaktadır. Osmaniye belediyesi sınırlarında 40 mahalle ve 14000 civarında iş yeri bulunmaktadır.

Tablo 1. Osmaniye'nin 2015-2021 yılları arası konut satışı (TÜİK)(URL1.)

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
5979	6079	6785	6 642	6909	6906	5802

2.Materyal Metod

2.1 İmar Mevzuatında tanımlar ve yapılaşma ile ilgili hükümler

Nazım İmar Planı; arazi parçalarının; genel kullanış biçimlerini, başlıca bölge tiplerini, bölgelerin gelecekteki nüfus yoğunluklarını, gerektiğinde yapı yoğunluğunu, çeşitli yerleşme alanlarının gelişme yön ve büyüklükleri ile ilkelerini, ulaşım sistemlerini ve problemlerinin çözümü gibi hususları göstermek ve uygulama imar planlarının hazırlanmasına esas olmak üzere düzenlenen, varsa bölge veya çevre düzeni planlarına uygun olarak halihazır haritalar üzerine, yine varsa kadastral durumu işlenmiş olarak çizilen ve detaylı bir raporla açıklanan ve raporuyla beraber bütün olan plandır.

Vaziyet planı:

Aplikasyon krokisindeki koordinatlara göre ,Parselde yapılacak yapı veya yapıların; teknik kurallara uygun ir şekilde sayısal ve çizgisel olarak gösterildiği,

- •Bahçe düzeni, açık ve kapalı otopark girişlerini ,
- • bina yaklaşma mesafe ve kotlarını, yangın kaçışlarını
- •parsel içerisindeki teknik alt yapı tesislerini gösteren, kuzey yönü belirtilmiş
- •1/100,1/200veya1/500 ölçekli plandır

Bahçe Mesafeleri

•Ön bahçe mesafeleri en az 5.00 metredir. Yapının cephe aldığı yola olan uzaklığıdır.

•Yan bahçe mesafesi en az 3.00 metredir. Dörtten fazla katlı binalarda 4 katın üzerindeki her kat için 0.50 metre artırılır..•Arka bahçe mesafesi en az 3.00 metredir ve bina yüksekliğinin yarısı kadar uygulanır.

2.2 İmar mevzuatında , imar parseli oluşturma yöntemleri

İmar yasasına göre imar planı uygulama yöntemleri ;

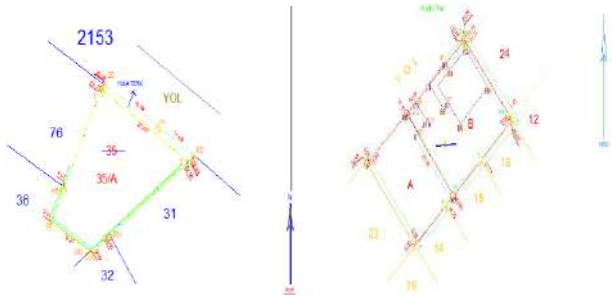
1- Mal sahibi tarafından yaptırılan uygulamalar

2- Resen yapılan uygulamalar (Arazi ve arsa düzenlemeleri)

Olarak ortaya konmuştur.

Mal sahibinin isteği üzerine yapılan uygulamalarda mülkiyet sahiplerinin parsellerini bir Harita mühendisi vasıtasıyla imar planına uygun hale getirmesidir. Yol terki, ayırma , bileştirme ve parselasyon işlemleri, imar yasasının on beş ve on altıncı maddeleri gereği mal sahibinin isteği üzerine yapılmaktadır.

Mal sahibinin isteği üzerine yapılan uygulamalar parsel bazlı uygulamaların genelini oluşturmaktadır. Yol terki, yoldan ihdas, ifraz (ayırma), tehvit (birleştirme) ve parselasyon işlemleri parsel bazlı uygulamalardır.



Şekil 2. A) Yola terk örneği B) Ayırma örneği

Resen yapılan uygulamalar arasında imar planının uygulanması açısından ve belediye açısından en uygun yöntem arazive arsa düzenlemesi (imar yasasının 18. Madde uygulanasıdır.)

Arazi ve Arsa düzenlemesi(Madde 18): Belediyeler imar sınırları içerisinde yapılı yada yapısız arazi ve arsaları sahiplerinin onayı aranmaksızın birbirleriyle, kamu kurumlarına veya belediyelere ait bulunan yerlerle, yol fazlaları ile, birleştirmeye, bunları yeniden imar planına uygun ada veya parsellere ayırmaya,

hisseli veya kat mülkiyeti esaslarına göre,yada müstakil olarak hak sahiplerine dağıtmaya ve re'sen tescil işlemlerini yaptırmaya yetkilidir. Belediye ve mücavir alan sınırları dışındaki ise imar uygulamalarında yeki valilikçe kullanılır.

Belediyeler veya valiliklerce imar uygulaması yapılan arazi ve arsaların dağıtımı sırasında en fazla yüzde 45 e kadar düzenleme dolayısıyla meydana gelen değer artışları karşılığında "düzenleme ortaklık payı" olarak düşülebilir.

Düzenleme sahası müstakil bir imar adasından küçük olamaz . "Parsel" bazında düzenleme yapılamaz. Ancak imar adasının büyük bir kısmının imar mevzuatına uygun olarak oluşmuş olması nedeniyle, yeniden düzenlenmesine ihtiyaç bulunmaması ve diğer kısmında birkaç taşınmazın birleştirme ve ayırma yoluyla imar planı ve imar mevzuatına uygun imar parsellerinin elde edilmesinin mümkün olması halinde, adanın bu kısmında kalan parseller, müstakilen düzenlemeye tabi tutulabilir.

Parselasyon (Parselasyon niteliğinde olan Ayırma): Mal sahibinin isteği üzerine yapılan imar uygulamasıdır.Ancak içerisinde yol , park gibi sosyal donatı alanları olduğu için ada bazlı uygulamalardan sayılabilir.Kadastro parselinin boyutları büyük olduğu için adalar , yol ve yeşil alan gibi yapılaşmada ada bazında oluşmaktadır.Oluşmuş İmar adasının parselasyonu üzerinde oluşan parsel bazlı yapılaşmada tek parsellik uygulamalara göre daha estetik ve düzenlidir.

- Parselasyon Planı Yapılmadan İfrazın Yapılamaması

2019 yılında imar yasasında yapılan değişiklikle parselasyon planı yapılmadan parsellerin ifraz(ayrıma) ve birleştirme işlemlerinin yapılması yasaklanmıştır.Parselasyon planı aranmayacak istisnai durumlar ise; Kamu arazilerinde, parselasyon planının uyğulanması mümkün olmayan alanlarda, koruma amaçlı imar planı bulunan alanlarda ve kısmen oluşmuş imar adaları olarak belirtilmiştir.İstisnai durumun bir raporla açıklanması ve belediye encümen kararına bağlanması şartı getirilmiştir.

3. Uygulama

3.1 Parsel Bazlı Yapılaşma

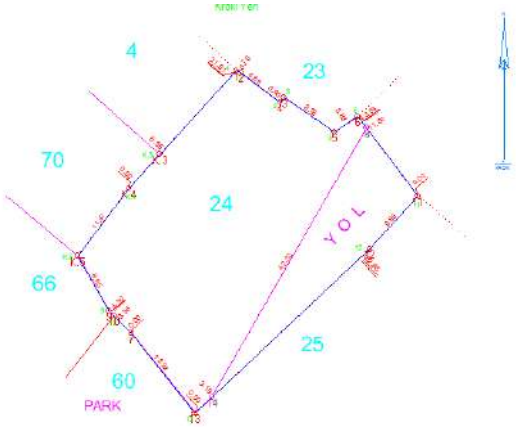
3.1.1 Tek Parsellik Uygulama Örnekleri

1-Yol Terki

Yol terki , parselin imar planında yola isabet eden kısmının terkin edilerek tapudan düşülmesidir.3194 sayılı imar kanununun 15 ve 16.maddeleri gereği mal sahibinin isteği üzerine yapılmaktadır**.**

Parsel bazlı yapılaşmadan önce yapılan yine parsel bazlı bir imar planı uygulama yöntemidir. Sadece yol terki yapılarak oluşturulan imar parseli örneği

şekil 2-a de görülmektedir. Osmaniye Şekil 3. Alibeyli mahallesi 59 ada 24 numaralı parselin Yol terki krokisi



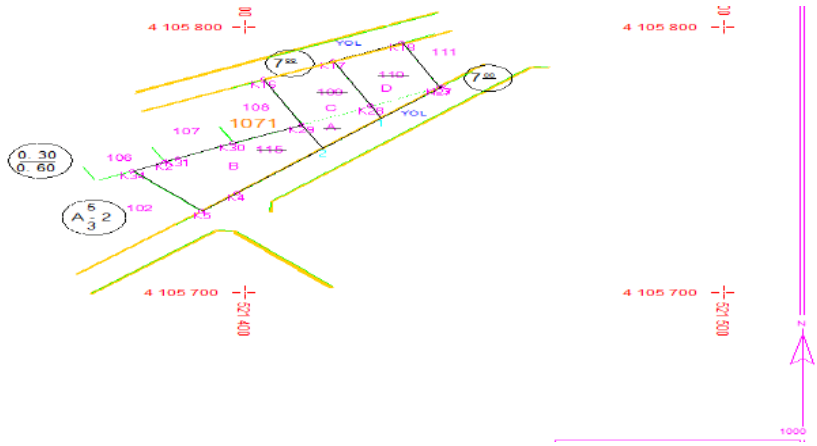
Şekil 3. Alibeyli mahallesi 59 ada 24 numaralı parselin Yol terki krokisi

ili merkez ilçe Alibeyli mahallesi 59 ada 24 nolu parselin imar planına göre yola isabet eden bölümü terkin edilmiştir.Parsel şekil olarak biçimsiz olduğu için yapılacak yapıda parselin şeklinin etkisiyle düzgün şekilli olmayacaktır.

2-Ayırma

Ayırma işlemi de mal sahibinin isteği üzerine yapılan imar planı uygulama yöntemidir. Çoğunlukla diğer parsel sahipleriyle anlaşma güçlüklerinden dolayı parsel bazlı uygulanmaktadır**.**

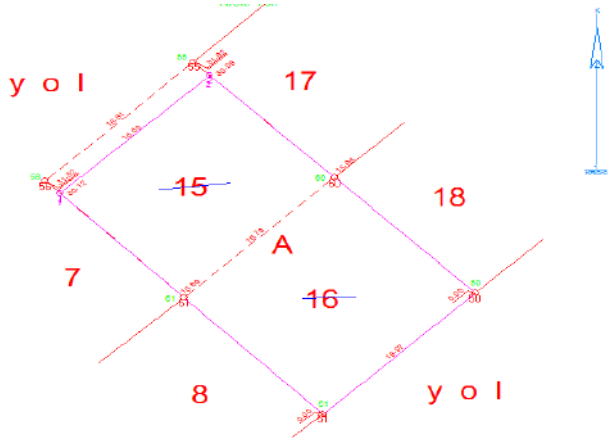
Şekil 4 da Osmaniye merkez yenimahalle 1071 ada 100,110 ve 115 nolu parseller mal sahiplerinin isteği üzerine önce birleştirilmiş sonra da ve ayırma işlemi yapılmıştır. Şekil 4 deki işlem parsel bazlı bir imar uygulaması örneğidir. İmar adası tam oluşmamıştır. Buradaki örnekte kadastro parseli bazlı yapılaşma yapılmış müstakil mülkiyete geçiş amaçlı imar uygulaması yapılmıştır. Parsellerin şekilleri düzensiz çekme ve bahçe mesafeleri uygunsuzdur



Şekil 4. Yenimahallesi 1071 ada 100, 110 ve 115 nolu parsellerin birleştirme ve ayırma krokisi

3-Birleştirme

Birleştirme işlemi de yine mal sahibinin isteği üzerine yapılan imar planı uygulama yöntemidir.3194 sayılı imar kanununun 15 ve 16 maddelerince yapılan imar planı uygulama yöntemidir**.**Birleştirme işemide birkaç parselin birleştirmesiyle uygulandığı zaman oluşan imar parseli biçimsiz olabilmektedir. Şekil 5. Alibeyli mahallesi 427 ada 15 ve 16 numaralı parselin birleştirme krokisi ve yol terki yapılarak imar planı uygulanmıştır. Oluşan parsel imar parselidir ve yapılaşma yeni oluşan parsel üzerine yapılmaktadır.



Şekil 5. Alibeyli mahallesi 427 ada 15 ve 16 numaralı parselin birleştirme ve Yol terki krokisi

3.1.2 Parsel Bazlı Uygulamalarla Oluşmuş Yapılaşma Örnekleri

Şekil ve estetik açıdan parsel bazlı uygulamalar nedeniyle, yapının şekli parselin şekline göre oluşmaktadır. Kadastro parsellerinin genelde şekilsiz oluşu, yapılan yol terkiyle imar parseli oluşmakta ise de, oluşan parsel imar planındaki ada bütünlüğü içinde oluşmadığı için estetikten uzak yapılaşmaya sebep olmaktadır. Şekilde örnek aldığımız Osmaniye ili merkez ilçe Ulaşlı mahallesi 226 ada 26 parselde yapılaşma, parsel bazlı yapılaşma ile oluşmuştur.

a) İmar durumu

b)

c) 3 boyutlu görüntü

Şekil 6 .a) Ulaşlı mahallesinde 226 adanın (1,2 ve12 nolu parsellerdeki)bir bölümünün imar durumu b) ortofoto harita üzerine kadastral görüntüsü (cumhuriyet mahallesi 158 ada 25 nolu parsel ve komşu parsellerin yapılaşma durumu kadastro durumu ve binalarının gösterir c) Ulaşlı mahallesinde 221 ada 26 parsel ve çevresinin 3 boyutlu görüntüsü

Şekil 6 de görüldüğü gibi yapılaşma da estetik yoktur. Binaların çekme mesafeleri simetrik değildir. Yapıların parselleri düzgün olamadığı için vaziyet planları ve bahçe mesafeleri de şekilsiz olup binalar birbirinin güneş ve rüzgarını olumsuz etkilemektedir.Ayrıca ada içinde parsel şekilleri nedeniyle binalarda şekilsiz e düzenli gözükmemekedir.Kat yükseklikleride aynı ada içinde bile farklı farklıdır.

Cumhuriyet mahallesi 158 ada ya ait parsel bazlı yapılaşmayla oluşmuş 25,32,39,37,38,159,32,31 ve 30 nolu parseller gözükmetedir.Örneğin 25 nolu parsele 4 adet blok yapılmıştır.Söz konusu parselin şekline göre bloklardan biri parselin şekline göre 37 ve 38 nolu parseller ince uzun parsellerdir.38 nolu parseldeki bina parsel gibi şekilsiz ve uzundur ve 39 nolu parselin bahçe boşluğuna gelerek hava akımını engel girintili çıkıntılı yapılmıştır.. Ayrıca aynı ada içerisinde farklı kat yükseklikleri de parsel bazlı yapılaşmış adalarda estetik olarak sorun teşkil etmektedir.Şekil 6-c de cami ve komşusundaki 221 ada 26 nolu paselin üç boyutlu görüntüsü gözükmektedir.Parsel girintili çıkıntılı olduğu için 2 adet yapı yapılmış ve estetikden uzaktır. Kat yükseklikleri gerek minare ve gerekse komşu parseldeki yapılarla uygunsuzdur.

3.2 Ada Bazlı Yapılaşma

3.2.1 Ada Boyutunda Uygulama Örnekleri

1-Arazi ve Arsa Düzenlemelesi (18. Madde Uygulaması)

İmar yasasının belediyelere sağladığı önemli avantajları içeren 18.madde ada bazlı imar uygulamasının önemli bir dayanağıdır. Geniş alanlar (en az bir ada boyutunda olması şarttır)bu sayede imar planına uygun hale getirilmektedir. Arsadaki değer artışı karşılığı yol, yeşil alan ,okul yeri, ibadethane ,karakol yeri gibi alanlar bedelsiz olarak kesilebilmektedir. Bu sayede imar adaları bir bütün halinde oluşabilmektedir. Sosyal donatı alanları ile birlikte oluşan yapılaşma kısa sürede yaşam merkezlerine dönüşmektedir. Resen yapıldığı için uygulama işlemleri daha pratik ve kolay olmaktadır.Uygulama alanları önce ve sonra değer artışı oluştuğu için ilgililer de mağdur edilmemektedir.Yol ve okul gibi kamu yatırımları hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

a)

b) c)

Fakıuşağı toki konutları

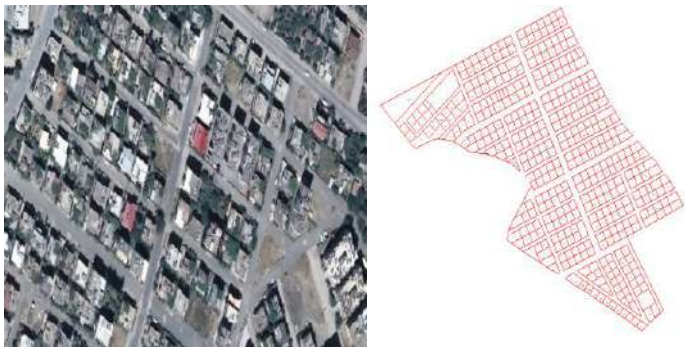
Şekil 7. a) Fakıuşağı mahallesi 142 ada 4 nolu parseldeki toki konutları b) Yaverpaşa mahellesi 1977 ada 4 nolu parselin imar durumu c) Yaverpaşa mahellesi 1977 ada 4 nolu parselin tkgm parsel sorgulama görüntüsü

Ada bazlı yapılaşmada örneğimiz Toki tarafından Osmaniye ili merkez ilçe yaveriye mahallesinde yapılan toplu konut çalışmasıdır.Bölge şehir merkezinden uzak ve uydu kent niteliğinde bir bölgedir.Bu bölgede yapılaşma çalışması ada bazlı parselasyonla başlamıştır.Şekil 7 de görüldüğü gibi a) fakıuşağı mahallesi 142 ada ve b) ve c) Yaverpaşa mahallesi 1977 adalar parselasyonla ada bazlı olarak oluşturulmuş ve konutlarda ada içine blok olarak yerleştirilmiştir. Konutların birbirlerine göre mesafeleri ve vaziyet planları gayet estetiktir. Yoldan çekme mesafeleri, arka ve komşu bahçe mesafeleri standartlara uygun şekildedir.Binalar birbirlerinin güneş ve rüzgarlarını kesmemektedir**.**

2-Parselasyon

Mal sahiplerinin talebi üzerine yapılan ve içerinde park ve yol terki gibi kamuya terklerin bulunduğu yüzölçümü olarak büyük kadastro parsellerinin imar

kanunun 15 ve 16. Maddelerince yapı yapılabilecek ada ve parsellere ayrılması işlemidir**.** Bu tür imar uygulamaları az ortaklı yada ortaklar arasında anlaşmazlık olmadığı durumlarda yapılabilmektedir. Çünkü bu tür imar uygulamaları da tüm ortakların imzalamasıyla tapu sicil müdürlüklerince tescil edilebilmektedir**.** Parselasyon alansal olarak büyük olduğu için içerisinde imar adaları bulunmakta ve ada bazlı yapılaşmaya temel teşkil etmektedir**.**



a) b)

Şekil 8. Rahime hatun mahallesi Tapu maliklerince yaptırılan parselasyon haritası (a) ve ortofoto görüntüsü (b)

Rahimehatun mahallesindeki şekil 8 de görülen parselasyonla kırk civarında ada oluşmuştur. Osmaniyenin 1980 li yıllarda ki yeni yerleşim bölgesi olan bu bölge düzenli yapılaşmaya örnek olsa da sonraki yıllarda yapılan imar planı değişilikleriyle kat değişimine tabi tutulmuş farklı tarihlerdeki farkı kat uygulamaları yapılaşmada dikey yönde karmaşaya neden olsada estetik açıdan daha düzenli bir yapılaşmadır.Çekme mesafeleri, çıkmaz sokak olmayışı , yolların birbirini karşılaması , her yerde aynı genişlikde olması ve sınır duvarlarındaki düzgünlük bu ada bazlı parselasyonun olumlu etkisidir.

4.DEĞERLENDİRME

4.1 PARSEL BAZLI YAPILAŞMANIN SAKINCALARI

Parsel bazlı yapılaşma özellikle ada bazlı parselasyon yapılmadan sadece kadastro parseli üzerinde mal sahiplerince yaptırılan yol terki, yoldan ihdas, ayırma ve birleştirme işlemleriyle oluşan şekilsiz imar parselleri yapılaşma konusunda ciddi sıkıntılara yol açmaktadır.Yapının çekme mesafeleri doğal olarak, şekilsiz parsele göre olduğu için yapının şeklide estetikten uzak olmaktadır.Parsel L şeklinde ise yapıda L şeklinde, parsel üçgen şekilde ise yapıda üçgen şeklinde ve parsel girintili çıkıntılı ise yapıda girintili çıkıntılı oluşmaktadır.

Parsel bazlı yapılaşmaya özellikle eskiden oluşmuş şehir merkezlerinde daha çok rastlanmaktadır. Yık-yap mantığı ile oluşan yeni model betonlaşmayı beraberinde getirmiş, binalar birbirinin içine girmiş simetrik çekme mesafelerinin olmadığı, rüzgar akımlarının engellendiği, sorunlu komşuluk ilişkilerine sebeb olacak, insanların balkonlarında ve bahçelerinde rahat davranamadığı karmaşık bir yapılaşma modeli oluşmaktadır.

Şekil 9. Parsel bazlı göre yapılaşma örneği Osmaniye 7ocak mahallesi 326 ada yapılaşma modeli halihazır harita ve ortofoto görüntüsü

Şekil 9 da görüldüğü gibi parsel bazlı yapılaşarak oluşan mahallede, imar planı yalnızca ihtiyaç duyulan parselde uygulanmış ve karmaşık görüntü oluşmuştur. Çıkmaz sokaklar, açılmayan yollar, sosyal donatı alanları olmayan mahalleler oluşmuş, kamuya istimlak yükü artmıştır. 326 ada 107 parsel de üç tane yapı bulunmaktadır ve parsel çıkmaz sokağa cephe almaktadır. Bu durum parsele deki yaklaşık 30 ila 40 dairelik yapıda oturanların taşıtları için giriş-çıkış ve otopark problemine de neden olacaktır. Yine aynı ada 106 nolu parsel de iki yapı bloğu bulunmakta ve 106 nolu parselde plansız bir yola (zikzak şeklinde) cephe almış ayrıca estetikden uzaktır. Aynı ada 42 nolu parsel derinliği olmayan dikdörtgen şeklinde ince ve uzun olduğundan bu parseldeki yapıda ince ve uzun bir yapıdır.326 adadaki diğer parslerde kadastro parseli olup imar düzenlemesi

görmeden parsel bazlı yapılaşmıştır. Kat adetleride aynı ada içinde farklı yükseklikde inşa edilmiştir.

4.2 ADA BAZLI YAPILAŞMANIN FAYDALARI

Ada bazlı yapılaşamada, imar uygulaması, arazi ve arsa düzenlemesi yapılarak imar adaları oluşturularak daha sonra yapılaşma yapılmaktadır. Oluşan imar adaları üzerinde oluşan yapılaşma parsel bazlı yapılaşmaya göre daha estetiktir. Bahçe mesafeleri simetrik, rüzgar ve güneş konusunda daha şanslıdır.

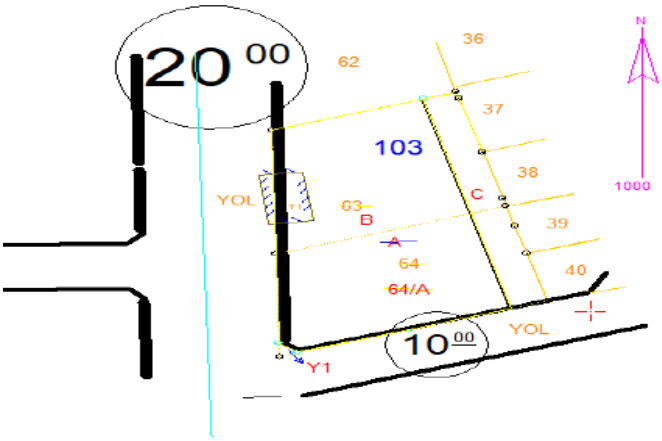
Şekil. 10 Esentepe Konutları (cevdetiye) Sitesi Google Earth görüntüsü

Ada bazlı yapılaşmada sadece konut olarak barınma ihtiyacı değil aynı zaman da , otoparkı, spor tesisi, yeşil alanı v.b sosyal donatı alanları kendi içinde çözülmektedir. Yaşam merkezi oluşmaktadır. Şekil 10 da ada bazlı yapılaşmaya güzel bir örnek gözükmektedir. Esentepe vilları olarak isimlendirilen site mevzi imar planı ile planlanmış ve özel bir koopratif tarafından inşa edilmiştir. Cevdetiye beldesinin mahallesi olan Yeşiltepe mahalesi sınırlarındadır. Ada bazlı yapılaşmış ve sosyal donatı alanlarını ada içince çözmüş, ve yaşam merkezi haline dönüşmüştür. Cami ve yeşil alan oluşturularak ayrık nizam iki katı bahçeli ir yapılaşma örneği ortaya çıkmıştır. Binaların yaklaşma mesafeleri , rüzgar ve güneş yönleri bile düşünülerek yerleştirlmiştir. Bahçe mesafeleri standart ve simetriktir. Site şeklinde oluşmuş bir modeldir.Amacına uygun kullanılan bahçe ve çekme mesafeleri ada içinde çözülen otopark , yeşil alan ve çocuk parkı gibi fonksiyonlar günümüzün güvenli ve relaks yaşam merkezi mantığına uygundur. Yapılan imar uygulamasıyla yollar, park, otopark v.b sosyal donatı alanları

uygulama esansında arazi sahiplerinden değer artışı gereği sağlanmaktadır. Dolayısıyla kamuya istimlak yükü binememektedir.

4.3 Parsel Bazlı yapılaşmayı düzenleme çalışmaları

Ülkemizde 2019 yılından sonra mevzuatta yapılan düzenlemelerle parsel bazlı uygulamaların şehirleşme ve yapılaşmadaki olumsuz etkilerini gidermek amaçlanmıştır. Özellikle parselasyon planı yapılmadan parsel bazlı uygulamalardan en yoğun olan ifraz (ayırma) işlemine istisnalar dışında izni verilemeyeceği yasal olarak ortaya konulmuştur.



Şekil 11. Osmaniye istiklal mahallesi 103 ada 63ve 64 nolu parseldeki ayırma krokisi

Şekildeki İstiklal mahallesi 103 ada 63 ve 64 nolu parsel önce birleştirilmiş daha sonra da yol terki ile birlikde iki kısma ayrılmıştır.Burdaki ilginç olan konu ayırma işlemi değil ayırma işlemi yapılırken komşu parsel büyüklüklerinin de düşünülerek C ile gösterilen parçanın aynı ada 37,38,39 ve 40 nolu parsellerin gelecekteki yapılaşma durumunun dikkate alınarak ayrılmış olmasıdır. 37,38,39 ve 40 nolu parsellerin boyutları yapılaşma için küçük ve derinlikleri dardır. C ile gösterilen parçanın bu parsellere eklenmesiyle yapı yapılabilir boyuta ulaşması sağlanacaktır.Bu uygulama parsel bazlı uygulamanın olumsuz etkisini kısmen gidermiş ve yapılaşmanın sadece parsel bazlı olamayacağını göstermektedir.

Tablo 2. Adabazlı Yapılaşma İli Parsel Bazlı Yapılaşmanın Karşılaştırılması

	Parsel bazlı yapılaşma	**Ada bazlı yapılaşma**
Çekme mesafeleri - bahçe genişlikleri	Düzensiz , estetik değil	Düzenli ve estetik
Yapı Yükseklikleri	Farklı yükseklikde yapılar mevcut ve düzensiz	Standart ve düzenli
İmar planının amacına uygunluk	Bireysel fayda gözetilmektedir.	Toplum faydası gözetilmektedir.
Sosyal donatı alanları açısından	Kamulaştırma gerektirmektedir. İdarelere mali yük binmektedir.	Sosyal donatı alanları her kesten ortak olarak sağlanmaktadır. Kamulaştırma yükü yoktur.
Yapı şekilleri açısından	Parsel şekline göre şekillenmekt parsele bağımlı yapılar oluşmaktadır.	Mimari açıdan daha estetik ve bağımsız yapılar oluşmaktadır.
Şehirleşme açısından	Parçacıl ve karmaşık	Bütüncül ve daha düzenli
Yerel yönetimler açısından	Sorunlu ve ekonomik değil	Daha ekonomik

5. SONUÇ

Parsel bazlı yapılaşma, gerek şehirleşmenin estetiği açısından gerekse yapılaşmadaki düzen açısından sakıncalıdır. Parselin biçimi düzün olmadığı zaman bahçe mesafeleri (ön bahçe , yan bahçe, komşu bahçe ve arka bahçe) simetrik oluşmamaktadır. Binalar birbirinin güneşini ve rüzgarını engellemektedir. Şehir görsel olarak çarpık oluşmaktadır.

Parsel bazlı yapılaşmayı doğuran sebeplerin başında parsel bazlı imar uygulamaları gelmektedir. Yola terk, yoldan ihdas, birleştirme ve ayırma tek parsellik uygulamalar parsellerin şekillerinin düzgün olmadan oluşmasına neden olmaktadır**.**Oluşan biçimsiz parsele göre yapı da biçimsiz ve estetikden uzak oluşmaktadır. Parsel üçgense binada üçgen , parsel "L" şeklindeyse binada "L" şeklinde oluşmaktadır. Aynı ada içerisinde farklı kat yükseklikleri ,farklı biçimde yapılar yapılmaktadır.Parsel içerisinde anlamsız ve atıl boş alanlar oluşmaktadır. Bu durum düzensiz bir görüntü oluşturmaktadır**.**2019 yılında mevzuatta yapılan değişiklikle parsel bazlı yapılan yapılaşma öncesi imar uyğulamaları (ayırma , birleştirme, yol terki v.b) yasaklanmıştır.Ancak bu yasal düzelemeyede bazı istisnalar getirilerek parsel bazlı uygulamalara devam edilmektedir.

Ülkemizdeki diğer imar uygulaması sorunu ise parsel bazlı yapılaşmış ve hiçbir mevzuata uymadan yada kısmen uyarak yapılan yapılara af getirilmesidir.Bu uygulamalarıda parsel bazlı uygulamalar olarak görebiliriz.Bütülcül olmayan bu tür yaklaşımlar şehir estetiğine ve yapılaşma

kurallarına, yapının parsel içerisindeki oturumu ve kat yüksekliği açısından büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Ada bazlı yapılaşmada binalar çekme mesafelerine uygun bir şekilde oluşmaktadır.Yapıların birbirine yaklaşma mesafeleri bahçe uzaklıkları daha düzenlidir. Oluşan ada imar planına uygun olduğu için estetik olarak yapılarda planlandığı gibi yapılmaktadır. Ada bazlı yapılaşmayı, büyük çaplı arsa düzenlemeleriyle (imar uygulamaları ve parselasyon) oluştuğu için yapı adası etrafında diğer sosyal donatılarda(yeşil alan, okul, ibadethane ,vs.) oluşmakta ve bu sayede yaşam merkezine dönüşmektedir. Yine Ada bazlı çalışma da kent estetiğine açısından bahçe mesafeleri, rüzgâr yönleri, binalar arası açıklık daha doğru ele alınmaktadır. Ayrıca aynı ada içerinde estetiği bozacak farklı kat uygulamaları oluşmamaktadır.

Parsel bazlı uygulamalarda sosyal donatı alanları olmadığından daha sonra kamu tarafından (belediye) istimlak yapılmak zorunluğu doğmaktadır. Otopark, yeşil alan ve yol gibi temel ihtiyaçlar bile çözülememektedir. Ada bazlı uygulamalar da özellikle arazi ve arsa düzenlemelerinde (imar kanunun 18. Maddesi uygulamalarında) arsadaki değer artışı karşılığı sosyal donatı alanları için %45 a kadar bedelsiz terk yapılmaktadır. Okul yeri, ibadet yeri , yol , park otopark ve karakol gibi alanlar için kesinti yapılıyorken son değişiklikle, Milli Eğitim Bakanlığına bağlı öğretime yönelik eğitim tesis alanları, Sağlık Bakanlığına bağlı sağlık tesis alanları, pazar yeri, semt spor alanı, toplu taşıma istasyonları ve durakları, otoyol hariç erişme kontrolünün uygulandığı yol, su yolu, resmî kurum alanı, mezarlık alanı, belediye hizmet alanı, sosyal ve kültürel tesis alanı, özel tesis yapılmasına konu olmayan ağaçlandırılacak alan, rekreasyon alanı olarak ayrılan parseller ve mesire alanları yerel yönetimlerin istimlak yükünü azaltmakta ve imar planının hayata geçirilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca bütüncül olarak yerleşim alanları ele alınmaktadır.

Kaynaklar

1. BADEMLİ, R. (2002); "Plan uygulamaları", MİMARLAR ODASI GENEL MERKEZİ (2002); İmar Hukukunda Toplum ve Mimarlık, Mimarlar Odası,İstanbul
2. BADEMLİ, R. (2002); "Plan uygulamaları", MİMARLAR ODASI GENEL MERKEZİ (2002); İmar Hukukunda Toplum ve Mimarlık, Mimarlar Odası,İstanbulBrenner, N., Peck, J. and Theodore, N. (2010). Variegated neoliberalization: geographies,modalities, pathways, Global Networks 10: 182–222.
3. Canan, F. (2008). Enerji Etkin Tasarımda Parametrelerin Denetlenmesi için bir Model Denemesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
4. Carlos A. Vanegas2,1, Tom Kelly† 3,1, Basil Weber1, Jan Halatsch4, Daniel G. Aliaga2,4, and Pascal Müller" Procedural Generation of Parcels in Urban Modeling" EUROGRAPHICS 2012
5. CARMONA, M. (1998); "Residential design policy and guidance: prevalence, hierarchy and currency", Planning Practice and Research, vol. 13, no 4, 407-419
6. İnam Ş, Çay T and İşcan,F,(2015) "PLANLAMA VE İMAR KANUNU TASARISININ UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" Selçuk-Teknik Dergisi ISSN 1302-6178 Journal of Selcuk-Technic Cilt 14, Sayı:1-2015 Volume 14, Number:1-2015
7. Kellekçi, Ö. L. ve Berköz, L., Konut ve Çevresel Kalite Memnuniyetini Yükselten Faktörler", İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi, 5(2), 2006 Ey
8. Knowles, R.L. (2003). The solar envelope: its meaning for energy and buildings, Energy and Buildings, 35, 1, 15-25.
9. Koca ,D.- Tasarım+ Kuram, 2015"Türkiye'de Çağdaş Konut Üretiminin Yeniden Okunması." - dergipark.org.tr
10. Koç E (2008) Osmaniye'nin Sosyo-Ekonomik ve Kültürel Yapısı. ISBN: 978-9944-0426,
11. Mart, Osmaniye.
12. Meşhur,M.Ç,(2008) "ARAZİ VE ARSA DÜZENLEMESİ (18.MADDE UYGULAMASI) SÜRECİNİN KENTSEL MEKÂN OLUŞUMU AÇISINDAN İRDELENMESİ), METU JFA2008/2 (25:2) 21-38
13. Nacar, F. and Erdem, N., **2017**. The Effect of Municipality- TOK˙I (Mass Housing Admınıstration) Model and Urbanization in the Solution of Housing Problem. *International Advanced*

14. *Researches & Engineering Congress-2017*, November 16–18; http://iarec.osmaniye.edu.tr/Osmaniye/TURKEY. Proceeding Book ,ISBN: 978-605-245-037-6, *Page:2053*

15. Ören, K. ve Yüksel, H., Türkiye'de Konut Sorunu ve Temel Dinamikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 2013, 18(2), ss 47-84
16. Şahin, Y., Kentleşme Politikası, 2. Baskı, Murathan Yayınevi, 2011, Trabzon
17. Uysal,F.(2022,"Artık Alanın Kamusal Yaşama Kazandırılması: Ankara-Dumlupınar Yolu Örneği", Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi 29. Kentsel Tasarım ve Uygulamalar Sempozyumu,Şubat,2022
18. Ünlü,T.2006 YTÜ Mim. Fak. e-Dergisi YTU Arch. Fac. e-Journal Cilt 1, Sayı 4, 2006 Volume 1, Issue 4, 2006 "MERSİN'DE DEĞİŞEN KENTSEL MEKÂN: ÇAMLIBEL'DE MORFOLOJİK DEĞİŞİM")
19. URL 1.TÜİK, http://www.tuik.gov.tr/, E.T.: 29/09/2019
20. URL.2 https://parselsorgu.tkgm.gov.tr/

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRÜN GELİŞİMİ İÇİN ATIK BİYOKÜTLENİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÇEVRESEL ETKİNİN AZALTILMASI

Dr. Öğr. Üyesi Gamze GÜNDÜZ MERİÇ

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Kimya Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0001-9487-4267

1. Giriş

Sürdürülebilir kalkınma açısından kimyasallar ve enerji için alternatif hammaddeler yaşadığımız yüzyılın en önemli zorluklarından bir tanesidir. Bitki bazlı hammaddelerin iklim üzerindeki olumsuz etkilerinden kaçınırken sürdürülebilir küresel karbon ekonomisi hedefine ulaşmada umut verici kaynaklar olduğu düşünülmektedir (Li ve Zheng, 2017). Yıllık küresel katı, gaz ve sıvı atık üretimi çevreyi tehdit edici bir şekilde artmakta ve bu da doğal çevre üzerindeki olası olumsuz etkiler nedeniyle uygun atık yönetiminde ciddi sorunlara yol açmaktadır (Patel vd., 2020). Lignoselülozik atık biyokütle, en zengin yenilenebilir kaynaklardan bir tanesidir ve biyoürüngeliştirme için iyi bilinen bir hammaddedir (Hu vd., 2017). Biyokütle, ligninin yanı sıra selüloz, hemiselüloz gibi çeşitli bileşenleri kapsamaktadır (Usmani vd., 2020). Lignoselülozikbiyokütleninheterojenliği ve kristalliği, arıtma uygulamalarını kısıtlamakta, bu nedenle büyük miktarları kullanılmamış atık olarak yakılmaktadır (Zhao vd., 2017). Verimli olan bu atıkların biyoteknolojik teknikler kullanılarak değerli biyoürünlere dönüştürülmesi uygun ve sürdürülebilir bir yöntem olarak görülmektedir. Ayrıca bu yaklaşımla çeşitli faydalar sağlanabilir; örneğin, biyoyakıtlar için biyokütle hammaddesi, döngüsel biyoekonomi için sürdürülebilir bir malzemedir.

Tüm karbon bazlı malzeme türleri, piroliz ve hidrotermal karbonizasyon gibi termokimyasal yaklaşımlar veya fiziksel ve kimyasal süreçleri içeren aktivasyon süreçleri yoluyla biyokütleden elde edilmektedir (Um vd., 2018). Ancak bu işlemler ya çok maliyetli ya da nispeten daha az çevre dostudur. Bu nedenle, atık biyokütlenin değerlendirilmesi için daha sürdürülebilir çözümlere ihtiyaç vardır. Biyoyakıt üretimi için biyoproses uygulamasındaki son gelişmeler, lignoselülozik atık kaynaklarının kullanılması için umut verici yaklaşımlardan bir tanesidir (Maurya vd., 2015). Bunun için en önemli araştırma yaklaşımı, biyokütle atığının çevresel etkisini ve işletme maliyetini değerlendirmek için yaşam döngüsü analizidir (LCA). Bu yaklaşım, biyokütle atığının arazi kullanımı, hammadde nakliye maliyeti, biyoürün geliştirme süreci, biyokütle atığının işlenmesi vb. dahil olmak üzere yaşam döngüsü boyunca değerlendirilen olası faydalarını belirlemektedir (Stoglehner ve Narodslawsky, 2009).

Entegre biyoişleme, atık biyokütlenin ön arıtımı, enzim üretimi ve biyoürünlerin fermantasyonunun bir reaktörde karışımını sağlamakta sonuç olarak enerji tüketimin yanı sıra maliyeti de önemli ölçüde azaltmaktadır (Born vd., 2014). Bu nedenle, biyoproses açısından kapsamlı bir çalışma mevcut bilgi boşluğunu gidermek için çok önemlidir. Bu çalışmada, biyokütleninbiyoişlenmesi konusunda kaydedilen son gelişmeler ele alınmıştır.

2. Küresel biyokütle atığı üretimi

Biyokütle atıklarının talebini ve biyoenerji arzını değerlendirmek için son dönemde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Genel olarak, dünyanın biyoenerji potansiyeli 2050 yılına kadar dünya çapındaki enerji gereksinimlerini karşılamak için yeterli görünmektedir. Bununla birlikte enerji sektöründeki bu tür hareketler, ekipman tesisi, altyapı ve araştırma geliştirmeye yönelik geniş yatırımlar gerektirmektedir (Reid vd., 2020). Atık biyokütle, ormancılık ve tarımda karakterize edilmektedir. Ormancılıkta kullanılan biyokütle yakacak odun ve endüstriyel odun (kağıt ve mobilya yapımı için) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu kaynakların kullanımında biyokütle; gıda, ağaç ürünleri,hayvan yemi veya ürünleri ve işlenmiş biyokütle gibi farklı faydalı ürünlere dönüştürülmesi ve yakıt olarak kullanılması esas alınarak değerlendirilmektedir. Tarımsal atık biyokütlesi, kalıntı ve ekinler (yem, gıda, malzeme ve enerji) ayrıca süt ürünleri gibi hayvancılık malzemeleri olarak sınıflandırılabilmektedir. Bu tür biyokütle atıkları, dünya çapında yenilenebilir organik kaynak olarak değerlendirilmektedir (Born vd., 2014).

3. Biyokütle atıklarının değerlendirilmesi için biyoişleme teknikleri

Biyoproses genellikle selüloz ve hemiselüloz üreten monomerik şekerlerin hidrolizi için selülolitik ve hemiselülozik mikroorganizmaları içermektedir. Bu mikroorganizmalar tarafından salgılanan enzimler indirgeyici şekerler üretebilir veya saf enzimler de önceden işlenmiş biyokütleyi fermente edilebilir ürünlere indirgemek için kullanılabilmektedir (Masran vd., 2016). Bu ürünlerin daha fazla fermantasyonu, çeşitli organik asitler, enzimler, asetat, laktat vb.biyoürünler ve metan, hidrojen, etanol vb. ürünlerdir.

Biyolojik ön arıtma, çeşitli biyokütle parçalayıcı enzimler üreten bir dizi bakteri türü kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. En uygun bakterinin kullanıldığı biyokütle ön arıtmasını, biyoyakıt üretimi için enzimatik hidroliz ve fermantasyon takip etmektedir. Bakteriyel selülazlar çoğunlukla doğada alkali veya nötr olarak belirlenmiştir ve üç türe ayrılabilmektedir: anaerobik, aerobik ve kayan bakteriler (Sharma vd., 2017). Bakteriyel selülazlarendoenzimlerdir ve hücre duvarında adsorbe edilirler. Endoglukanaz, bakteriyel selülazlar tarafından üretilen birincil enzimlerdir (Morais ve Mizrahi, 2019). Bakteriyel selülazlar hücre içi enzimler olduklarından düşük miktarlarda üretilirler ve ekstrakte edilmeleri, saflaştırılmaları ve kullanımları zordur (Yang vd., 2016).

Mikrobiyal ön arıtma yöntemleri, biyokütleyi parçalamak için doğrudan mikropları kullanırken, enzimatikbiyodönüşüm prosedürleri aynı organizmalardan türetilen saf enzimleri kullanmaktadır (Andlar vd., 2018). Yaygın olarak kullanılan enzimler, hidrolazlardır ve şeker kamışı küspesi, mısır

koçanı, buğday samanı, pirinç samanı ve mısır samanı gibi atık biyokütleyi parçalamak için etkili bir şekilde kullanılmışlardır. Hidrolitik enzimler, günümüzde üretilen endüstriyel enzimlerin % 75'ini oluşturur ve endüstride biyoyakıt, mürekkep giderimi, kağıthamuru, kağıt, yem, gıda ve atık su arıtımında kullanılmaktadır (Kumar ve Chandra, 2020).

4. Biyoproses tabanlı yönetimin sürdürülebilir yönleri

Biyoişlemenin sürdürülebilirliği, sosyoekonomik gereklilikleri yerine getirirken biyoişleme endüstrisinin ve çevrenin dengeli bir şekilde bir arada bulunmasını tanımlamaktadır. Geliştirme kaliteden ödün vermeden mevcut ve gelecekteki ihtiyaçları karşılamalıdır. Öte yandan ekonomik gelişme ile birlikte çevresel ve sosyal koşulların da korunması gerekmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir biyoişleme yönetimi, biyolojik kaynakların özellikle biyoatıkların kullanımını, bu kaynakları maliyet etkin bir şekilde kullanarak meta üretimini ve genel sürecin çevre üzerindeki etkisini içermektedir.

Atık biyokütle, biyoişleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan sürdürülebilir hammaddedir. Bitki ve hayvanlardan gelen her türlü atık malzeme, biyokütle atığı olarak kabul edilmektedir. Bitki biyokütlesi, ısı için doğrudan yakılarak yakıt kaynağı olarak kullanılabilir veya farklı işlemler kullanılarak yenilenebilir yakıtlara dönüştürülebilir. Biyokütleyibiyoişlem için bir kaynak olarak düşünürsek, biyokütlenin bileşimi ve özellikleri ile yönetim maliyetlerini düşürmek kolay bir süreç değildir.

Organik biyokütle atığının, biyoişleme yoluyla katma değerli ürünler için hammadde olarak kullanılma potansiyeli çok yüksek olsa da, genellikle diğer atık kalıntılarıyla birlikte çöplüklerde veya yakma fırınlarında son bulurlar. Bunun nedeni, atıkların kaynak noktasında ayrılması, organik veya biyokütlenin ayrı toplanması, atık oluşumunun en aza indirilmesi ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde yeniden kullanım ve geri dönüşüm mekanizmalarının bulunmaması ile ilgili uygun atık yönetimi politikalarının olmamasıdır (Ferronato vd., 2019).

Katı atıkların yanlış yönetilmesinden kaynaklanan çevresel kirlenme ve kirlilik, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik ile ilgili küresel bir sorundur (Daniel ve Perinaz, 2012). Artan atık üretimi, artan nüfus, kentleşme ve insanların yaşam tarzından kaynaklanmaktadır. Tarımsal-endüstriyel ve evsel atıklar dahil olmak üzere üretilen katı atıklar, evsel katı atık olarak düzenli depolama alanlarında bertaraf edilirler.

Bir yöntem olarak atıkların yakılması hiçbir zaman gaz salımını azaltmaz, aksine iklim değişikliğine katkıda bulunur (Ferronato ve Torretta, 2019). Biyokütle atıklarının yakıt amacıyla yakılması çevreye CO_2 salar ve küresel ısınmaya katkıda bulunur. Evsel atıkların veya çöplerin enerji tesislerinde

yakılması, düzenli depolama alanlarına atık dökülmesinin azalmasına neden olabilir. Ancak yakma işlemi, atıkta bulunan kimyasalları açığa çıkararak çevredeki organizmaların sağlığına daha fazla zarar vermesine neden olarak hava kirliliğini artırır.

4.1. Çevresel etkiyi değerlendiren yaşam döngüsü yaklaşımı

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), bir ürün, süreç veya hizmet ile çevre arasındaki karmaşık etkileşimi değerlendirmek için bir araçtır ve çevre üzerinde oldukça etkilidir. LCA, sürdürülebilir stratejinin önemli bir parçasıdır ve çevreye yönelik mevcut ve gelecekteki tehditleri gözlemlemek için kullanılabilir. Bu nedenle, biyokütle atığının çevre üzerindeki etkisini incelemek için atık biyokütle yönetiminin LCA'sı gereklidir. Atıkları yönetmek için farklı ülkelerde farklı LCA türleri uygulanmıştır.Piroliz, gazlaştırma vb. kullanarak atıktan enerjiye yaklaşım son zamanlarda önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, biyokütle atığından biyoenerjiye dönüşüm, yenilenebilir ve çevre dostu olduğu için potansiyel atık yönetim sistemlerinden biridir. LCA, entegre atık yönetimi yöntemlerine ilişkin eksiksiz bir görünüm sunar (Christensen vd., 2006). Biyoenerji sistemlerinin LCA'sı yardımcı elektrik ve ısı dahilolamk üzere diğer enerji sistemlerinin LCA'sına bağlı olduğu için karmaşık bir süreçtir. Ayrıca tohumlar, tarımsal artıklar, hammadde ve ürünlerin nakliyesi gibi malzemeleri de gerektirir. Bu bileşenlerin her birinin kendi yaşam döngüsü vardır ve dolayısıyla biyoenerjinin LCA'sını karmaşık bir süreç haline getirir. LCA, biyokütlelerin biyoenerji üretimi için kullanılmasıyla ilgili endişeleri analiz etmek için kullanılır. Şekil 1, ilgili alanları ve bunların biyoenerji sistemleri üzerindeki çevresel etkilerini göstermektedir.

Geçtiğimiz on yılda, elektrik, ısı ve ulaşım için fosil yakıtların neden olduğu emisyonları ve çevre sorunlarını azaltmak için biyokütle yenilenemeyen enerji kaynaklarına en iyi alternatif olarak kabul edilmiştir. LCA çalışmaları ise, biyokütlenin yenilenebilir enerji üretimi kaynağı olarak kullanılmasının iklim değişikliği, arazi kullanımı ve tarımsal emisyonlar üzerinde de etki yarattığını ortaya koymuştur. Talaş, ağaç kabuğu, kahve telvesi, kümes hayvanı çöpü, bulamaç kalıntıları vb. atık biyokütlenin yanması karbondioksit ve ısı açığa çıkarmaktadır. Bir sera gazı olan karbondioksit küresel ısınmaya neden olmaktadır. Ayrıca düzenli depolama alanlarında ve tarım arazilerinde üretilen külün bertaraf edilmesi çevre ve insan sağlığı üzerinde zararlı etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle, çevre üzerindeki etkileri en aza indirmek için biyokütlenin verimli bir şekilde kullanımı önem arz etmektedir.

Şekil 1. Biyoenerji sistemi ilgi alanlarının çevresel etkileri (Fritsche vd., 2010).

5. Biyokütle atığının katma değerli ürünlere dönüşümü

Biyokütleden elde edilebilecek biyo-bazlı ürünlerin çeşitliliği oldukça fazladır ve piroliz, hidrotermal işleme, gazlaştırma, anaerobik sindirim gibi çeşitli termal dönüştürme tekniklerinin keşfedilmesine ilham vermektedir (Zaman vd., 2017). Ancak değerli ürünleri sentezlemek için mikrobiyalbiyoteknoloji yoluyla biyokütleninbiyodönüşümü genellikle en yeşil teknik olarak görülmektedir (Dessie vd., 2020). Bunu fermantasyon yoluyla elde etmek için mikrobiyal hücre fabrikalarının özellikle biyolojik öneme sahip belirli katma değerli ürünlerin dönüştürülmesine yönelik uygunluğa ve çok yönlülüğe sahip olması amaçlanmaktadır (Straathof vd., 2019).

Çeşitli büyük ölçekli biyokütle işletmeleri, süksinik asit (buğdaydan türetilen glikoz, nişasta, sorgum ve lignoselülozik şekerden), aspartik asit (şekerden), sitrik asit ve sitrat tuzları (tatlı patates, mısır biyokütlesinden), biyo-polyester (bitki biyokütle atığından), etanol (mısır kabuğu, odun atıkları, tarımsal atıklardan), metanol (katı atıklar, orman atıklarından), şeker ve lignin gibi biyobazlı kimyasalların sentezi için biyokütle kullanmaktadır (Dessie vd., 2020). Lignoselülozikbiyokütle, pişirme için ana ısı kaynağı olarak kullanılabilen ve buna bağlı olarak güç, ısı, biyoyakıtlar ve kömür veya karbon gibi yakıtlar dahil kimyasalların üretimini sübvanse edebilen yenilenebilir kaynaktır (Liu ve Wu, 2016). Bu nedenle, biyokütle dönüşümü sırasında biyobazlı ürünlerin hacim/değer oranı arasında bir denge kurulmalı ve endüstriyel uygulamalar için biyokütle atığının kullanımına daha fazla önem verilmelidir.

Etanol, tüm biyoyakıtlar arasında mısır koçanı, şeker kamışı küspesi, tatlı sorgum biyokütlesi ve diğer karbonhidrat biyokütle kaynakları kullanılarak büyük ölçekli endüstriler tarafından üretilen sonsuz bir yakıttır.

Biyogaz, biyokütle malzemelerinin gazlaştırılmasıyla oluşturulan gazların birleşimidir. CO, H_2, CO_2 ve düşük atom ağırlıklı hidrokarbonlardan örneğin CH_4'ten yapılmıştır. Biyogaz ısıtma amaçlı veya elektrik üretimi için yakıt gazı olarak kullanılabilmektedir.

Sentez gazı, CO ve H_2'nin bir karışımıdır. Sentez gazı, termal olarak daha zorlayıcı bir sıvı yakıt olarak petrolün yerini alabilir. Sentez gazının ateşlenmesiyle güç üretilebilir. Böylece, yenilenebilir bir yakıt kaynağı olarak kullanılabilir veya diğer değerli enerji veren bileşiklerin sentezinde yardımcı olabilir (De Maria vd., 2013). Mikrobiyolojik yaklaşımla hidrolize edilmiş lignoselülozik hammadde kullanılarak biyohidrojen üretimi, hidroliz yöntemi,kaynak ve konsantrasyon, işleme koşulları (sıcaklık, zaman ve pH vb.) gibi çeşitli faktörleri içermektedir (Liu ve Wu, 2016).

Biyoplastikler, esas olarak polihidroksialkanoatlar (PHA'lar) modern plastiğin en yaygın şekilde sentezlenen biyolojik olarak parçalanabilen ve çevre açısından güvenli malzemeleridir. PHA'lar arasında poli-3 hidroksibutirat (PHB), biyo-plastik olarak en iyi potansiyele sahip yaygın olarak üretilen homopolimerdir (Hamieh vd., 2013). Son zamanlarda orman, tarım arazileri, denizcilik, endüstri ve katı atıklar gibi çeşitli yollarla ortaya çıkan atık biyokütle ve kalıntılar uygun PHA üretiminde büyük önem kazanmıştır (Al-Battashi vd., 2019).

6. Sonuç

Atık biyokütlenin kullanılması sadece kirliliğin azaltılmasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda biyobazlı enerji ve kimyasalların üretimi için alternatif bir yol sağlar. Bu nedenle, bilimsel ve endüstriyel topluluklar arasında biyokütle atık kullanımına artan bir ilgi söz konusudur. Buna ek olarak, tarım ve orman biyokütle atıkları yenilenebilir, kolayca bulunabilen ve daha ucuz kaynaklardır. Biyoyakıtların ve kimyasallarının büyük ölçekli üretiminde kullanımlarını ölçeklendirmenin temel faktörleri arasında ekonomik fizibilite, biyodönüşüm teknolojisi, hidroliz metodolojisi ve fermantasyon etkinliği yer almaktadır. Doğrudan mikrobiyal arıtmaya ek olarak, enzimatik arıtma, biyokütle atığını verimli bir şekilde değerlendirmek için önemli bir tekniktir.

KAYNAKLAR

1. Al-Battashi, H.S., Annamalai, N., Sivakumar, N., Al-Bahry, S., Tripathi, B.N., Nguyen, Q. D., Gupta, V.K., 2019. Lignocellulosic biomass (LCB): a potential alternative biorefinery feedstock for polyhydroxyalkanoates production. Rev. Environ Sci Biotechnol. 18, 183–205.
2. Andlar, M., Rezi´c, T., Marđetko, N., Kracher, D., Ludwig, R., ˇSantek, B., 2018. Lignocellulose degradation: an overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation. Eng. Life Sci. 18 (11), 768–778.
3. Born, G.J., van den Minnen, J.G., van Olivier, J.G.J., Ros, J.P.M., 2014. Integrated analysis of global biomass flows in search of the sustainable potential for bioenergy production. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. November 2014 PBL publication number: 1509.
4. Christensen, T.H., Hansen, T.L., Schmidt, S., 2006. Environmental modelling of use of treated organic waste on agricultural land: a comparison of existing models for life cycle assessment of waste systems. Waste Manage Res. 24, 141–152.
5. Daniel, H., Perinaz, B.-T., 2012. What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management. Urban development series;knowledge papers no. 15. World Bank, Washington, DC. c World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10 986/17388 License: CC BY 3.0 IGO." accessed on 18/9/2020.
6. de María, R., Díaz, I., Rodríguez, M., S´aiz, A., 2013. Industrial methanol from syngas: kinetic study and process simulation. Int J Chem Reac Eng. 11, 469–477.
7. Dessie, W., Luo, X., Wang, M., et al., 2020. Current advances on waste biomass transformation into value-added products. Appl. Microbiol. Biotechnol. 104, 4757–4770.
8. Ferronato, N., Rada, E.C., Gorritty Portillo, M.A., Cioca, L.I., Ragazzi, M., Torretta, V., 2019. Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. J. Environ. Manag. 230, 366–378.
9. Ferronato, N., Torretta, V., 2019. Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues Int. J. Environ. Res. Public Health 16, 1060.
10. Fritsche, U.R., Hennenberg, K.J., Wiegeman, K., Herrera, R., Franke, B., K¨oppen, S., Reinhardt, G., Dornburg, V., Faaij, A., Smeets, E., 2010. Bioenergy Environmental Impact Analysis (BIAS): Analytical Framework. Environment and Natural Resources Management Series 46. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
11. Hamieh, A., Olama, Z., Holail, H., 2013. Microbial production of polyhydroxybutyrate, a biodegradable plastic using agroindustrial waste products. Glob. Adv. Res. J. Microbiol. 2, 54–64.

12. Hu, J., Xue, Y., Guo, H., Gao, M.T., Li, J., Zhang, S., Tsang, Y.F., 2017. Design and composition of synthetic fungal-bacterial microbial consortia that improve lignocellulolytic enzyme activity. Bioresour. Technol. 227, 247–255.
13. Kumar, A., Chandra, R., 2020. Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. Heliyon 6 (2), e03170.
14. Li, X., Zheng, Y., 2017. Lignin-enzyme interaction: Mechanism, mitigation approach, modeling, and research prospects. Biotechnol Adv. 35, 466–489.
15. Liu, C.-M., Wu, S.-Y., 2016. From biomass waste to biofuels and biomaterial building blocks. Renew. Energy 96, 1056–1062.
16. Maurya, D.P., Singla, A., Negi, S., 2015. An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. 3. Biotech. 5 (5), 597–609.
17. Masran, R., Zanirun, Z., Bahrin, E.K., Ibrahim, M.F., Yee, P.L., Abd-Aziz, S., 2016. Harnessing the potential of ligninolytic enzymes for lignocellulosic biomass pretreatment. Appl. Microbiol. Biotechnol. 100 (12), 5231–5246.
18. Morais, S., Mizrahi, I., 2019. Islands in the stream: from individual to communal fiber degradation in the rumen ecosystem. FEMS Microbiol. Rev., fuz007, 43, 362-379.
19. Patel, A.K., Choi, Y.Y., Sim, S.J., 2020. Emerging prospects of mixotrophic microalgae: Way forward to sustainable bioprocess for environmental remediation and costeffective biofuels. Bioresour. Technol. 300, 122741.
20. Reid, W.V., Ali, M.K., Field, C.B., 2020. The future of bioenergy. Glob. Change Biol. 26 (1), 274–286.
21. Sharma, H.K., Xu, C., Qin, W., 2019. Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: An Overview. Waste Biomass Valor 10, 235–251.
22. Stoeglehner, G., Narodoslawsky, M., 2009. How sustainable are biofuels? Answers and further questions arising froman ecological footprint perspective. Bioresour. Technol. 100 (16), 3825–3830.
23. Straathof, A.J.J., Wahl, S.A., Benjamin, K.R., Takors, R., Wierckx, N., Noorman, H.J., 2019. Grand research challenges for sustainable industrial biotechnology. Trends Biotechnol. 37 (10), 1042–1050.
24. Um, J.H., Ahn, C.Y., Kim, J., Jeong, M., Sung, Y.E., Cho, Y.-H., Kim, S.S., Yoon, W.S., 2018. From grass to battery anode: agricultural biomass hemp-derived carbon for lithium storage. RSC Adv. 8, 32231–32240.
25. Usmani, Z., Sharma, M., Karpichev, Y., Pandey, A., Kuhad, R.C., Bhat, R., Punia, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Gupta, V.K., 2020b. Advancement in valorization technologies to improve utilization of bio-

based waste in bioeconomy context. Renew. Sustain. Energy Rev. 131, 109965
26. Yang, S., Fei, Q., Zhang, Y., Contreras, L.M., Utturkar, S.M., Brown, S.D., Himmel, M.E., Zhang, M., 2016. *Zymomonas mobilis* as a model system for production of biofuels and biochemicals. Microb Biotechnol. 9 (6), 699–717.
27. Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marliana, E., Rafique, R. F., Johan, R. B., 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. Pyrolysis.
28. Zhao, X., Liu, W., Deng, Y., Zhu, J.Y., 2017. Low-temperature microbial and direct conversion of lignocellulosic biomass to electricity: Advances and challenges. Renew. Sustain. Energy Rev. 71, 268–282.

YÜKSEK BİNALARDA TAŞIYICI SİSTEMLER

Dr. Öğr. Üyesi Gülhan İNCE

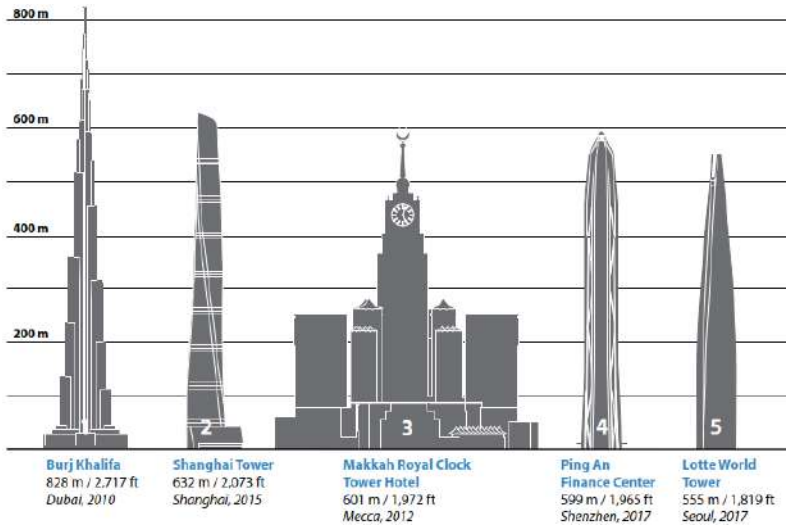
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü. gulhanince@mehmetakif.edu.tr
ORCID ID: 0000-0003-4887-2900

1. GİRİŞ

Dünya çapında yaşanan hızlı şehirleşmeye paralel olarak yüksek bina inşaatları hızla artmaktadır. Dünya nüfusundaki artış, arsa maliyetleri, asansörün icadı, teknolojik gelişmeler, hesap ve sismik tasarım yöntemlerinin gelişimi gibi pek çok etken, yapıların dikey olarak yükselmesinde önemli yer tutmuştur. Yüksek binaların temel özelliği dikey olmaları ve yüksekliklerdir. Ancak, yüksek yapının ne tür yapılar olduğu ve yükseklik sınırlarının ne olduğu konusunda farklı tanımlamalar bulunmaktadır. Farklı disiplinler, farklı şekilde tanımlamalar yapabilmektedir. Yüksek Yapılar Konseyi (The Council on Tall Buildings and Urban Habitat) CTBUH (2022), yüksek yapı tanımı için üç kriter esas almıştır. Bunlar:

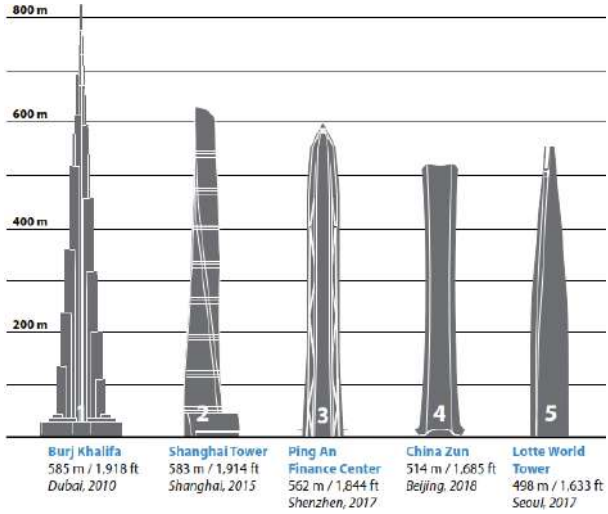
1.Mimari üst yükseklik:Zeminden, kuleler dahil, ancak antenler, tabelalar, bayrak direkleri veya diğer işlevsel-teknik ekipmanlar hariç binanın mimari tepesine kadar olan yüksekliktir.

Bu ölçüm en yaygınkullanılandır ve CTBUH'un "Dünyanın En Yüksek Binaları" sıralamasını tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu yükseklik sınırına göre dünyanın en yüksek binaları sıralamasıŞekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Mimari üst yükseklik sınırına göre dünyanın en yüksek binaları sıralaması (CTBUH, 2022)

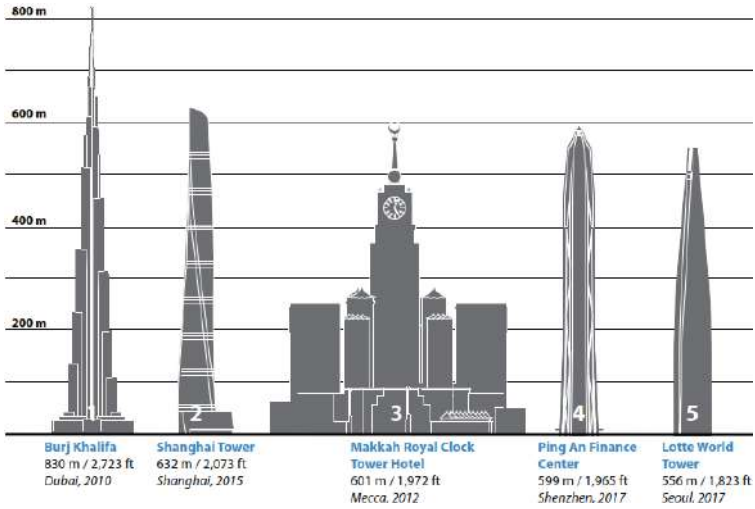
2.Binanın kullanılan en yüksek katınagöre yükseklik:Zeminden bina içindeki kullanılabilir en yüksek kat döşemesine kadar olan yükseklikliktir.Bu yükseklik sınırına göre dünyanın en yüksek binaları sıralamasıŞekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Binanın kullanılan en yüksek katyükseklik sınırına göre dünyanın en yüksek binaları sıralaması (CTBUH, 2022)

3.Binanın en uç noktasına göre yükseklik: Binanın en yüksek elemanının (anten direği, bayrak direği vb.) malzemesine veya işlevine bakılmaksızın zeminden binanın en yüksek noktasına kadar olan yüksekliktir. Bu yükseklik sınırına göre dünyanın en yüksek binaları sıralaması Şekil 3'de görülmektedir.

Her üç kriter için dünyanın en yüksek birinci ve ikinci binası sırasıyla Burj Khalifa (mimari üst yükseklik 830 m, Dubai, 2010) ve Shanghai Tower mimari üst yükseklik 632 m, Shanghai, 2015) olurken, üçüncü ve sonrası binalar yükseklik kriterlerine göre farklı sıralarda yer almaktadır.



Şekil 3. Binanın en yüksek uç nokta sınırına göre dünyanın en yüksek binaları sıralaması (CTBUH, 2022)

Yüksek Yapılar Konseyi (CTBUH), binaları "yüksek", "süper yüksek" ve "mega yüksek" binaları şeklinde tanımlamıştır. Yüksekliği 300 m'den az olan binalar "yüksek", yüksekliği 300 m ile 600 m arasında olan binalar "süper yüksek" ve 600 m'den yüksek olan binalar ise "mega yüksek" binalar sınıfına girmektedir (CTBUH, 2022).

İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği (2008) ise, yüksek binaları, "tamamı yer altında olan ve binayı tümü ile kuşatan yüksek yatay rijitlikli çevre perdelerine sahip bodrum katları hariç olmak üzere, en düşük yer seviyesinden itibaren yüksekliği en az 60 metre olan binalardır" şeklinde tanımlamıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY (2018)'de ise bina ve bölge özelliklerine de bağlı olarak 70 metreden daha yüksek binaları yüksek sınıfına girmektedir.

2. YÜKSEK BİNALARDA TAŞIYICI SİSTEMLER

Taşıyıcı sistem seçimi, bina projelendirmesinin ana parametresidir. Bina yüksekliği arttıkça taşıyıcı sisteme etkiyecek olan hem düşey yükler hem de yanal yükler artar. Az katlı binalarda iyi tasarlanmış rijit düşey taşıyıcı elemanlar, rijit diyaframlar veya çapraz sistemler ile güvenli taşıyıcı sistemler oluşturulabilmektedir. Yüksek yapıların tasarımını, az katlı yapılardan ayıran en önemli etki düşey ve yatay yükler yapı yüksekliği ile doğru orantılı değil, yüksekliğin kuvveti şeklinde artış göstermesidir (Şenoğlu, 2016).

Düşeyyüklerin temele ve zemine aktarılması için bir sistem tasarımı genellikle daha basittir. Yapıya yanal yüklerin etkimesi ile sistemde oluşacak ek kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri detaylı hesaplar gerektirir.

Deprem ve rüzgâr etkileri bina yüksekliğini artmasıyla artar ve büyük kesme kuvvetlerine, momentlere ve yer değiştirmelere neden olur. Bu iç kuvvetler çekirdek, kolon gibi ana taşıyıcı elemanlar boyutlandırılmasında etkili olur. Momentler nedeniyle düşey elemanlarda oluşacak eksenel hareket ve eğilme davranışı arasındaki paylaşımın oranı düşey elamanları birbirine bağlayan elemanların kesme rijitliği ile ilgilidir. Daha rijit bağlayıcı elemanların kullanılması düşey elemanlarda eksenel yüklerin daha büyük oranda taşınmasını sağlayarak daha rijit ve daha etkin bir yapı davranışına katkı sağlar. Bu bağlamda yapıda düşey elemanlar arasında bağlantıyı sağlayan döşemeler, bağ kirişleri, kat diyaframları ve çaprazların tasarımı önem arz eder. Yüksek yapıların herhangi bir katına etkiyen yatay kesme kuvvetlerine karşı dayanımı, düşey elemanların kesme rijitliği ve çapraz elemanların eksenel rijitliğinin yatay bileşeni ile sağlanır(Şancı, 2021).

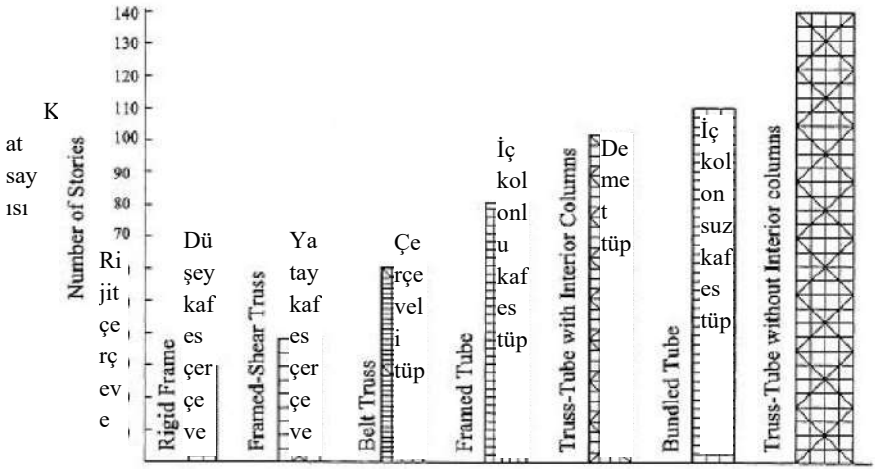
Çok katlı yüksek bir yapının taşıyıcı sistemi eksenel basınç ve eğilme etkisindeki alttan ankastre bir düşey konsol kirişe benzetilebilir (Özgen ve Sev, 2000).

Göreli kat ötelemelerinin belli bir sınırın ötesine geçmesi, yapısal olmayan elemanlarda hasara ve kullanılabilirlik durumunun bozulmasına neden olmaktadır (Şenoğlu, 2016).

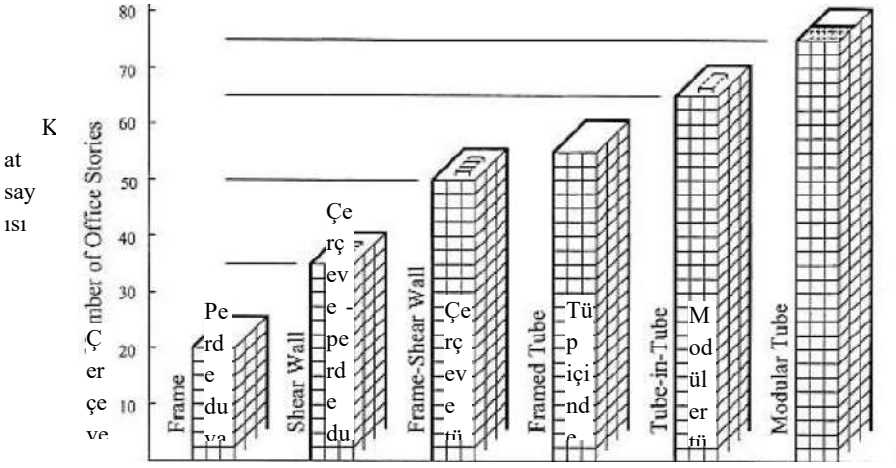
2.1. Yüksek Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Sistemlerin Sınıflandırılması

Yüksek yapılarda kullanılan taşıyıcı sistemler, düşey yüklere, yatay yüklere ve taşıyıcı sistem malzemelerine göre sınıflandırılabilmektedir. Yapısal verimlilik ve minimum malzeme tüketimi için, yüksek binalar, artan yükseklik koşulları için geleneksel rijit çerçeve sisteminin ötesinde yükseltilmiş yapısal sistemler gerektirir. Yapı yaklaşık on kattan daha uzun hale geldikçe, yanal kuvvetlerden kaynaklanan yanal salınım artmaya başlar ve bu nedenle binanın mukavemetinden ziyade yanal rijitliği tasarımı kontrol eder (Ali ve Kodmany,2022).

1969'da Fazlur Khan, yüksek binalar için yapısal sistemleri, "Yapısal Sistemler için Yükseklikler" diyagramları sistemleri yüksekliklerine göre sınıflandırmıştır.Daha sonra bu diyagramları hem çelik için (Şekil 4) hem de betonarme için(Şekil 5) geliştirmiştir (Ali ve Moon, 2007).



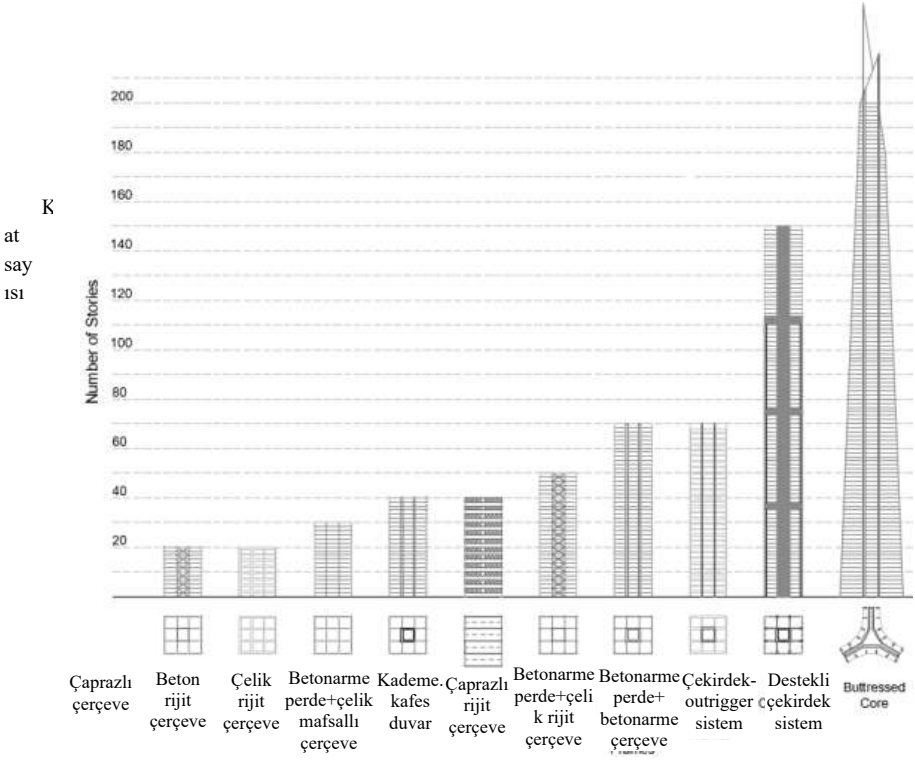
Şekil 4. Çelik yüksek bina taşıyıcı sistemlerinin sınıflandırılması (Ali ve Moon, 2007)



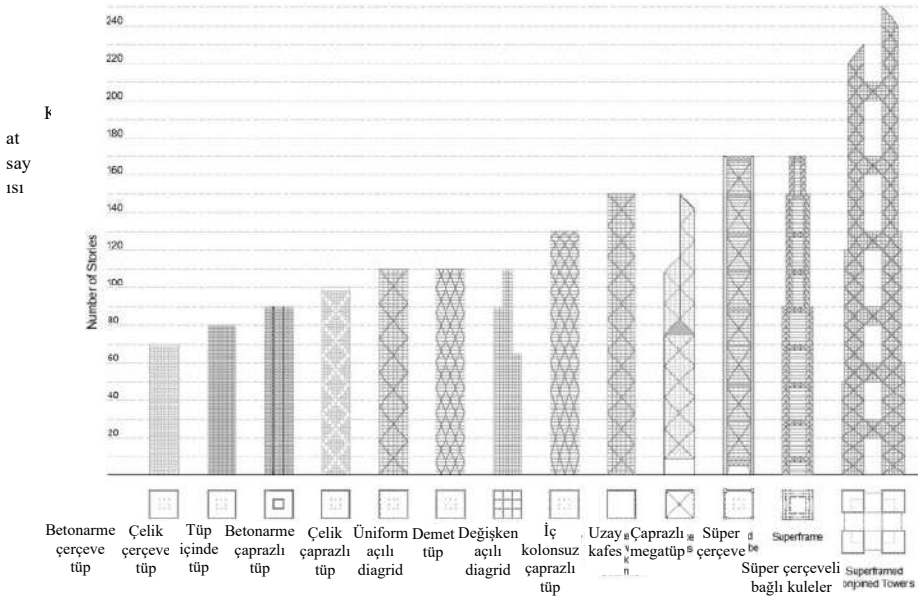
Şekil 5. Betonarme yüksek bina taşıyıcı sistemlerinin sınıflandırılması (Ali ve Moon, 2007)

Fazlur Khan'nın yaptığı bu sınıflandırmanın ardındanMir M. Ali ve Kyoung Sun Moon 2000'li yılların başındataşıyıcı sistemleri yanal yük dayanımlı sistemlerin, binanın iç kısmında mı yoksa çevresinde mi yer aldığı göz önünde bulundurarak, iç ve dış yapılar olarak geniş bir şekilde sınıflandırmışlardır (Eren,2019). Ali ve Moon (2018), yaptıkları sınıflandırmayı daha sonra genişletmişlerdir. Buna göre, Yüksek binaların yapısal sistemleri iki geniş kategoriye ayrılabilir: iç yapılar ve dış yapılar (Şekil 6, Şekil 7). Bu sınıflandırma, yanal yüke dayanıklı sistemin bileşenlerinin bina üzerindeki

dağılımına dayanmaktadır. Yanal yüke dayanıklı sistemin büyük bir kısmı binanın iç kısmında yer alıyorsa, sistem iç yapı olarak sınıflandırılır. Benzer şekilde, yanal yüke dayanıklı sistemin büyük bir kısmı bina çevresinde yer alıyorsa, sistem dış yapı olarak sınıflandırılır. Bununla birlikte, herhangi bir iç yapının bina çevresinde yanal yüke dayanıklı sistemin bazı küçük bileşenlerine sahip olabileceği ve herhangi bir dış yapının binanın iç kısmında bazı küçük bileşenlere sahip olabilirler. Diyagramlarda gösterilen yüksekliklerin amacı, yüksek binalar için yapısal sistemlerin verimli ve uygulanabilir yükseklik sınırlarını göstermektir. Bu yüksekliklerden daha yüksek binalar inşa edilebilmektedir.



Şekil 6.İç yapılar (Ali ve Moon, 2018)



Şekil 7. Dış yapılar (Ali ve Moon, 2018)

2.2. Yapısal Sistemler

2.2.1. İç yapılar

İç taşıyıcı sistem kategorisindeki iki temel yanal yük dayanım sistemi türü moment dayanımlı çerçeveler ve kesme makasları/kesme duvarlardır.

Bu sistemler genellikle iki ana ortogonal yönde düzlemsel sistemler olarak düzenlenir ve etkileşim içinde oldukları bir sistem ile birlikte birleşik olarak kullanılabilir. Bu kategorideki bir diğer önemli sistem ise çekirdek destekli outrigger yapısıdır (Ali ve Moon, 2007).

Aşağıda iç taşıyıcı sistemler kısaca tanıtılmıştır.

2.2.1.1. Rijit çerçeveler

Çelik rijit çerçeve sistemler için etkili yükseklik sınırı 30m'dir. Bu sistemler kat planlamasında esneklik sağlaması ve hızlı inşaat yapımı ile avantaj sağlar. Dezavantajı ise moment birleşimleri ve yangın yalıtımının pahalı olmasıdır. Detroit'de bulunan "One Woodward Avenue (28 katlı, 131 m)" binasında rijit çerçeve sistem kullanılmıştır.

Betonarme rijit çerçeveler için etkili yükseklik sınırı 20m'dir. Bu sistemler kat planlamasında esneklik sağlaması ve betonun kolayca kalıplanabilmesi ile avantaj sağlarken, kalıp maliyeti ve yavaş inşaat hızı dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Betonarme rijit çerçeve sistem olarak, 1903 yılında Cincinnati Ohio'de inşaa edilen "Ingalls Building" (16 katlı, 65 m) dünyanın ilk

betonarme gökdelenidir. Günümüzde hala kullanılmaktadır. Bu sistem kullanılarak inşa edilmiş çok sayıda bina 20 katın altındadır (Ali ve Moon, 2007; Ali ve Moon, 2018). Bu iki bina Şekil 8'de gösterilmiştir.

Şekil 8. One Woodward Avenue binası (solda) (URL1), Ingalls Building binası (sağda) (URL2)

2.2.1.2 Çaprazlı çerçeveler

Çelik kesme makas sistemleri ile çelik mafsallı çerçevelerin birlikte kullanıldığı sistemler için etkili yükseklik sınırı için 20m'dir. Bu sistemler yanal yüklere kesme makas elemanlarındaki eksenel kuvvetlerle etkili bir şekilde karşı koyar. Çaprazsız rijit çerçevelere kıyasla daha sığ kiriş boyutlarına izin verir. Ancak kesme makaslarındaki diyagonal elemanlar nedeniyle iç planlama için bazı sınırlamalar yani zorluklar ortaya çıkar ve diyagonal elemanların bağlantıları oldukça maliyetlidir. Bu sistemin kullanıldığı çoğu bina 20 katın altındadır.

2.2.1.3. Perde duvar ve mafsallı çerçeveler

Betonarme perde ve çelik mafsallı çerçevelerin bir birlikte kullanıldığı bu sistemler için etkili yükseklik sınırı 40m'dir. Bu sistemler betonarme perde duvarlarla yanal kaymaya karşı etkili bir şekilde karşı koyar. Ancak, perde duvarlar iç planlamada sınırlamalara neden olur. Bu tip sistemlere; 1992 yılında Chicago'da inşa edilen "77 West Wacker Drive" (49 katlı, 204 m) örnek verilebilir (Şekil 9).

Şekil 9. 77 West Wacker Drive binası (URL3)

2.2.1.4. Kademeli kafes duvar

Sistem, binanın tüm genişliğine yayılan kat derinliğindeki kafes kirişlerden oluşur ve tipik olarak belirli bir katta düzenli aralıklarla yerleştirilir. Bu kafes kirişler, düşeyde kademeli bir şekilde düzenlenmiştir. Bitişik katlar ve çevredeki kolonlar tarafından desteklenir. Tipik olarak, zemin üzerine kafes kiriş yerleştirilmez.

Çelik kademeli kafesduvarlar için etkili yükseklik sınırı 40m'dir. Tipik olarak kolonsuz zemin kata sahiptir ve yanal yüklere etkili bir şekilde karşı koyar. Yapımı hızlıdır. Binanın toplam yüksekliğini ve dolayısıyla birim çelik maliyetini azaltır. Kat yüksekliğindeki kafes kirişlerin (duvar) olması nedeniyle iç planlamada önemli sınırlamalar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu sistemler uzun doğrultuda zayıftır. Bu sistemin kullanıldığı Las Vegas'ta bulunan "Planet Hollywood Las Vegas"39 katlı ve 119 m'dir (Şekil 10) (Ali ve Moon, 2007).

Şekil 10. Planet Hollywood Las Vegas binası (URL4)

2.2.1.5. Perde duvar (kesme kafes)- çerçeve etkileşimli sistemler

İkiye ayrılır:

1. Çaprazlı rijit çerçeve: Sistem çelik kesme makasları+ çelik rijit çerçeve sistemler şeklindedir. Bu sistemler için etkili yükseklik sınırı 50m'dir. Sistem kesme makası- çerçeve etkileşimiile yanal yüklere etkili bir şekilde karşı koyar. Bu sistemlerde perde makaslar nedeniyle iç planlamalar yapılırken bazı sınırlamalar ortaya çıkabilir. Tokyo'da bulunan "Sanwa Bank" binası (25 katlı, 100 m) ve Osaka'da bulunan "Osaka World Trade Center" (55 katlı, 256 m) bu sistemlere örnektir.

2. Perde duvar / rijit çerçeve:Sistem, betonarme veya kompozit perde duvar/çekirdek + rijit çelik çerçeve sistemler veya betonarme perde duvar/çekirdek + betonarme çerçeve sistemler şeklindedir. Bu sistemler için etkili yükseklik sınırı çelik 70m'dir. Perde duvar-çerçeve etkileşimi ile yanal yüklere etkili bir şekilde karşı koyar. Ancak, perde duvarlar nedeniyle iç planlama için birtakım sınırlamalar ortaya çıkar.

Houston'da bulunan "First City Tower" (47 katlı, 202 m) Betonarme veya kompozit perde duvar + rijit çelik çerçeve sistemlere, Chicago'da bulunan "311 South Wacker Drive" (65 katlı, 293 m) binası ise betonarme perde duvar + betonarme çerçeve sistemlere örnek verilebilir (Ali ve Moon, 2018).

2.2.1.6. Çekirdek – Outriggerlar

Bu yapısal sistem, yanal yükten kaynaklanan kaymayı etkin bir şekilde kontrol etmek için yaygın bir şekilde kullanılır, böylece rüzgar veya depremden

kaynaklanan küçük veya orta yanal yük sırasında yapısal ve yapısal olmayan hasar riski en aza indirilir. Outrigger, dış kolonları ve merkezi çekirdeği birleştiren sert bir kol görevi görür. Merkezi çekirdekte oluşan yanal yük, outriggerlar aracılığıyla çevre kolonlarına aktarılır ve devrilme momenti azaltılır(Gore ve Mhatre,2018).

1. Yatay kafes veya yatay duvarlı (çok az outrigger)

Sistem, beton, çelik veya kompozit çekirdek+outrigger (veya çok az outrigger) + yatay kafes veya duvar + çevre kolonları şeklinde düzenlenir. Etkili yükseklik sınırı 80m'dir. Sistem, yatay kafes veya yatay duvarlar ve outriggerlerlebirlikte çekirdeğe bağlanan çevre kolonları ile devrilme momentlerine etkili bir karşı koyar. Melbourne'de bulunan "140 William Street" (41katlı,153 m) bu sistemin kullanıldığı binalardandır.

2. Megakolonlu (yatay kafesli/duvarlı veya yatay kafes/duvar olmadan)

Sistem, beton, çelik veya kompozit çekirdek+outrigger+yatay kafes veya duvar+ çevre mega kolonları şeklinde düzenlenir. Etkili yükseklik sınırı 150m'dir. Çekirdeğe outriggerlarla bağlanan çevre megakolonları sayesinde sistem devrilme momentlerine etkili bir şekilde karşı koyar. Mimara, benzer yükseklikteki tüp tipi yapılara kıyasla, daha açık bir cephe tasarlama konusunda esneklik sunar. Shanghai'da bulunan Şekil 11'deki Jin Mao Tower binası (88 katlı, 421 m) bu tip taşıyıcı sisteme sahiptir(Ali ve Moon, 2018).

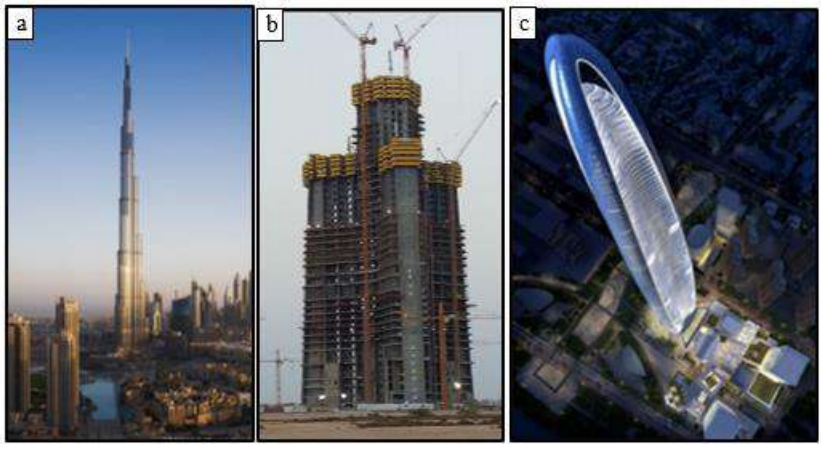
Şekil 11. Jin Mao Tower binası (URL5)

2.2.1.7. Destekli çekirdekler

Sistem, betonarme çekirdek + çekirdekten uzanan ve çekirdeği destekleyen perde duvarlar (+Sistemi daha da güçlendirmek için kanat duvarları ve/veya outriggerlar) şeklinde kurulur.

Etkili yükseklik sınırı 200m'dir. Yapısal verimliliği korumak için, yükseklikleri 1000 m'ye yakın veya daha yüksek olan aşırı yüksek binalarda makul en-boy oranlarını korumak önemlidir. Bu nedenle, yükseklik arttıkça, binanın genişliği artar ve bu durum çok derin iç mekana neden olur. Bu durum, özellikle de doğal gün ışığının çevreye uzak olması nedeniyle, kullanıcılar için rahatsız edici olabilir. Bu sorunu çözmek için, bina planları birden fazla kanada sahip olacak şekilde yapılandırılabilir.

Bu konfigürasyondaki yüksek binalar tipik olarak, stabil sistemi temsil eden bir tripod gibi üç kanata sahiptir(Ali ve Moon, 2018). Binanın kanat boşluklarına uzatılan beton çekirdek perde duvarlar, Burj Khalifa (163 katlı, 828 m) ve yapım aşamasında olana Jeddah Tower'da(167 katlı, 1000+ m) olduğu gibi bunlara dik olan ek perde duvarlar veya Wuhan Greenland Center'da(126 katlı, 636m)olduğu gibi payanda sistemleri ile daha da güçlendirilmiş sistemlerdir. Bu yapılar Şekil 12'de gösterilmiştir.(Fu vd., 2012; Weismantle,2018).



Şekil 12.(a) Burj Khalifa (URL6), (b) Jeddah Tower (URL7), (c) Wuhan Greenland Center (URL8)

2.2.2. Dış yapılar

Yüksek binalarda dış cepheler, diğer bina türlerine kıyasla daha fazla yapısal öneme sahiptir, çünkü bu binalar çok yüksektir ve cepheler yanal kuvvetlere, özellikle de rüzgar yüklerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yanal yüklere

karşı dirençlerini artırmak için yüksek binaların çevresinde mümkün olduğunca fazla yanal yük dayanımlı sistem bileşenlerinin yoğunlaştırılması istenir.

En tipik dış yapılardan biri, yanal yüklere dayanım için tüm bina çevresini kullanan üç boyutlu bir yapısal sistem olarak tanımlanabilen tüp yapılardır. Diğer bir dış sistem; diagrid yapılardır. Diagrid yapılar yapısal verimlilikleriyle, tüp yapıların farklı bir versiyonu olarak ve yeni bir estetik tarz olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2.2.1. Çerçeve tüpler

Çerçeve tüp sistemlerde etkili yükseklik sınırı çelik için 80 m, betonarme için 70m'dir. Tüp çerçevelerin avantajı, bina çevresine yerleştirilen yanal yük taşıyıcı sistemleri ile zeminden yukarı doğru uzanan içi boş bir tüp gibi davranış göstererek yanal yükleri etkin bir şekilde karşılamasıdır. İç mekan planlaması ile etkileşimi en az seviyede olması, iç mekan planlaması bakımından önemli bir avantaj sağlar. Dezavantajı ise kayma gecikmesi tübüler davranışı etkili bir şekilde engeller. Ayrıca dar kolon aralıkları da görüş için kısıtlayıcı olmaktadır. Chicago'da bulunan "Aon Center" (83 katlı 346 m) binası çelik çerçeve tüp sistem için, ve Water Tower Place (Chicago, 74 katlı, 262 m) binası ise betonarme çerçeve tüp sistem için örnek binalardır (Ali ve Moon, 2018).

2.2.2.2. Çaprazlı tüpler

Çaprazlı tüpler 3 gruba ayrılır:

1. İç kolonlu sistemler:

İç kolonlu çaprazlı tüp sistemlerde etkili yükseklik sınırı çelik için 110m, betonarme için 100m'dir. Bu tip tüp sistemin avantajı; çapraz tüp elemanlarındaki eksenel kuvvetlerle yanal yüklere etkili bir şekilde karşı koyması, çerçeveli tüplere kıyasla daha geniş kolon aralığına sahip olması ve kayma gecikmesi etkisinin azalmasıdır. Dezavantajı ise kolon aralıklarının darlığı ve görüşü engellemesidir. Dallas'ta yer alan "First International Building" (56 katlı, 216 m) iç kolonlu çelik çaprazlı tüp sistem, New York'taki "780 Third Avenue"(49 katlı, 174 m) binası ise iç kolonlu beton çaprazlı tüp sistem ile inşa edilmiştir.

2. İç kolonsuz çaprazlı tüp sistemler:

İç kolonsuz çaprazlı tüp sistemler, iç kolonlara sahip geleneksel çaprazlı tüp sistemlerin bir uzantısıdır. Bu sistemde, çevre çaprazlı tüp sistem sadece yanal değil aynı zamanda tüm düşey yükleri de taşır. Rüzgar tarafında basınç uygulayarak yukarı kaldırma kuvvetlerini azaltır ve bina üzerindeki devrilme

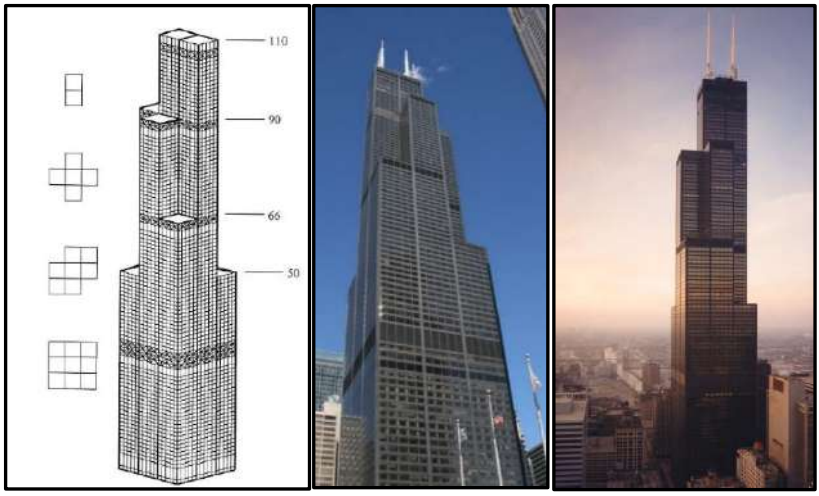
etkisini azaltır. Bu sistemlerde etkili yükseklik sınırı çelik veya kompozit için 150 m'dir. Bu tip tüp sistemin avantajı, indirgenmiş kaldırma kuvvetleri nedeniyle iç kolonlu konvansiyonel çaprazlı tüp sistemlere göre daha yüksek yapılabilmesidir. Dezavantajı ise tüm bina genişliğine yayılması gereken çok uzun açıklıklı döşemeler gerektirmesidir.

3. Çaprazlı megatüp:

Çaprazlı mega tüp sistemler esas olarak köşe mega kolonlarından ve bunlar arasındaki büyük diyagonal çaprazlardan oluşur. Çaprazlı megatüp sistemlerde etkili yükseklik sınırı kompozit için 170 m'dir. Bu tip tüp sistemin köşe mega kolonları, geleneksel çaprazlı tüp sistemlere göre devrilme momentine karşı daha etkilidir. Çaprazların görüşü engellemesi ise dezavantaj olarak sayılabilir. Bu sistemin örnek bir bina Tianjin'de bulunan "Goldin Finance 117" binası (128 katlı, 597 m)'dır (Ali ve Moon, 2018).

2.2.2.3. Demet tüpler

Çok yüksek yapılar için tek bir çerçeveli tüp yeterli gelmez, çünkü bina genişliğinin, makul bir yükseklik/genişlik oranını sağlamak için, büyük olması gerekir. Yapı ne kadar geniş olursa kayma gecikmesi özelliği artar ve dolayısıyla sistemin verimliliği önemli ölçüde azalır. Demet tüp sistemler, bu sorunu çözmek için birkaç tek tüp sistemin bir araya getirilmesi ile ortaya çıkmıştır. İstenilirse tüplerden bazıları farklı seviyelerde bırakılabilir. Demet tüp sistemle, tek tüp sistemlerle karşılaştırıldığında kolonlar arası daha fazla açıklığa ve sığ çevre kirişlerine sahip olmasından dolayı daha geniş pencere açıklıklarını imkan verir.Chicago'da bulunan bir çelik yapı olan Şekil 13'deki Willis Kulesi- Sears Tower(110 kat, 442 m) modüler tüp sistem ile yapılmış bir yapıdır. Dokuz adet tüpün demet halinde birbirlerine bağlanması ile oluşmuştur(Eren, 2019; Ali ve Moon, 2018).



Şekil 13. Willis Kulesi- Sears Tower (URL9)

2.2.2.4. Diagrid sitemler

Diagrid yapı, modifiye edilmiş bir çaprazlı tüp sistemidir ve son zamanlarda popülerlik kazanmıştır. Çok rijit bir sistem olan çaprazlı tüpte, çevre kolonları mevcuttur ve büyük çaprazlar da kullanılır. Ancak diyagonal yapılarda, dış kısımdaki birçok hafif diyagonal eleman, kolonların ortadan kaldırıldığı düğüm noktalarında çaprazlanarak kafes benzeri bir görünüm oluşturur. Dış sistem etkin bir şekilde bir kabuk gibi davranarak önemli ölçüde bir düzlem içi rijitlik oluşturur ve yüksek binanın katı bir tüp gibi davranmasını sağlar (Ali ve Al-Kodmany,2022).

1. Uniform açılı diagrid sistemler:

Uniform açılı diagrid sistemlerde etkili yükseklik sınırı çelik için 100 m, betonarme için 80 m ve kompozit için 110 m'dir. Bu sistem, diagrid elemanlardaki eksenel kuvvetlerle yanal yüklere etkili bir şekilde karşı koyar. Ancak, çelik sistemler için pekçok diyagonal eleman ve karmaşık düğüm noktası detayı, betonarme sistem için ise pahalı kalıp maliyeti dezavantaj olmaktadır. Londra 'da bulunan çelik "30 St. Mary Axe" (41 kat, 180 m) binası, kompozit "Guangzhou International Finance Center" (103 katlı, 439 m) binası ve Dubai'de bulunan betonarme "O-14 Building" (24 katlı, 106 m) binası üniform açılı diagrid sistemlerin kullanıldığı binalardır.

2. Değişken açılı diagrid sistemler:

Değişken açılı diagrid sistemlerde etkili yükseklik sınırı çelik veya kompozit için 130 m'dir. Bu sistemler, narin binalarda, yanal yükleri düzgün açılı diagrid

sistemlere göre daha etkin şekilde taşırlar. Ancak, düzgün açılı diagrid sistemlere göre inşası daha maliyetli olabilir. Seul'daki "Lotte Super Tower"(Seoul, 112 stories, 555 m) binası (Şekil 14) bu sistemde inşa edilen bir binadır(Ali ve Moon, 2018).

Şekil 14. Lotte Super Tower (URL10)

2.2.2.5. Tüp içindetüp sistem

Tüp içinde tüp sistemi iç ve dış yapıların bir kombinasyonudur, ancak dış tüpün yapısal verimliliği tipik olarak çok daha yüksektir, özellikle de çaprazlı tüp veya diagrid sistem olduğunda, iç tüpünkinden daha fazladır. İç tüp sistemde, dış tip sisteme de çelik, betonarme veya kompozit olarak teşkil edilebilir. Etkili yükseklik sınırı farklı tüp kombinasyonlarına göre 90–150 m arasında olabilir. Bu sistemin avantajı, iki kat tüp sistem sayesinde yanal yüklere karşı etkili bir şekilde dayanım gösterir. Dezavantajı ise iç çekirdek tüpü nedeniyle iç planlama sınırlamalar oluşturmasıdır. New York'da bulunan "Avenue" (85 katlı, 426 m) binası bu sistemde yapılmış bir binadır(Ali ve Moon, 2018).

2.2.2.6. Uzay kafes sistemler

Uzay kafes kirişlerde ana yük taşıma sistemi üç boyutlu kafes kirişli yapılardan oluşur. Bu sistemlerde etkili yükseklik sınırı kompozit için 150 m'dir Bu sistem, uzay kafes kiriş elemanlarındaki eksenel kuvvetlerle yanal yüklere etkili bir şekilde karşı koyar, öte yandan sistemdeki çapraz elemanlar görüşü

engeller. Hong Kong'daki “Bank of China” (72 katlı, 367 m) binası uzay kafes sistemli bir binadır (Ali ve Moon, 2018).

2.2.2.7. Süper çerçeve sistemler

Tek sistemlerde, etkili yükseklik sınırı çelik için 170 m ve betonarme için 100 m’dir Bu sistem, çok yönlü süper çerçeve düzenlemeleriyle yanal yüklere karşı etkili bir şekilde direnç gösterir. Ancak binanın şekli, büyük ölçüde taşıyıcı sisteme bağlıdır.

Birleşik kule sistemlerde, etkili yükseklik sınırı kompozit 250 m’nin üstündedir. Bu sistem son derece yüksek bina kompleksleri verimli bir şekilde oluşturulabilir. Çoklu acil çıkış alternatifleri ile avantaj sağlar. Öte yandan çok büyük sahalar gerektirir (Ali ve Moon, 2018).

KAYNAKÇA

1. Ali, M. M., & Al-Kodmany, K. (2022). Structural systems for tall buildings. Encyclopedia, 2(3), 1260-1286.
2. Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. Architectural science review, 50(3), 205-223.
3. Ali, M. M., & Moon, K. S. (2018). Advances in structural systems for tall buildings: emerging developments for contemporary urban giants. Buildings, 8(8), 104.
4. CTBUH (2022). Council on Tall Buildings and Urban Habitat Height Criteria for Measuring & Defining Tall Buildings, https://www.ctbuh.org/resource/height (erişim tarihi: 10 Aralık 2022)
5. Çelik, M. D., (2003). Yüksek Yapılarda Çelik Taşıyıcı Sistemler, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
6. Eren, Ö., (2019), Geçmişten Günümüze Çelik Yüksek Yapılar, Quintessence Yayıncılık Tanıtım Pazarlama ve Dış Tic Ltd Şti, İstanbul
7. Fidan, S. Ö., (2019). Yüksek Yapılarda Cephelerin Taşıyıcı Sistemle Olan İlişkisinin İncelenmesi ve İzmir Yüksek Yapıları Üzerine Bir Araştırma, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
8. Fu, G., Betancur, J., Poon, D., Dannettel, M., (2012) Wuhan Greenland Center Main Tower: Seamlessly Integrating Structure and Architecture. In Proceedings of the CTBUH 9th World Congress, Shanghai, China, 19–21.
9. Gore, N. G., & Mhatre, P., (2018). Outrigger Structural System–A Review and Comparison of the Structural System. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 64(01), 31-35.
10. İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği (2008). Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi. İstanbul
11. Özgen, A., Sev, A., (2000). Çok Katlı Yüksek Yapılarda Taşıyıcı Sistemler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
12. Şancı, E., (2021), Yüksek Yapı Sistemlerinin Performanslarında P-Delta Etkisinin Değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
13. Şenoğlu, G., (2016). Kompozit Yüksek Bir Yapının Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Yöntem Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

14. TBDY (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı-Deprem Dairesi Başkanlığı; Ankara.
15. Weismantle, P. Challenges in the Architectural Technical design of the New Generation of Supertall Buildings. Int. J. Hi-Rise Build. 2018, 7, 85–93.
16. URL1, https://www.skyscrapercenter.com/building/one-woodward-avenue/10582 (Erişim tarihi: 01 Aralık 2022)
17. URL2, https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/ingalls-building (Erişim tarihi: 01 Aralık 2022)
18. URL3,https://www.skyscrapercenter.com/building/77-west-wacker-drive/159 (Erişim tarihi: 01 Aralık 2022)
19. URL4,https://www.skyscrapercenter.com/building/planet-hollywood-las-vegas/10646 (Erişim tarihi: 01 Aralık 2022)
20. URL5,https://www.som.com/wp-content/uploads/2021/07/jinmao_1400x800_chinajinmaogroup_01.jpg (Erişim tarihi: 10 Aralık 2022)
21. URL6, https://www.skyscrapercenter.com/building/burj-khalifa/3 (Erişim tarihi: 10 Aralık 2022)
22. URL7,https://www.skyscrapercenter.com/building/wuhan-greenland-center/9671 (Erişim tarihi: 10 Aralık 2022)
23. URL8,https://tr.wikipedia.org/wiki/Cidde_Kulesi#/media/Dosya:Jeddah_Tower_Building_Progress_as_of_13-Jul-2016_002.jpg (Erişim tarihi: 10 Aralık 2022)
24. URL9, https://skyscraper.org/tallest-towers/sears-tower/ (Erişim tarihi: 10 Aralık 2022)
25. URL10, https://www.skyscrapercenter.com/building/lotte-world-tower/88 (Erişim tarihi: 11 Aralık 2022)

KARAR AĞAÇLARIYLA KAYMA TEST VERİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Gültekin ÇOŞKUN[1]
Gencay SARIIŞIK[2]

[1]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas TBMYO, Sivas / Türkiye,
e-mail: coskungc@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-4182-2372
[2]Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Şanlıurfa / Türkiye,
e-mail: gsariisik@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1112-3933

GİRİŞ

Günümüzde, bir kamu hizmeti binası devlet idaresi, adalet, kültür, dini ibadet yerleri, eğitim, sağlık hizmeti, bankacılık, ticaret, gastronomi, hizmetler, turizm, spor, yolcu hizmetleri, posta ve telekomünikasyon gibi tanımlanmış bir işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmıştır. Bu tür hizmet binalarında özellikle tekerlekli sandalye, ortopedik koltuk değneği, baston veya yardımcı cihazlar kullanan engelli kişilerin herhangi bir ayakkabıyla güvenli bir şekilde hareket etmesine izin vermelidir (Shahraki, 2021; Badawy vd., 2020). Kamusal alana hizmet eden bu binalar, merdivenleri ve koridorlar temel estetik değerleri dışında, basamak sayısı, genişliği ve tasarımı yaşlı ve engelli insanların belirli gereksinimlerini karşılamalıdır (Stanojević ve Keković, 2019; Arslan ve Erkan, 2020; Vesela 2019).

Kayma ve takılma günlük yaşamda ve iş yerinde sık görülen bir durumdur (Sarkar vd., 2019; Atlas, 2019). Kaymadan kaynaklanan kazalar özellikle endüstriyel alanlar, restoranlar, mağazalar ve kamu binalarında önemi artmıştır (Yu ve Hon, 2020; Weber vd., 2020; Larue vd., 2021). Binalarda kullanılan zemin kaplama malzemelerin yüzeyinin kaymaz hale getirilmesi gerekmektedir (Sato vd., 2021; Namdari vd., 2020). Zemin kaplaması olarak kullanılan malzeme yüzeylerinin kayma risk değerlendirmesi belirlenmesi oldukça önem kazanmıştır (Çoşkun vd., 2016; Çoşkun ve Sarıışık 2020). Kayma direnci, ayakkabı tabanı ile zemin kaplama malzemesi yüzeyinin etkileşimden kaynaklanmaktadır. Yüzeyin kayma direncinin subjektif değerlendirmesi yüzeyin durumu ve renklerin kontrastı, aydınlatma tipi ve geliş açısı etkilidir (Enkhjargal ve Li, 2019). Güvenlik ve kayma direncinin kapsamı, kullanıcılar ve statik ve dinamik sürtünme katsayısının (COF) ölçümleriyle öznel olarak değerlendirilir (Li vd., 2019; Khaday ve Li 2019; Chang vd., 2006).

Yüzey kaplama malzemeleri üreten endüstriler de yüzey kayma direnci minimum değerde olması istenmektedir. Zeminlerde kullanılan yüzey kaplama malzemelerin estetik ve dekoratif niteliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerine de büyük önem verilmektedir. Yüzey malzemelerinin kuru, ıslak ve yağlı koşullar altında test edilen doğal, cilalı, honlu ve eskitilmiş yüzeylere sahip seramik karolar ve doğaltaşlar kullanılmaktadır (Sariisik 2009; Terjék ve Józsa 2015). Ayrıca farklı ortam koşullarında da (yağ, süt, şarap, su, gliserol, dizel ve endüstriyel yağ vb.) araştırmalar yapılmıştır (Barreca vd., 2015).

Coşkun ve Sarıışık (2020) yayaların zemin kaplamaları arasında daha güvenli hareketi için yeni bir kayma riski ölçeği belirlemişlerdir. İnsanların zemin kaplamaları üzerinde güvenle hareket edebilmesi için kayma riski

tespit edilmiştir. Yüzeylerin kayma direnci özelliklerini analiz eden bir diğer grup ise ayakkabı üreticileridir. En az iki yüzey arasında kayma sürtünmesi meydana geldiğinden, ayakkabıların kayma direnci ile ilgili araştırmalar da yapılmaktadır (Norlander vd., 2015; Yamaguchi vd., 2012). Binaların hem dışında hem de içinde kayma direnci değerlendirmesi temel güvenlik kapsamının bir parçasını oluşturur (Enkhjargal ve Li, 2019). Hem yönetmeliklere uygunluk hem de bağımsız kuruluşlar tarafından yapılan kontrollerin bir parçası olarak yapılan testler açısından değerlendirilir (Jhou vd., 2020).

Kayma riskinin azaltılmasına yönelik güvenliğin artırılmasına yönelik çalışmalar ve analizler halen gündemde olan bir bilimsel konu olup, bu parametrenin iyileştirilmesine yönelik araştırmalar, yüzey ve ayakkabı tasarımı ve aşınmanın yüzey üzerinde etkisini dikkate alan ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi alanında yürütülmektedir (Çoşkun 2018; Karataş vd., 2021; Sudol vd., 2021). Çalışmanın amacı, özellikle kaymazlık özelliklerini kaybetmeye meyilli yerleri belirtmek ve bunları, yüzeyi kayma olasılığı açısından tanımlayan ve değerlendiren AS 4586-2013 standardına göre normalleştirilmiş sınıflandırmaların değerlerine yönlendirmektir. Yazar, kayma önleyici özelliklerin kaybıyla ilgili olarak kamu hizmet binalarında gerçek koşullarda yüzey kullanımının etkisinin araştırma ve değerlendirme eksikliğinin farkındadır.

Bu çalışmada kamu hizmet binalarına farklı kayma test yöntemlerinde kuru ve ıslak ortamlar için zemin kaplaması olarak kullanılan farklı döşeme malzemelerinin karar ağacı yöntemiyle sınıflandırılması yapılacaktır.

METARYAL VE YÖNTEM

Materyal

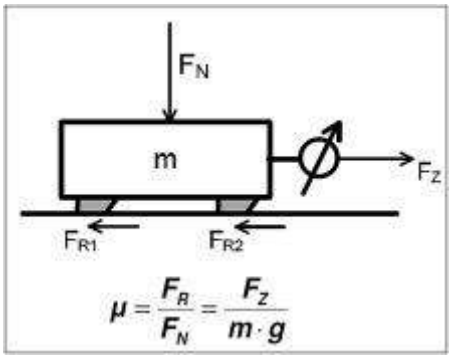
Kamu binaları başta olmak üzere topluma açık ve kapalı alanlarda zemin kaplaması olarak başta doğaltaş olmak üzere farklı türde ve özellikte seramik, laminat ve PVC zemin kaplaması olarak kullanılmaktadır. Özellikle kamu kurumlarında albenisi olması ve daha güzel gözükmesi açısından cilalı yüzey ve parlak malzemeler zemin kaplaması olarak kullanılmakta ve tercih edilmektedir. Kayma sonucu oluşan kazaları en aza indirmek için dinamik sürtünme katsayılarının belirlenmesi ve güvenlik sınıflamasının yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, Sivas İlinde bulunan otuz farklı kamu kurumunda ve her kurumda altı farklı lokasyonda kuru ve ıslak ortamda zemin kaplaması olarak kullanılan malzemelerin yerinde dinamik sürtünme katsayıları ölçülmüştür.

Kayma Testi Ölçüm Yöntemleri

Bu çalışmada zeminlerin yüzeylerinin kaymaya karşı direncinin ölçümünde GMG 200 ve Pandül test cihazları kullanılmıştır. GMG 200 test cihaz Alman GTE şirketi tarafından DIN 51131 standardına göre imalatı gerçekleştirilmiştir. Cihaz taşınabilir olması, mekanik ve elektronik ölçüm teknikleri ile Avrupa'da birçok ülkede kullanılmaktadır (Şekil 1).

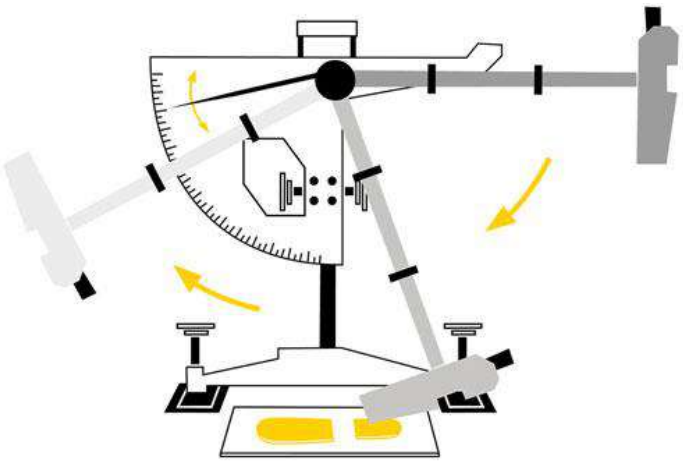
Şekil 1. GMG 200 Test Cihazı ve Ölçüm Aparatı

Test cihazı ayakkabı altlığını temsilen ölçüm aparatları ile zeminin dinamik sürtünme katsayısını ölçmektedir. Cihazda kodlanmış olan ölçüm aparatları otomatik olarak algılanır ve kontrol ünitesi kullanılarak ölçüm değeri kaydedilir (Şekil 2).



Şekil 2. Sürtünme katsayısı ölçümü

İkinci olarak zemin kaplamalarının sürtünme kuvvetinin belirlenmesi için WESSEX Marka ve S885 Model pandül test cihazı kullanılmıştır. Bu test cihazı BS EN standartlarına uygun olarak tasarlanmış, ölçüm aparatı ve yüzey arasındaki sürtünmeyi ölçmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Pandül test cihazı

Araştırmada Kullanılan İstatistiksel Yöntemler

Veri madenciliği yöntemlerinde tahmin ve sınıflandırma işlemlerinde karar ağacı yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Kolayca anlaşılması ve yorumlanması açısından diğer yöntemlere göre avantaj sağlamaktadır (Chien ve Chen, 2008). Bu yöntemde verileri küçük gruplara bölerek birbirine benzer daha basit karar verme adımlar uygulanmaktadır (Sun ve Li 2008). Bu çok yönelimli ağaç kök düğüm altında girdiler alan iç düğümlerden oluşmaktadır (Maimon ve Rokach 2010). Veriler önce ağacın kökünden yapraklara bölünür, daha sora kazanım bilgilerine göre değişken seçimi gerçekleşir. Algoritmada tekrarlı eden bu durumun sonlanması için tüm öğeler aynı sınıfta düğüm içerisinde yer alır. Algoritmanın sona ermesi için kalan değerlerin bitmesi veya yalnızca bir sınıftan olması halinde ağaç tamamlanır (Temel vd., 2005).

Bu çalışmada karar ağacı algoritmalarından CHAID yöntemi kullanılmıştır. Bu karar ağacı algoritması ilk olarak 1975 yılında Kass tarafından ki-kare testini uygulayan bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Bu algoritmada kategorik ve sürekli değişkenlerin kullanılması dışında her düğümün ikiden fazla alt grubu bölünebilme özelliğine sahiptir (Díaz-Pérez ve Cejas 2016).

BULGULAR

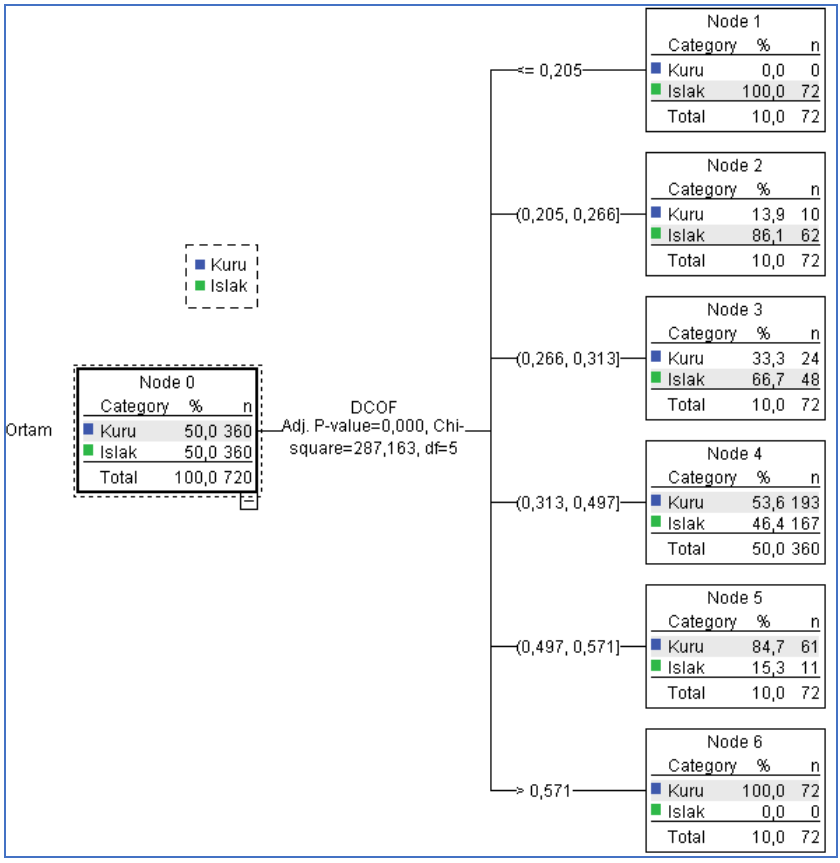
Karar Ağacı Algoritmaları ile Kayma Risk Skalasının Belirlenmesi

Taşınabilir GMG 200 ve pandül test cihazı ile zemin kaymazlık testinde kullanılan otuz farklı devlet kurumuna ilişkin DCOF değerleri doğaltaş, PVC, seramik ve laminat yüzey kaplamalarında kuru ve ıslak ortamlar ile altı bölgeye göre belirlenmiştir. Devlet kurumları için farklı ortamlara ilişkin bağımlı ve bağımsız değişkenleri arasındaki ilişki CHAID algoritmaları kullanılarak

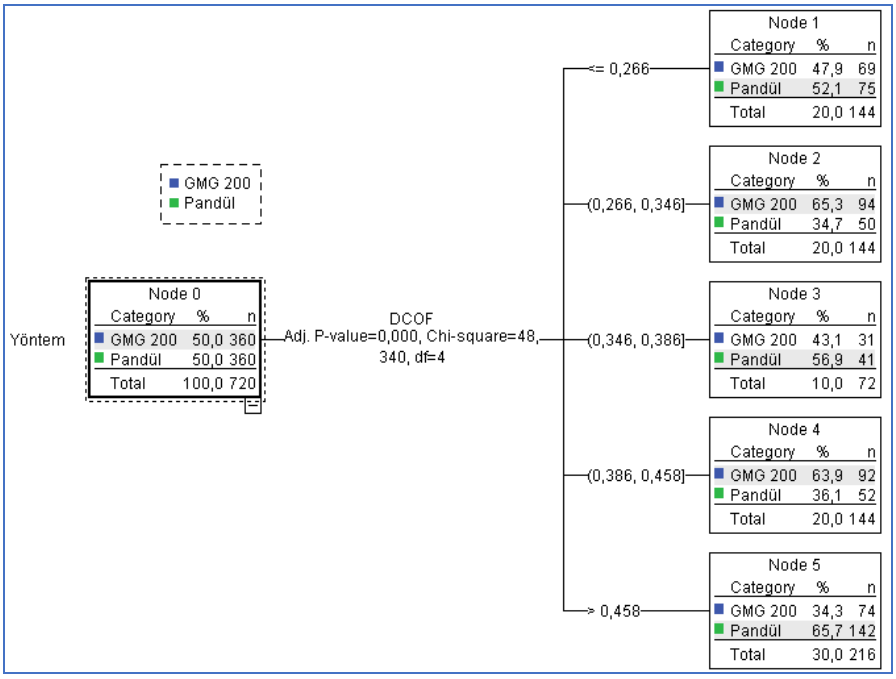
değerlendirilmiştir (Şekil 3-Şekil 6). DCOF değerleri karar ağacı algoritmalarından CHAID yöntemi kullanılarak beş kümede sınıflandırılmıştır. Bu analiz sonucunda CHAID yöntemi ile emniyet kayması risk skalası belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. CHAID yöntemi ile emniyet kayması risk skalası

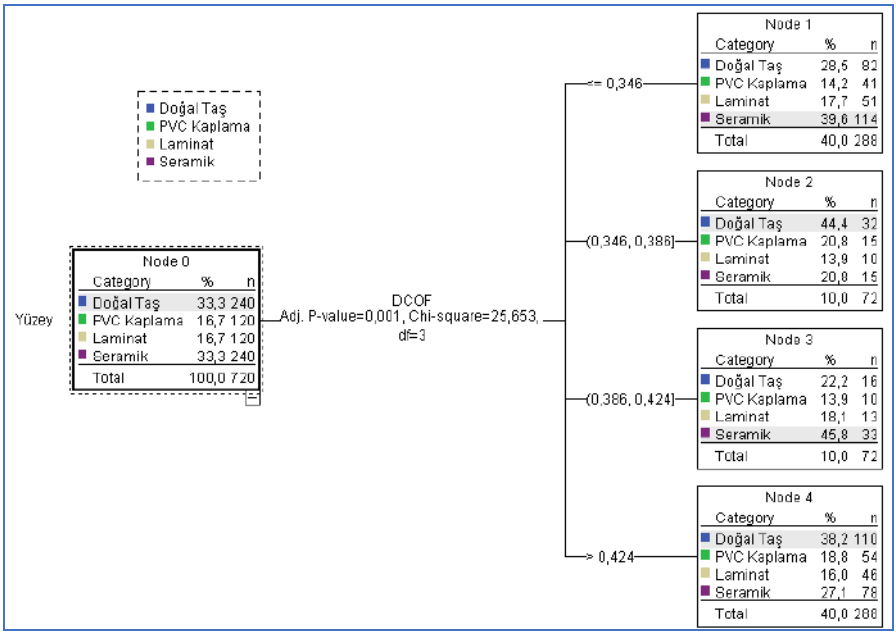
Bağımlı değişken				**Kod**	**Güvenlik Sınıfı**	**Kayma potansiyeli**
Ortam	**Yöntem**	**Alan**	**Yüzey**			
≤ 0.20	≤ 0.266	≤0,205	-	CH1	Tehlikeli	Çok düşük
0.205-0.266	0,266-0,346	0,205-0,346	≤0,346	CH2	Güvensiz	Düşük
0.266-0.313	0,346-0,386	0,346-0,386	0,346-0,386	CH3	Koşullu güvenli	Orta
0.313-0.497	0,386-0,458	0,386-0,424	0,386-0,424	CH4	Güvenli	Yüksek
0.497-0.571	≥ 0,458	≥0,424	≥0,424	CH5	Çok Güvenli	Çok yüksek
≥ 0.571	-	-	-	CH6	Tehlikeli	Çok düşük



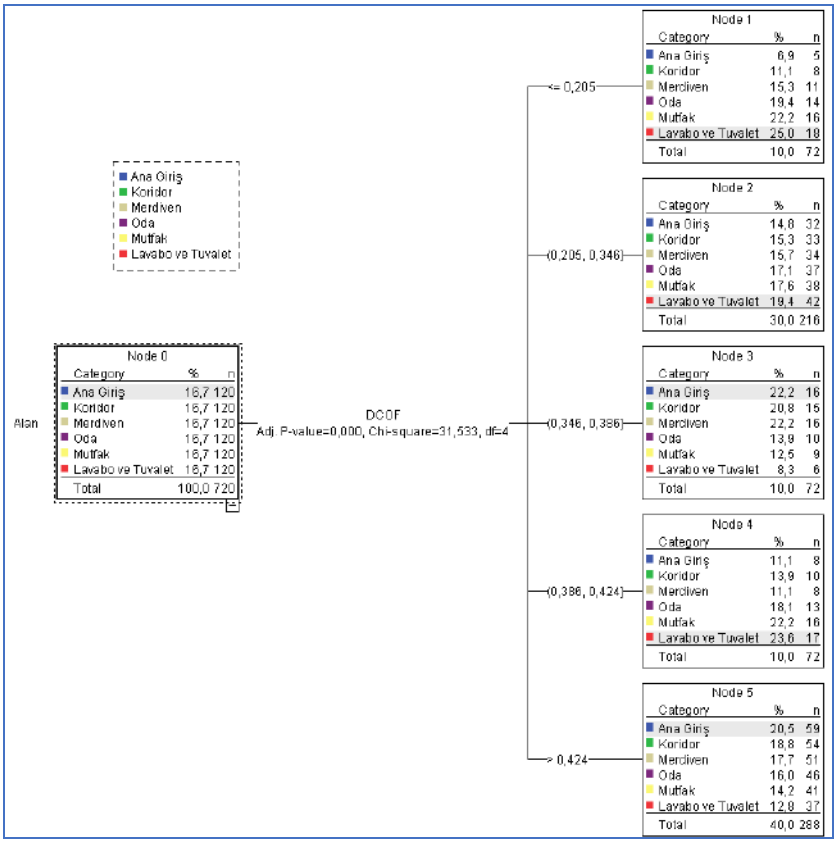
Şekil 3. Farklı ortamlara ilişkin CHAID modellerine ait karar ağacı



Şekil 4. Farklı yöntemlere ilişkin CHAID modellerine ait karar ağacı



Şekil 5. Farklı yüzey kaplamalara ilişkin CHAID modellerine ait karar ağacı



Şekil 6. Farklı alanlara ilişkin CHAID modellerine ait karar ağacı

Devlet Kurumlarında Zemin Kaplamalarının Sınıflandırılması

Devlet kurumlarında zemin kaplaması olarak kullanılan çeşitli malzemelerin DCOF değerleri kuru ve ıslak ortamda DIN 51131 ve TS EN 14153 standardına göre belirlenmiştir. TS EN 14153 standardına göre bir güvenlik sınıfı varken, DIN 51131 standardında elde edilen dinamik sürtünme katsayıları (DCOF) değerlerine göre herhangi bir güvenlik sınıflandırması önerilmemiştir. Sadece birçok Avrupa ülkesi tarafından kullanılan ve Alman kaza sigortaları birliği tarafından benimsenen Wuppertal sınıflandırması mevcuttur. Bu çalışmada her iki standart dikkate alınarak, DCOF değerlerine göre bir sınıflandırma yapılacaktır.

Wuppertal sınıflandırmasına göre taşınabilir test cihazında kayma riski beş sınıfta belirlenirken, Yeni emniyet kayması risk skalası K-ortalama yöntemi kullanılarak yapılan sınıflandırmada 0.11 ile 0.59 arasında değişen beş sınıfta belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen DCOF değerlerinin güvenlik sınıflandırması Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 3. Döşeme DCOF değerlerinin sınıflandırılması

Alan	Ortam	Yöntem	Yüzey Kaplama	DK		H		O		Ü		E	
				x̄	S	x̄	S	x̄	S	x̄	S	x̄	S
Ana Giriş	Kuru	Y1	Doğaltaş	0,45	CH4	0,45	CH4	0,59	CH4	0,49	CH4	0,36	CH3
		Y2	Doğaltaş	0,53	CH4	0,51	CH4	0,35	CH2	0,52	CH4	0,30	CH2
	Islak	Y1	Doğaltaş	0,31	CH2	0,31	CH2	0,45	CH4	0,34	CH3	0,22	CH2
		Y2	Doğaltaş	0,38	CH3	0,37	CH3	0,21	CH2	0,38	CH3	0,16	CH1
Koridor	Kuru	Y1	PVC	0,43	CH3	0,44	CH3	0,58	CH5	0,47	CH4	0,35	CH3
		Y2	PVC	0,51	CH4	0,50	CH4	0,34	CH3	0,51	CH4	0,29	CH2
	Islak	Y1	PVC	0,29	CH2	0,29	CH2	0,43	CH3	0,33	CH3	0,21	CH2
		Y2	PVC	0,37	CH3	0,36	CH3	0,20	CH1	0,37	CH3	0,15	CH1
Merdiven	Kuru	Y1	Doğaltaş	0,42	CH3	0,43	CH3	0,56	CH4	0,46	CH4	0,34	CH3
		Y2	Doğaltaş	0,50	CH4	0,49	CH4	0,33	CH3	0,50	CH4	0,28	CH2
	Islak	Y1	Doğaltaş	0,28	CH2	0,28	CH2	0,42	CH4	0,32	CH2	0,20	CH1
		Y2	Doğaltaş	0,36	CH3	0,35	CH3	0,19	CH1	0,36	CH3	0,14	CH1
Oda	Kuru	Y1	Laminat	0,41	CH3	0,41	CH3	0,55	CH4	0,45	CH4	0,33	CH3
		Y2	Laminat	0,49	CH4	0,48	CH4	0,32	CH2	0,49	CH4	0,27	CH2
	Islak	Y1	Laminat	0,27	CH2	0,27	CH2	0,41	CH3	0,31	CH2	0,19	CH1
		Y2	Laminat	0,35	CH3	0,34	CH2	0,18	CH1	0,35	CH3	0,13	CH1
Mutfak	Kuru	Y1	Seramik	0,40	CH3	0,41	CH3	0,55	CH4	0,44	CH3	0,32	CH2
		Y2	Seramik	0,48	CH4	0,47	CH4	0,31	CH2	0,48	CH3	0,26	CH2
	Islak	Y1	Seramik	0,26	CH2	0,26	CH3	0,40	CH3	0,30	CH2	0,18	CH1
		Y2	Seramik	0,34	CH3	0,33	CH3	0,17	CH1	0,34	CH3	0,12	CH1
Lavabo ve Tuvalet	Kuru	Y1	Seramik	0,40	CH3	0,40	CH3	0,54	CH4	0,43	CH3	0,31	CH2
		Y2	Seramik	0,47	CH4	0,46	CH4	0,30	CH2	0,47	CH4	0,25	CH2
	Islak	Y1	Seramik	0,25	CH2	0,26	CH2	0,40	CH3	0,29	CH2	0,17	CH1
		Y2	Seramik	0,33	CH3	0,32	CH2	0,16	CH1	0,33	CH3	0,11	CH1

x̄: Ortalama Değer, S: Sınıf, DK. Devlet Kurumları, H: Hastaneler, O: Okullar, Ü: Üniversiteler, E: Eczaneler

Tablo 3 incelendiğinde, devlet kurumlarından eczanelerde ve okullarda, ıslak ortam ve PSM-2 yönteminde zemin kaplamalarında DCOF değerlerinin 0,20 μ'den küçük olması nedeniyle tehlikeli olarak sınıflandırılmaktadır. Devlet kurumlarında genellikle ıslak ortamlarda 0,20 ile 0,33 μ arasında değişen DCOF değerleri nedeniyle güvensiz, 0,33 ile 0,45 μ arasında değişen DCOF değerleri nedeniyle şartlı güvenli olarak sınıflandırılmaktadır. Devlet kurumlarında genelde kuru ortamlarda DCOF değerlerinin 0,45 ile 0,58 μ arasında olması nedeniyle güvenli olarak sınıflandırılmaktadır.

TARTIŞMA

Farklı kayma test yöntemlerinde kuru ve ıslak ortamlar için devlet kurumlarında zemin kaplaması olarak kullanılan farklı döşeme malzemelerinin yüzey işlemlerine dayanmaktadır. Standartlara göre yapılan portatif kayma testleri ile malzemelerin DCOF değerleri belirlenmiştir.

Malzemelerin DCOF değerleri KMC yöntemi kullanılarak dört kümede sınıflandırılmış ve yeni bir SSRS belirlenmiştir. Malzemeler, belirtilen skalaya göre DCOF değerleri dikkate alınarak güvenli kullanım alanlarına göre sınıflandırılmıştır. DIN 51131 standartlarına göre rampa test cihazı, TS EN 14231 pandül test cihazı ve doğaltaş sınıflandırmalarının önerdiği standartlar kullanılarak çeşitli malzemeler ve çeşitli yüzeylerde kayma direnci belirlenmiştir. Doğal cilalı yüzeylerde kayma direnci düşük, kayma potansiyeli

yüksektir. Bu durumda, cilalı

yüzeyli doğaltaşlarda kuru koşullarda ıslak koşullara göre kayma direnci daha düşük olduğu için kayma riski daha yüksektir (Sarıışık ve Sarıışık 2010; Sarıışık vd., 2011;2012). Araştırmacı tarafından geliştirilen yeni güvenlik kayması ölçeği, KMC yöntemi ile bir laboratuvar test cihazı (rampa ve sarkaç) COF değerleri kullanılarak belirlenmiştir (Çoşkun ve Sarıışık 2016).

Bu çalışmada taşınabilir test cihazı ile KMC yöntemi ve DCOF değerleri kullanılarak yeni bir SSRS belirlenmiştir. Devlet kurumlarında yapılan yerinde ölçümler sonucunda altı bölgede ıslak ortamların DCOF değeri kuru ortamın DCOF değerinden düşük olduğu için kayma riski daha yüksektir. Devlet kurumlarının zeminlerinde cilalı yüzey doğaltaş, suni taş, karo taş, laminat, PVC döşeme ve seramik kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan önceki çalışmalar, doğaltaşta hem yüzey işlemleri hem de yüzeyin ıslak/kuru koşulları nedeniyle kayma direncinin önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Cilalı doğaltaşlarda kayma direncinin düşük olduğu durumlarda da honlu, patinato ve eskitilmiş yüzeylerin kullanılması önerilir (Coşkun ve Sarıışık 2020; Çoskun vd., 2017).

Zemin kaplamalarında insanların güvenliğini sağlamak, kayma ve düşme kazalarını en aza indirmek için kayma güvenlik riski belirlenmiştir. Bu çalışmada, yayaların bir zemin kaplaması üzerinde daha güvenli bir şekilde hareket ettirilebilmesi için yeni bir emniyet kayma risk ölçeği (SSRS) belirlenmiştir. İstatistiksel K ortalama kümeleme (KMC) yöntemi ile DCOF verileri kullanılarak yeni bir güvenlik kayması risk skalası (SSRS) belirlenmiştir. Yeni bir güvenlik kayması risk skalasına (SSRS) göre, elde edilen DCOF verilerinin ortalaması alınarak zemin kaplamalarının güvenlik sınıflandırması oluşturulmuştur. Son olarak, kuru bir ortamda döşeme malzemelerinin kullanılması zorunlu olduğunda, altı bölge uygun olacaktır (Çoşkun ve Sarıışık 2020).

Çalışmada bir kamu hizmeti binasında koridor yüzeylerinin ve bir merdiven parçasının kayma direncine ilişkin üç aşamada gerçekleştirilen bir analiz ve araştırmayı sunmaktadır. İlk aşama, kauçuk tabanlı ayakkabılar giyen ve kauçuk uçlu yardımcı cihazlar kullanan kişilerin hareketini yeniden oluşturulmasında bir araştırma metodolojisini içermektedir. İkinci aşama, evlerde, mağazalarda ve endüstriyel tesislerde zeminler için kullanılan çeşitli yüzeylerin yardımcı cihazların sonunu temsil eden bir kauçuk numune ile etkileşimini dikkate alan araştırmadan oluşmaktadır. Son aşama, seçilen araştırma yüzeyinde çeşitli ayakkabılardaki insanların hareketlerinin yeniden oluşturulmasından meydana gelmektedir. Yürütülen araştırma, binalarda

hareket eden engelliler için cihaz tasarlama süreçlerini destekleyebilir ve yüzey değerlendirme kriterleri geliştirebilir (Waluś vd., 2022).

Bu çalışmada literatürden farklı olarak taşınabilir GMG 200 ve pandül test cihazı ile zemin kaymazlık testinde kullanılan otuz farklı devlet kurumuna ilişkin DCOF değerleri doğaltaş, PVC, seramik ve laminat yüzey kaplamalarında kuru ve ıslak ortamlar ile altı bölgeye göre belirlenmiştir.

SONUÇLAR

Taşınabilir (GMG 200) test cihazı ve pendulum test cihazına göre yapılan testlerde farklı döşeme malzemelerinin DCOF değerleri belirlenmiştir. Döşeme malzemelerinin DCOF değerleri ortam, alan, yöntem ve yüzey kaplamalarına göre CHAID yöntemi kullanılarak sınıflandırılmış ve yeni bir skala geliştirilmiştir. Bu çalışmada yer alan döşeme malzemeleri CHAID yöntemi ile belirtilen skalaya göre DCOF değerleri dikkate alınarak güvenli kullanım alanlarına göre sınıflandırılmıştır.

Devlet kurumunda ana giriş, koridor, merdivenler, odalar, mutfaklar, lavabolar ve tuvalet alanlarında portatif zemin kayma test cihazları kullanılarak kuru ve ıslak ortamda ölçülmüştür. Devlet kurumları tarafından kullanılan zemin kaplamaların DCOF değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olan kullanım alanları, çevresel koşulları, kayma test yöntemleri ve yüzey malzemeleri sahip olduğu tespit edilmiştir. Devlet kurumlarından eczanelerde ve okullarda, ıslak ortam ve PSM-2 yönteminde zemin kaplamalarında DCOF değerlerinin 0,20 μ'den küçük olması nedeniyle tehlikeli sınıfında iken kuru ortamlarda DCOF değerlerinin 0,45 ile 0,58 μ arasında olması nedeniyle güvenli olarak sınıflandırılmaktadır.

Ana giriş, koridor, merdiven, odalarda (derslik, hasta, yönetici ve poliklinik odaları) kullanılan doğaltaş, laminat, PVC yer döşemesi ve seramik yüzeylerin, özellikle insan yoğunluğunun fazla olduğu devlet kurumlarında mutfak, lavabo ve tuvaletler cilalanmamalıdır. Bu alanlarda cilalı ve honlanmış bir yüzey yerine doğaltaş ve seramik kullanılmalı, daha güvenli olması isteniyorsa patinalı veya eskitilmiş yüzeyler tercih edilmelidir. Bu alanlarda doğaltaş ve seramik kullanılıyorsa daha az kaygan olması isteniyorsa honlu bir yüzey tercih edilmelidir. Devlet kurumlarında zemin kaplaması olarak cilalı yüzey işleminde ve serbest plaka boyutunda döşeme malzemelerinin kullanıldığı ve bu zeminlerde kuru ortamda elde edilen DCOF değerlerinin ıslak ortamda elde edilen DCOF değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki ortamda da birbirine yakın değerler açısından cilalı yüzey işlemi ile farklı döşeme malzemelerinin kullanılmasının farklı etkileri vardır.

KAYNAKÇA

1. Arslan, M., & Erkan, I. (2020). A model for evaluating the user satisfaction of human movements on stairs through the ergonomic design approach. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 22(6), 651-672.Shahraki, A. A. (2021). Urban planning for physically disabled people's needs with case studies. Spatial Information Research, 29(2), 173-184.
2. Atlas, R. (2019). What Is The Role Of Design And Architecture In Slip, Trip, And Fall Accidents?. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 63, No. 1, pp. 531-536). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
3. Badawy, U. I., Jawabrah, M. Q., & Jarada, A. (2020). Adaptation of accessibility for people with disabilities in private and public buildings using appropriate design checklist. International Journal for Modern Trends in Science and Technology.
4. Barreca F., Cardinali G., Fichera C.R., 2(015). Assessment of flooring slipperiness for food industry buildings. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal Open access at http://www.cigrjournal.org Vol.17, No.2, p.23-30
5. Chang Wen-Ruey, Li Kai Way, Huang Yueng-Hsiang, Filiaggi Alfred, Courtney Theodore K., (2019). Objective and subjective measurements of slipperiness in fast-food restaurants in the USA and their comparison with the previous results obtained in Taiwan, Safety Science, Volume 44, Issue 10, December 2006, Pages 891-903, IFMBE Proceedings, vol 74. Springer, Cham,
6. Chien, CH., Chen, LF. (2008). Data Mining to Improve Personnel Selection and Enhance Human Capital: A Case Study in High-Technology Industry, Expert Systems with Applications, vol. 34, p. 280-290.
7. Çoşkun, G., Sarıışık, G., & Sarıışık, A. (2016). Classification of parameters affecting slip safety of limestones. Cogent Engineering, 3(1), 1217821.
8. Çoşkun, G., Sarıışık, G., & Sarıışık, A. (2017). Slip safety risk analysis of surface properties using the coefficients of friction of rocks. International journal of occupational safety and ergonomics.
9. Çoşkun, G. (2018). A new slip safety risk scale of natural stones with statistical Kmeans clustering analysis. Arabian Journal of Geosciences, 11(24), 1-14.
10. Coşkun, G., & Sarıışık, G. (2020). Analysis of slip safety risk by portable floor slipperiness tester in state institutions. Journal of Building Engineering, 27, 100953.
11. Enkhjargal O.E. and Li K.W. (2019). Subjective Ratings of Floor Slippery

on Common Indoor and Outdoor Floors, International Journal of Engineering and Technology vol. 11, no. 4, pp. 241-244.
12. Díaz-Pérez, F. M., & Bethencourt-Cejas, M. (2016). CHAID algorithm as an appropriate analytical method for tourism market segmentation. Journal of Destination Marketing & Management, 5(3), 275-282.
13. Jhou SY., Hsu WC., Hsu CC. (2020) A New Numerical Simulation Process for Footwear Slip Resistance Analysis. In: Lin KP., Magjarevic R., de Carvalho P. (eds) Future Trends in Biomedical and Health Informatics and Cybersecurity in Medical Devices. ICBHI
14. Karataş, F., Sarıışık, A., & Çoşkun, G. (2021). Evaluation of the Safety Coefficients of Floor Coverings Used in Wet and Dry Environments by K-Means and Decision Tree Methods. Dicle University Journal of Engineering, 12(5), 16.
15. Khaday S., Li K.W. (2019). Friction Measurement on Common Floor Using a Horizontal Pull Slip Meter, International Journal of Environmental Science and Development 10(9):275-279
16. Larue, G. S., Popovic, V., Legge, M., Brophy, C., & Blackman, R. (2021). Safe trip: Factors contributing to slip, trip and fall risk at train stations. Applied ergonomics, 92, 103316
17. Li K.W., Chen Y., Zou F., Li N., Duan T. (2019). Perception of risk of tripping under lighting and obstacle conditions. Hum. Factors Man. 29: 529– 536.
18. Maimon O., Rokach L. (2010). "Classification Trees". Data Mining and Knowledge Discovery Handbook, Editör: O., Maimon, L. Rokach, Springer, New York, A.B.D., 149-175.
19. Namdari, N., Mohammadian, B., Jafari, P., Mohammadi, R., Sojoudi, H., Ghasemi, H., & Rizvi, R. (2020). Advanced functional surfaces through controlled damage and instabilities. Materials Horizons, 7(2), 366-396.
20. Norlander A., Miller M., Gard G., 2015. Perceived risks for slipping and falling at work during wintertime and criteria for a slip-resistant winter shoe among Swedish outdoor workers. Safety Science, Vol. 73, p. 52-61.
21. Sariisik A., 2009. Safety analysis of slipping barefoot on marble covered wet areas. Safety Science, Vol. 47, Iss. 10, p. 1417-1428
22. Sariisik, A., & Sariisik, G. (2010). Analysis of the parameters affecting the slip angle of surface-processed natural stones. In ISRM International Symposium-EUROCK 2010. OnePetro.
23. Sariisik, A., Sariisik, G., & Akdaş, H. (2012). Slip analysis of surface-processed limestones. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 165(5), 279-296.
24. Sariisik, A., Akdas, H., Sariisik, G., & Coskun, G. (2011). Slip safety

analysis of differently surface processed dimension marbles. Journal of Testing and Evaluation, 39(5), 1.
25. Stanojević, A., & Keković, A. (2019). Functional and aesthetic transformation of industrial into housing spaces. Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, 401-416.
26. Sarkar, S., Raj, R., Vinay, S., Maiti, J., & Pratihar, D. K. (2019). An optimizationbased decision tree approach for predicting slip-trip-fall accidents at work. Safety science, 118, 57-69.
27. Sato, T., Nakajima, M., Murano, R., Kato, M., & Nakajima, K. (2021, June). Relationship of Floor Material and Fall Risk Assessment During Descending Stairs. In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 171-174). Springer, Cham.
28. Sudoł, E., Szewczak, E., & Małek, M. (2021). Comparative analysis of slip resistance test methods for granite floors. Materials, 14(5), 1108.
29. Sun J. and Li, H. (2008). Data Mining Method for listed companies' financial distress prediction, KnowledgeBased Systems, vol. 21, no. 1, pp. 1-5.
30. Temel GO. Çamdeviren, H. Akkuş, Z. (2005). "Sınıflama Ağaçları Yardımıyla Restless Legs Syndrome (RLS) Hastalarına Tanı Koyma", 2005.
31. Terjék A., Józsa Z., 2015. Analysis of Surface Properties Determining Slip Resistance of Ceramic Tiles, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(3), pp. 393–404.
32. Yamaguchi T., Umetsu T., Ishizuka Y., Kasuga K., Ito T., Ishizawa S., Hokkirigawa K., 2012. Development of new footwear sole surface pattern for prevention of sliprelated falls. Safety Science, Vol. 50, Iss. 4, p. 986-994
33. Yu, L. X., & Hon, C. Y. (2020). Safety Climate Within Ontario Restaurants. Professional Safety, 65(11), 39-44.
34. Vesela, L. (2019, February). Staircase-dimensions of stair steps and their deviations of geometrical accuracy. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 471, No. 2, p. 022012). IOP Publishing.
35. Waluś, K. J., Warguła, Ł., Wieczorek, B., & Krawiec, P. (2022). Slip risk analysis on the surface of floors in public utility buildings. Journal of Building Engineering, 104643.
36. Weber, A., Nickel, P., Hartmann, U., Friemert, D., & Karamanidis, K. (2020). Contributions of Training Programs Supported by VR Techniques to the Prevention of STF Accidents. In International Conference on Human-Computer Interaction (pp. 276-290). Springer, Cham

R ORTAMI ÖZEL VERİ SETLERİNİ TAHMİN ETMEK İÇİN ZAMAN SERİSİ ALGORİTMALARINI HİBRİT MODELLERLE BİRLEŞTİRME

Öğr. Gör. İbrahim Halil ÜNLÜK

Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Bilgisayar Teknolojileri Bölümü
ORCID: 0000-0002-6541-2714

1. Giriş

Zaman serileri kullanılarak gelecek tahminlerinin yapılması tarihi çok eskilere dayanmaktadır. Sürekli izleme ve veri toplama daha yaygın hale geldikçe, hem istatistiksel hem de makine öğrenimi tabanlı zaman serisi analizine duyulan ihtiyaç artacaktır. Zaman serisi modelleme ve tahmin analizi başta hava tahminleri olmak üzere ekonomi, sağlık, ilaç, enerji, astronomi, fizik, mühendislik ve daha birçok pratik uygulamada kullanılmaktadır. Kullanılan çoğu zaman serisi genellikle hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bileşenleri içerebildiğinden dolayı, tek bir doğrusal veya doğrusal olmayan model söz konusu zaman serilerini modellemek ve tahmin etmek için yetersiz kalabilmektedir. Bu darboğazı aşmak için zaman serileri tahmin süreçlerinde tek model yerine işbirlikçi modeller kullanılarak tahmin sonuçları iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

Zaman serisi modelleme ve tahmin işlemi, çeşitli pratik alanlar için temel öneme sahiptir. Literatürde zaman serisi modelleme ve tahminlerinin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için birçok önemli model önerilmiştir. Zaman serisi verileri ve analizleri, örneğin nesnelerin interneti, sağlık hizmetlerinin dijitalleşmesi ve akıllı şehirlerin yükselişi yoluyla bu tür verilerin büyük miktarda üretilmesi nedeniyle giderek daha önemli hale gelmektedir.

Tahmin kalitesini artırmak için modelleri tek başına kullanmak yerine bazı modellerin kombinasyonları ile tahmin yapmak daha iyi bir yaklaşım tarzı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü aynı anda bir zaman serisinin eğilim ve mevsimsellik gibi özelliklerini işleyebilirler, ancak tahminciler için önerilenler arasından en iyi modeli seçmek her zaman kolay değildir. Zaman serileri genellikle farklı nitelikte olabilmekte ve dış faktörlerin etkileri bir modelden diğerine farklılık gösterebilmektedir. Tahmin amaçları için en uygun modeli seçmek, nitel deneyimin yanı sıra tahminler ve zaman serisi doğası konusunda da kapsamlı deneyim gerektirir. Birçok bilimsel araştırmada, tek bir tekniğin, bazı tekniklerin bir kombinasyonundan daha iyi bir öngörücü niteliğinin olmadığı kabul edilmektedir [1].

Toplu öğrenme özel bir makine öğrenmesi konusudur. Genel olarak daha yüksek doğruluk ve istikrarlı model performansı sağlamak amacıyla birden fazla modeli bir araya getirme girişimidir. Geçmişten günümüze topluluk metodolojisi sağlam teoriye dayanmaktadır ve kullanımı karmaşık veri bilimi senaryolarında başarılı uygulamalarda kullanılmıştır [2]. Topluluk teknikleri, son on yılda istatistiksel ve makine öğrenimi alanında gelişen model çıktı toplama teknikleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Popüler makine öğrenimi algoritmalarının hiçbiri zaman serisi tahmini için oluşturulmamıştır ve tahmin için kullanılmaları için zaman serisi verilerinin önceden işlenmesi yani hazır hale getirilmesi gerekmektedir [3].

Makine öğrenimi algoritmalarının gücü çapraz doğrulamaya dayanmaktadır. Yani tek bir modeli eğitmek için serinin tamamı farklı bölümler halinde kullanılmaktadır. Ancak bu durum her seri için ayrı bir modelin geliştirildiği standart istatistiksel zaman serisi algoritmalarından farklıdır.

Pratik araştırmalarda, deneyleri tasarlamak veya hâlihazırda toplanmış verileri analiz etmek için profesyonel istatistiksel yazılımlar kullanılır. Bu çalışmada R yazılım paketlerini kullandık. R, son birkaç on yılda bilimsel hesaplama görevleri için oldukça iyi bir araç olarak ortaya çıkmış ve verileri analiz etmek için istatistiksel metodolojilerin uygulanmasında tutarlı bir yer edinmiştir.

Literatürde tahmin modelleri genel anlamda üç kategoride sınıflandırılmıştır. Birinci grup, zaman serileri [4]–[8] yâda istatistik-tabanlı yöntemler [9] olarak sınıflandırılırken, ikinci grup, yapay zekâ tabanlı yöntemler (makine öğrenmesi [10], derin öğrenme [11] , genetik algoritma [12] olarak sınıflandırılmaktadır. Son grup ise istatistik ve derin öğrenme tabanlı yâda genetik algoritmalar ile diğer modellerin kombinasyonu biçiminde [13]–[15] hibrit yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

Yapay zekâ tabanlı modeller 1992-2006 yılları arasında popüler olmaya başlamış, destek vektör makinelerinin yoğun kullanılması yapay zekâ alanında makine öğrenmesinin de gelişmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca istatistiksel modellerle karşılaştırıldığında, makine öğrenimi modelleri, karmaşık doğrusal olmayan verilerin işlenmesinde, özellikle kısa süreli doğal gaz tüketim tahmininde yüksek doğrulukta belirgin avantajlara sahiptir [16].

Gao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yıllık doğal gaz tüketimini tahmin etmek için destek vektör makinesine ve geliştirilmiş yapay balık sürüsü algoritmasına dayalı yeni bir hibrit tahmin modeli önermişlerdir. Atıcı ve Pala, Ionospheric foF2 parametre tahmini için çalışmalarında hibrit modeli kullanmışlardır [17]. Qiao ve arkadaşları saatlik gaz tüketimi için çalışmalarında hibrit bir model önermişlerdir [18]. Tseng ve arkadaşları mevsimsel özelliğe sahip zaman serilerini tahmin etmek için hibrit bir gri model önermişlerdir [19].

Zaman serilerinin farklı yapılarından kaynaklanan ilişkileri daha iyi analiz etmek ve yüksek doğruluklu gelecek tahminleri yapabilmek için çoklu algoritmaların tekli algoritmalardan daha iyi olup olmadığını kanıtlamayı bir problem olarak kabul ettik ve bunun için çoklu-hibrit modeli önerdik.

R geliştirme ortamı zaman serileri kullanılarak yapılan kısa vadeli tahmin analizlerinde hibrit modellerin daha iyi bir tahmin performansına sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu çalışmanın dört ana katkısı şu şekilde özetlenebilir:

(1) Yapılan tahmin analizlerinde auto.arima, ets, thetam, nnetar, stlm ve tbats gibi istatistik-tabanlı ve derin öğrenme-tabanlı modellerinin farklı kombinasyonları kullanılmıştır.

(2) Tek başına kullanılan modellerle karşılaştırıldığında, bu çalışmada önerilen yeni hibrit modelin daha yüksek doğruluğa ve daha güçlü kararlılığa sahip olduğu kanıtlanmıştır.

(3) Önerilen hibrit model ile yapılan kısa vadeli tahmin işlemlerinde daha düşük MAPE değerleri ve daha yüksek doğruluk elde edilmiştir.

2. Materyiyal ve Yöntem

Burada yapılan araştırmanın amacı hibrit modellerin bağımsız modellerden daha iyi performans sergilediğini ispat etmeye yöneliktir.

Birinci yaklaşımdaki amacımız, farklı zaman serilerinin tahmin işlemlerinde kullanılması durumda, tahmin işleminde kullanılan modellerin ayrı ayrı performanslarını RMSE, MAE, MAPE ve MASE gibi dört ayrı metrik ile ortaya çıkarmak ve bunları karşılaştıracak bir format ile sunmaktır. Birinci yaklaşımda sekiz (8) adet yıllık zaman serisi, üç (3) adet mevsimsel zaman serisi ve onbir (11) adet aylık zaman serisi olmak üzere toplam olarak 22 adet zaman serisi kullanılmıştır. Bu yaklaşımda kullanılan zaman serilerinin içerikleri, kayıt sayısı, frekansı, en küçük değeri, en büyük değeri ve ortalama değeri gibi istatistiksel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Burada kullanılan zaman serilerinin kayıt uzunlukları 24 ile 528 arasında değişkenlik göstermektedir.

Birinci yaklaşımda 22 ayrı zaman serisi üzerinde ETS, STL, HOLT-WINTERS, ARIMA, THETAF, TBATS, NAİVE, NNTAR, MLP ve ELM gibi 10 tane farklı tahmin modeli kullanılmıştır.

Tablo 1 Aylık, yıllık ve mevsimlik zaman serilerine ait istatistiksel bilgiler

Veri kümesi	Kayıt sayısı	Türü/ Frekansı	En küçük	En büyük	Ortalama
AirPassengers	144	Aylık/12	104	622	280,30
UKDriverDeaths	192	Aylık/12	1057	2654	1670,31
USAccDeaths	72	Aylık/12	6892	11317	8788,79
Co2	468	Aylık/12	323,53	350,26	337,05
Nottem	240	Aylık/12	31,30	57,00	49,04
gas	476	Aylık/12	1646,00	66600,00	21415,27
fdeaths	72	Aylık/12	330	1141	560,7
mdeaths	72	Aylık/12	940	2750	1496
ldeaths	72	Aylık/12	1300	3891	2057
USVSales	528	Aylık/12	528	1262.2	670.5
USgas	238	Aylık/12	1368	3400	2057
BJsales	150	Yıllık/1	198,60	263,30	229,98
LakeHuron	98	Yıllık/1	576,96	581,86	579,0
Nile	100	Yıllık/1	456	1370	919,35
WWWusage	100	Yıllık/1	83	228	137,08
airmiles	24	Yıllık/1	412	30514	10527,83
Discoveries	100	Yıllık/1	0	12	3,1
lynx	114	Yıllık/1	39	6991	1538,02
nhtemp	60	Yıllık/1	47,90	54,60	51,16
JohnsonJohnson	84	Mevsimlik/4	0,44	16,2	4,8
UKgas	108	Mevsimlik/4	84,80	1163,9	337,63
austres	89	Mevsimlik/4	13067,3	15273,45	1766,15

Hibrit modellerin performansları ölçülürken 144 kayıttan oluşan aylık AirPassengers zaman serisi kullanılmıştır. AirPassengers zaman serisinin baştan 132 aylık verisi eğitim işlemi için ayrılırken geriye kalan 12 aylık veri ise test işlemi için kullanılmıştır.

Burada auto.arima (a), ets (e), thetam (f), nnetar (n), stlm (s) ve tbats (t) modelleri hibrit olarak kullanılarak ikili, üçlü, dörtlü ve beşli modellerinden elde edilen tahmin sonuçlarına ait, RMSE, MAE, MAPE ve MASE metrik değerleri sırasıyla Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'te verilmiştir. Tablolarda gösterilen MAPE metrik değerleri modellerin yüzde olarak yaptıkları hatayı ifade etmektedir. Dolayısıyla daha küçük MAPE değerleri daha yüksek doğruluk anlamına gelmektedir.

Tablo 2 HybridModel ile yapılan değişken ağırlıklı ikili model tahminlerine ait RMSE, MAE, MAPE ve MASE değerlerinin MAPE değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmış hali

No	Veri Seti	İkili model	RMSE	MAE	MAPE	MASE
1	AirPassengers	fn	17,04	13,8	2,87	0,45
2	AirPassengers	nt	16,94	13,4	2,92	0,44
3	AirPassengers	ae	19,27	14	3	0,45
4	AirPassengers	an	17,87	14,1	3,1	0,46
5	AirPassengers	af	19,89	14,4	3,23	0,47
6	AirPassengers	en	19,81	16	3,26	0,52
7	AirPassengers	ft	21,92	15,7	3,3	0,51
8	AirPassengers	et	23,08	16,7	3,44	0,54
9	AirPassengers	at	21,82	15,3	3,46	0,5
10	AirPassengers	as	21,66	17,2	3,62	0,56
11	AirPassengers	ns	24,17	20	3,95	0,65
12	AirPassengers	st	25,5	20	4,04	0,65
13	AirPassengers	es	29,96	23,6	4,61	0,77
14	AirPassengers	ef	28	23,5	4,78	0,77
15	AirPassengers	fs	33,06	25,7	4,96	0,84

Tablo 3 HybridModel ile yapılan değişken ağırlıklı üçlü model tahminlerine ait RMSE, MAE, MAPE ve MASE değerlerinin MAPE değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmış hali

No	Veri Seti	Üçlü model	RMSE	MAE	MAPE	MASE
1	AirPassengers	aen	16,85	13,1	2,81	0,42
2	AirPassengers	afn	16,45	13	2,83	0,42
3	AirPassengers	fnt	17,02	13,7	2,93	0,44
4	AirPassengers	ant	18,37	13,3	2,96	0,43
5	AirPassengers	aef	19,75	14,4	3,03	0,47
6	AirPassengers	ent	19,12	14,8	3,07	0,48
7	AirPassengers	aet	19,97	14,3	3,08	0,46
8	AirPassengers	aft	20,42	13,8	3,1	0,45
9	AirPassengers	ans	19,05	15,2	3,19	0,49
10	AirPassengers	ast	21,13	16,3	3,47	0,53
11	AirPassengers	nst	21,49	17,4	3,55	0,57
12	AirPassengers	efn	21,52	17,7	3,58	0,57
13	AirPassengers	aes	22,38	17,7	3,61	0,58
14	AirPassengers	eft	23,67	17,6	3,61	0,57
15	AirPassengers	afs	21,88	17,6	3,64	0,57
16	AirPassengers	ens	24,6	19,7	3,89	0,64
17	AirPassengers	fns	24,51	19,9	3,92	0,65
18	AirPassengers	est	25,74	19,8	3,95	0,64
19	AirPassengers	fst	25,81	20,2	4,04	0,66
20	AirPassengers	efs	29,97	23,9	4,69	0,78

Tablo 4 HybridModel ile yapılan değişken ağırlıklı dörtlü model tahminlerine ait RMSE, MAE, MAPE ve MASE değerlerinin MAPE değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmış hali

No	Veri Seti	Dörtlü model	RMSE	MAE	MAPE	MASE
1	AirPassengers	afnt	17,56	12,9	2,85	0,42
2	AirPassengers	aefn	17,63	13,7	2,9	0,44
3	AirPassengers	aent	17,96	13,6	2,93	0,44
4	AirPassengers	aeft	20,12	14,5	3,1	0,47
5	AirPassengers	efnt	20,2	15,3	3,14	0,5
6	AirPassengers	anst	19,05	15,1	3,2	0,49
7	AirPassengers	afns	19,21	15,5	3,23	0,5
8	AirPassengers	aens	20,05	16,2	3,33	0,53
9	AirPassengers	aest	21,67	16,6	3,43	0,54
10	AirPassengers	afst	21,25	16,4	3,45	0,53
11	AirPassengers	fnst	21,67	17,6	3,58	0,57
12	AirPassengers	enst	22,39	17,9	3,6	0,58
13	AirPassengers	aefs	22,77	17,9	3,64	0,58
14	AirPassengers	efns	24,72	19,9	3,93	0,65
15	AirPassengers	efst	26,03	19,9	3,96	0,65

Tablo 5 HybridModel ile yapılan değişken ağırlıklı beşli model tahminlerine ait RMSE, MAE, MAPE ve MASE değerlerinin MAPE değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmış hali

No	Veri Seti	Beşli model	RMSE	MAE	MAPE	MASE
1	AirPassengers	aefnt	18,32	14	2,99	0,46
2	AirPassengers	afnst	19,3	15,3	3,22	0,5
3	AirPassengers	aenst	19,93	15,6	3,25	0,51
4	AirPassengers	aefns	20,49	16,6	3,38	0,54
5	AirPassengers	aefst	21,95	16,8	3,46	0,55
6	AirPassengers	efnst	22,84	18	3,62	0,59

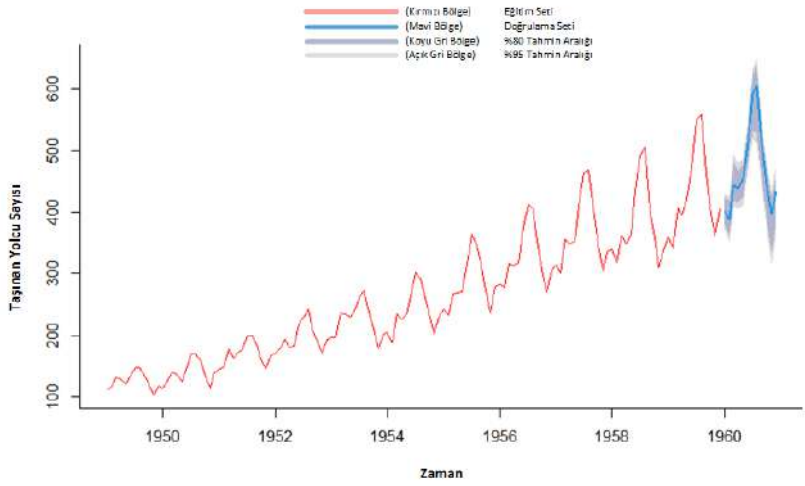
Tablo 6 HybridModel ile yapılan değişken ağırlıklı altılı model tahminlerine ait RMSE, MAE, MAPE ve MASE değerlerinin MAPE değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmış hali

No	**Veri Seti**	**Altılı model**	**RMSE**	**MAE**	**MAPE**	**MASE**
1	AirPassengers	aefnst	20,15	15,8	3,28	0,52

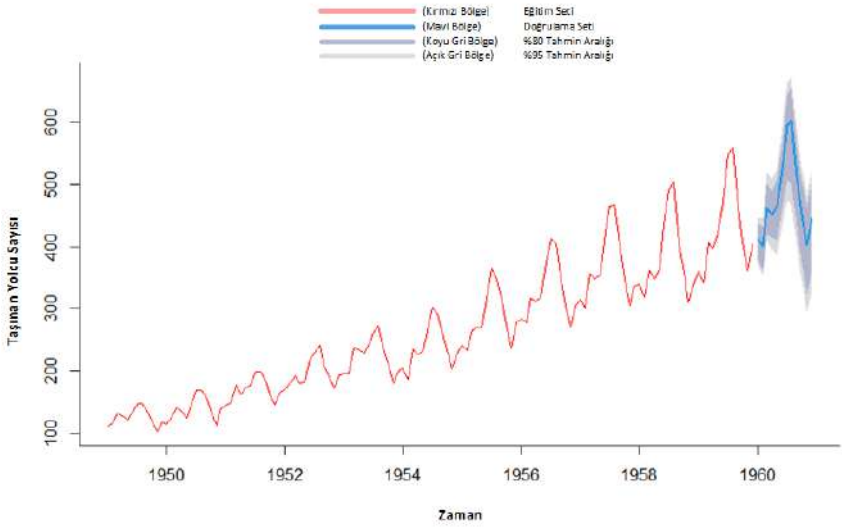
İkili, üçlü, dörtlü ve beşli modellere ait MAPE metriğine göre en iyi tahminleri yapan çoklu modellere ait grafikler sırasıyla Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te grafiksel olarak verilmiştir. Bir tahmin elde edildiğinde, rastgele değişkenin alabileceği olası değerler aralığının ortası tahmin edilmektedir. Genellikle, bir tahmine, rastgele değişkenin nispeten yüksek olasılıkla alabileceği bir dizi değer veren bir tahmin aralığı eşlik eder. Örneğin, %95'lik bir tahmin aralığı, %95 olasılıkla gerçek gelecek değeri içermesi gereken bir değer aralığı içerir.

Grafiklerdeki mavi çizgiler 1949-1960 yılları arasındaki verilerden meydana gelen AirPassengers verisetinin 1960 yılına ait 12-aylık tahmin ortalamalarını göstermektedir. Tahminlerin, tarihsel verilerde görülen mevsimsel kalıbı nasıl yakaladığına ve sonraki yıl için nasıl kopyaladığına dikkat edilmelidir. Aynı grafiklerdeki ADF koyu gölgeli bölgeler %80 tahmin aralığı göstermektedir. Yani, gelecekteki her değerin %80 olasılıkla koyu gölgeli bölgelerde olması beklenir. Buna karşın açık gölgeli bölgeler ise %95 tahmin aralığı göstermektedir.

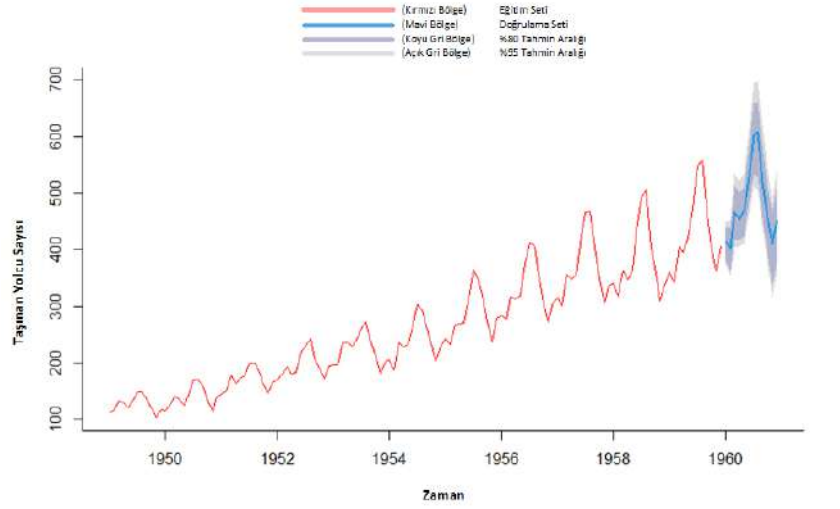
Bu tahmin aralıkları, tahminlerdeki belirsizliği göstermenin faydalı bir yoludur. Bu durumda tahminlerin doğru olması beklenir ve bu nedenle tahmin aralıkları oldukça dardır.



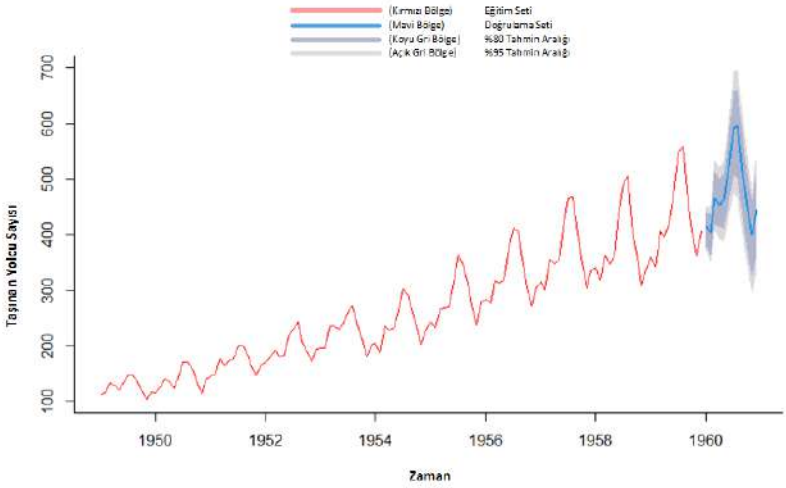
Şekil 1 Hybridmodel kullanılarak ikili grupta en iyi tahmini yapan "fn" modeline ait tahmin grafiği



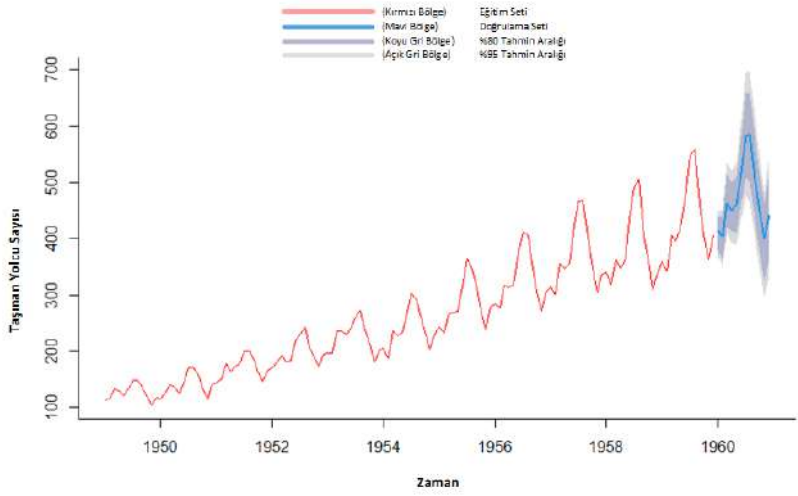
Şekil 2 Hybridmodel kullanılarak üçlü grupta en iyi tahmini yapan "aen" modeline ait tahmin grafiği



Şekil 3 Hybridmodel kullanılarak dörtlü grupta en iyi tahmini yapan "afnt" modeline ait tahmin grafiği



Şekil 4 Hybridmodel kullanılarak beşli grupta en iyi tahmini yapan "aefnt" modeline ait tahmin grafiği



Şekil 5 Hybridmodel kullanılarak altılı grupta en iyi tahmini yapan "aefnst" modeline ait tahmin grafiği

3. Sonuçlar ve Öneriler

Farklı yaklaşımlar ile gerçekleştirilen gelecek tahmin analizlerinin performansları için hem popüler hem de yorumlanması oldukça kolay olan ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) metriğinden faydalanılmıştır.

ETS, STL, HOLT-WINTERS, ARIMA, THETAF, TBATS, NAİVE, NNTAR, MLP ve ELM gibi 10 ayrı modelin AirPassengers aylık zaman serisi üzerinde kullanıldığı analiz işleminde MAPE metriğine göre en iyi sonuçlara sırasıyla MLP, ELM ve TBATS modelleri yardımıyla ulaşılmıştır. AirPassengers zaman serisi için kullanılan 10 modelin MAPE ortalaması, yani hata tahmin ortalaması 11.25% tir. Diğer bir ifadeyle modellerin ortalama doğruluğu 88,75% tir.

Tablo 2'de verilen ve AirPassengers aylık zaman serisi kullanılarak ikili model işbirliğiyle yapılan 15 adet tahmin işleminden, MAPE metriğine göre en iyi ilk üç sırayı sırasıyla thetam-nnetar (fn), nnetar-tbats (nt) ve auto.arima-ets (ae) model çiftleri teşkil etmişlerdir.

Tablo 3'de verilen ve AirPassengers aylık zaman serisi kullanılarak üçlü model işbirliğiyle yapılan 20 adet tahmin işleminden, MAPE metriğine göre en iyi ilk üç sırasında sırasıyla auto.arima-ets-nnetar (aen), auto.arima thetam-nnetar (afn) ve thetam-nnetar-tbats (fnt) modelleri yer almışlar.

Tablo 4'te verilen ve AirPassengers aylık zaman serisi kullanılarak dörtlü model işbirliğiyle yapılan 15 adet tahmin işleminden, MAPE metriğine göre en iyi ilk üç sırasında sırasıyla afnt, aefn ve aent modelleri yer almışlar.

Bu çalışmada yapılan analizlerde karşılaştırma için Airpassengers zaman serileri kullanılmıştır. Bunu tercih etmemizin nedeni içerisinde hem mevsimsel hem de eğilim bileşenlerini barındırıyor olmasının yanı sıra gerçek çalışma verilerinden elde edilmesi idi. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda hibrit model yaklaşımları farklı veri setleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.

Tablo 5'te verilen ve AirPassengers aylık zaman serisi kullanılarak beşli model işbirliğiyle yapılan 6 adet tahmin işleminden, MAPE metriğine göre en iyi ilk üç sırasında sırasıyla aefnt, afnst ve aenst modelleri yer almışlar.

Yapılan analizler, çoklu-hibrit model kombinasyonları yardımıyla yapılan tahmin sonuçlarının tek başlarına kullanılan model tahmin sonuçlarından daha iyi olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

1. E. Gjika, A. Ferrja, and A. Kamberi, "A Study on the Efficiency of Hybrid Models in Forecasting Precipitations and Water Inflow Albania Case Study," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 302–310, 2019.
2. P. N. Tattar, *Hands-on Ensemble Learning with R*. Birminghami, Mumbai: Packt Publishing Ltd, 2018.
3. S. Smyl, "A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting," *Int. J. Forecast.*, vol. 36, no. 1, pp. 75–85, 2020.
4. Z. Pala, "Examining EMF Time Series Using Prediction Algorithms With R," vol. 44, no. 2, pp. 223–227, 2021.
5. Z. Pala and M. Şana, "Attackdet: Combining web data parsing and real-time analysis with machine learning," *J. Adv. Technol. Eng. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–45, 2020.
6. Z. Pala and R. Atici, "Forecasting Sunspot Time Series Using Deep Learning Methods," *Sol. Phys.*, vol. 294, no. 5, 2019.
7. Z. Pala and A. F. Pala, "Comparison of ongoing COVID-19 pandemic confirmed cases / deaths weekly forecasts on continental basis using R statistical models," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 4, pp. 635–644, 2021.
8. Z. Pala and O. Özkan, "Artificial Intelligence Helps Protect Smart Homes against Thieves," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 11, no. 3, pp. 945–952, 2020.
9. S. Makridakis, E. Spiliotis, and V. Assimakopoulos, "Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward," *PLoS One*, vol. 13, no. 3, p. e0194889, 2018.
10. Z. Pala, İ. H. Ünlük, and E. Yaldız, "Forecasting of electromagnetic radiation time series: An empirical comparative approach," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 34, no. 8, pp. 1238–1241, 2019.
11. M. Längkvist, L. Karlsson, and A. Loutfi, "A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 42, no. 1, pp. 11–24, 2014.
12. D. Gidon, X. Pei, A. D. Bonzanini, D. B. Graves, and A. Mesbah, "Machine Learning for Real-time Diagnostics of Cold Atmospheric Plasma Sources," no. April, 2019.
13. V. Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, "Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward," *PLoS One*, vol. 13, no. 3, p. e0194889, 2018.
14. Z. Pala and İ. H. Ünlük, "Comparison of hybrid and non-hybrid models in

short-term predictions on time series in the R development environment," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 2, pp. 199–204, 2022.
15. Z. Pala, "Comparative study on monthly natural gas vehicle fuel consumption and industrial consumption using multi-hybrid forecast models," *Energy*, vol. 263, no. PC, pp. 1–21, 2023.
16. J. Liu, S. Wang, N. Wei, X. Chen, H. Xie, and J. Wang, "Natural gas consumption forecasting: A discussion on forecasting history and future challenges," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 90, no. January, p. 103930, 2021.
17. R. Atici and Z. Pala, "Prediction of the Ionospheric foF2 Parameter Using R Language Forecasthybrid Model Library Convenient Time," *Wirel. Pers. Commun.*, no. doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6 Prediction, pp. 1–20, 2021.
18. W. Qiao, K. Huang, M. Azimi, and S. Han, "A Novel Hybrid Prediction Model for Hourly Gas Consumption in Supply Side Based on Improved Whale Optimization Algorithm and Relevance Vector Machine," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88218–88230, 2019.
19. F. M. Tseng, H. C. Yu, and G. H. Tzeng, "Applied hybrid grey model to forecast seasonal time series," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 67, no. 2–3, pp. 291–302, 2001.

HAFİF BETON ve HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANILAN YAPI MALZEMELERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Öğr. Gör. Dr. İbrahim PINARCI

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Pazaryeri Meslek Yüksekokulu, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Bilecik, Türkiye.
e-mail: ibrahim.pinarci@bilecik.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9318-4325

1. Giriş

Beton günümüzde en çok kullanılan kompozit yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Betona olan talep arttıkça alternatif üretim yöntemlerinin de geliştirilebilmesi için çalışmalar hız kazanmıştır. Bugün oturduğumuz konutlardan tutunda fabrikalara, eğitim alanlarına, ulaşım yapılarına ve barajlara kadar birçok alanda betona ihtiyaç duyulmaktadır.

Bilindiği hali ile beton belirli oranlarda çimento, su ve agreganın homojen olarak karıştırılması ile meydana gelmektedir. Tabi ki doğru karışımın oluşturulabilmesi belirli kriterler ile sağlanabilmektedir. Bu kriterler, çimento özelliği başta olmak üzere, agrega, su ve bu malzemelerin çimento ile oranı, kür, çevre ve iklim şartları, kullanılan katkı maddeleri, kullanılan malzemelerin boyut ile çapları ve uygunluk şartlarının düzgün bir şekilde denetlenmesi şeklinde örneklendirilebilir [1].

2. Hafif Beton

Birim hacim ağırlıkları 800 ile 2000 kg/m^3 aralığında olan betonlardır. Hafif betonlar genellikle ısı ve ses yalıtımının yanında bina yükü açısından azalma sağlanabilecek alanlarda kullanılmaktadır. Bu türde beton üretiminde ana amaç hafif agregalar kullanılarak bina yükünü azaltmak ve dolayısı ile muhtemel bir sarsıntıda mukavemeti yüksek taşıyıcı yapı ürünleri imal edebilmektir. Yapılacak imalat sonucu elde edilecek betonların amaca hizmet edebilmesi için durabilite, elastisite, ısı ve su geçirgenlik, doygunluk ve aşınmalara karşı direnç gibi özellikleri dikkate alınmalıdır [2].

Hafif beton elde edebilmek için öncelikle birim ağırlığı düşürmek gerekir. Bunu yapabilmenin üç yolu vardır. Bunlardan ilki boşluk oranı yüksek, birim ağırlık bakımından düşük yapıya sahip doğal veya yapay hafif bir agrega kullanmaktır. İkincisi kimyasal ve fiziksel katkı maddeleri yardımıyla beton içerisinde büyük boşluklar oluşturabilmektir. Sonuncusu ise ince agregayı tamamen beton tasarımından çıkararak, üretim yapmaktır [3]–[5]. Geleneksel olarak tercih edilen yöntem olan düşük birim ağırlıklı agrega kullanımında mukavemet ve birim ağırlık açısında değerlendirildiğinde 3 sınıf oluştuğu görülmektedir. Bunlar yalıtım betonları, orta dayanıma sahip hafif betonlar ve taşıyıcı hafif betonlardır. Yalıtım betonları yoğunlukları (720 kgf/cm^2, 250-750 kg/m^3) çok düşük olduğundan sadece yalıtım için kullanılır. Blok duvarların imalatında orta dayanıma sahip betonlar (20-142 kgf/cm^2 ve 1.000-1.400 kg/m^3) ve yapı içerisinde kolon, kiriş, döşeme gibi taşıyıcı elemanların imalatında ise taşıyıcı hafif betonlar (173-418 kgf/cm^2 ve 1.500-2.000 kg/m^3) kullanılır [3], [5]–[8]. Tüm bu hafif betonların imalatında pomza, perlit, diyatomit, volkanik tüf ve genleştirilmiş kil gibi agregalar kullanılmaktadır [4], [9].

Hafif betonun tercih edilmesinde en önemli özelliklerden bir tanesi muhakkak birim hacim ağırlığının konvansiyonel betonlara göre çok daha düşük olmasıdır. Bu sayede taşıyıcı bir eleman imal edilirken taban mukavemet değerlerinin altına düşülmeksizin olabildiğince hafif beton üretebilme imkanı elde edilebilecektir. Böylece yapı zati yükündeki azalmanın verdiği avantaj ile daha düşük kesitle, daha az donatı kullanılarak ekonomik projelendirme yapılabilecektir. Tüm bu oransal azalmalar yapı üzerindeki deprem etkisini de bir miktar düşürecektir [3], [10]–[13]. Ayrıca ısıl iletkenlik katsayısındaki düşüklükleri hafif betonlar için standart betonlara kıyasla ısı yalıtımı sağlamakta ve yangına mukavemeti arttırmaktadır. [8], [13], [14]. Tabi ki her malzeme gibi olumlu özelliklerinin yanında olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Hafif betonlar boşluklu yapıya sahip olduklarından basınç ve dış etkilere karşı dayanım değerleri düşüktür. Elastisite modülü daha düşük olması nedeniyle şekil değiştirme aralığı daha fazla görülmektedir. Bu tür beton imalatında çimento doz ayarlaması daha yüksek oranlarda tutulması gerekmektedir. Bunun yanında dikkatli bir işçilik istemektedir. Böylece yapı maliyeti bir miktar artmaktadır [3], [7], [13], [15], [16].

2.1. Hafif Betonun Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

2.1.1. Olumlu Özellikler

- Hafif betonlar yapı yükünü düşürmeleri ile doğru orantılı olarak düşey yüklerde azalma sağlarlar. Böylelikle yer sarsıntılarında yatay kuvvetler yapıyı daha az etkiler.
- Düşen yükler sayesinde, imalatı yapılacak kısımların boyutlarında ekonomi sağlayacak boyutta küçülme meydana gelir.
- Hafif betonların tercih edilme sebeplerinden birisi olan ısı ve ses izolasyonu kısmen sağlanarak izolasyon ürünlerinden tasarruf sağlanır.
- İklim şartlarının getirdiği muhtemel donma çözülmelere ve yangın gibi durumlara karşı direnci yüksektir.
- Elde edilen hafif ürünler olduğu için başlangıçtan uygulama aşamasına kadar kolay bir süreç izlenir.
- Ülkemiz coğrafyasında bol miktarda bulunan bu yapı malzemelerinin kullanımı ve ekonomiye kazandırılması sağlanmış olacaktır [15].

2.1.2. Olumsuz Özellikler

- Hafif betonlar boşluklu yapıya sahip olduklarından dayanıklılıkları düşüktür.
- Aşınma dirençleri zayıftır.

- Elastisite modülü değerleri düşüktür.
- İlerleyen yaşlarda sabit yükler altında deformasyonlar meydana gelir. Normal betonlara göre çatlaklar daha fazla oluşur. Bunun sebebi büzülme ve su kaybıdır.
- Nem gibi iklimsel faktörlere karşı ekstra önlemlerin alınması gerekir [15].

2.2. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Pomza

Pomza yeryüzünde oldukça yüksek miktarda bulunan doğal puzolanik bir malzemedir. Rezervlerin en yüksek olduğu ülkeler başta A.B.D olmak üzere İtalya ve Türkiye'dir. Ülkemizde ise oranı toplam rezervlerin %15' i kadardır. Pomzaya Türkiye'de genellikle volkanik alanlarda Doğu Anadolu Bölgesi başta olmak üzere Kayseri, Nevşehir ve Isparta'da rastlanmaktadır. Bu çerçevede hatırı sayılır bir oranda sahip olduğumuz pomzanın ekonomiye bir şekilde kazandırılması yerinde olacaktır [17], [18].

Genel olarak pomzayı tanımlayacak olursak volkanik patlamalar sırasında çok hızlı bir şekilde soğuyan, içerisindeki gazlarında ani bir şekilde yapıyı terketmesi ile yüksek miktarda gözenek içerikli olarak meydana gelen silisçe zengin volkanik bir kayaçtır. Pomza yapısındaki gazın miktarına göre püskürme durumu değiştiğinden geniş bir alana iri ve ufak şekilde yayılma gösterirler. Yapı olarak kristaliktir ve cam grubu olarak değerlendirilir [19]. Pomza günümüzde kullanımı artan ve her geçen gün çalışmalarda kendine yer bulan bir yapı malzemesi olarak değer kazanmaktadır. Bu çalışma alanlarından bazıları hafif beton üretimi, betonda agrega olarak kullanımı, puzolonik malzeme olarak kullanımı ve beton özellik geliştirici şeklinde sıralanabilir [20]–[24]. Pomza, mohs cetveline göre 5 ile 6 sertliğe sahip, yoğunluğu 0,5-2 g/cm^3 aralığında, görünüş bakımından beyazdan griye, kırmızıdan siyaha kadar farklı renklerde görülebilen asidik ve bazik olmak üzere iki tipte bulunabilen bir malzemedir [25], [26]. Gözenekleri açısından bakıldığında mikrodan başlayarak göz ile görülebilir boyutlara kadar ve camsı bir yapı ile bölünmüş şekilde olduğu görülür. Bir yapı malzemesi olarak pomza yüksek miktarda ısı iletkenliği sağlamaktadır. Bunun temel sebebi %75-80 oranında boşluklu olması ve ağırlığının %50'sinden fazla su emebilmesindendir [17]. Söz konusu bu gözenekler işlenmemiş durumdayken mukavemetini düşürmektedir. Fakat bu durumda bile taşıyıcı duvarlarda kullanılan taşlardan beklenen dayanım değerlerini sağlamaktadır [27]. Bu çerçevede en önemli pozitif özellikleri, düşük yoğunluğu ile elde edilen hafif betonlar sayesinde, yapının sabit yüklerini ve temel ebatlarını düşürmek ve ilaveten ısı ve ses yalıtımına katkı sağlamaktır [17].

Pomzanın inşaat sektöründe kullanım alanları aşağıda sunulmuştur [17].

- Hafif yapı elemanı üretimi
- Prefabrik yapı kısımları imalatı
- İzolasyon olarak dolgu malzemesi
- Hafif sıva, harç ve beton üretimi
- Dekorasyon için yapılan uygulamalar [17]

2.2.2. Diatomit

Tek hücreli su yosunlarının zaman içerisinde fosil haline gelerek silisli bölgelerinden meydana gelen organik ve sedimenter bir çökeltidir. Bunun yanında biyolojik yapıda tek doğal mineraldir [28]. Spektroskopik yöntemlerle detaylı incelendiğinde yıldız, çubuk ve silindir biçiminde, boşluk kısımları fazla delikli bir yapısı vardır ve yüksek oranda silisyum içerir. Bu durum hafif olmalarının sebebidir [29].

Kuru vaziyette özgül ağırlığı 0,15-0,40 g/cm^3, mohs ölçek sertliği 4,5-6 aralığında, kütlesine göre boşluk miktarı ise %80-85 aralığında, görünümü una benzer gevşek yapıda özelliklere sahiptir. Kütlesinin üç katına kadar su emme özelliğine sahiptir. Renk bakımından beyazdan griye kadar giden renklerdedir. Fakat içeriğindeki elementler bunu siyah tonuna yaklaştırabilir [30], [31]. Bu mineralin kimyasal problemler açısından dayanıklı bir yapısı vardır. Çoğu asitten zarar görmemektedir. Elektrik, sıcaklık ve ses iletimi çok düşüktür. Bunun yanında boşluk yapısı, düşük yoğunluğu, yüksek elastikiyeti, izolasyon ve dayanıklılık özellikleri tercih sebepleri arasında sayılabilir [29].

Türkiye'de bulunan 13 bölgedeki diatomit yatağından elde edilen veriler ve kimyasal açıdan ana bileşenlerin üst, alt ve ticari değer açısından sınır değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir [24], [28].

Çizelge Error! No text of specified style in document..**1.** Türkiye diatomit yataklarındaki min/max kimyasal değerleri ve kimyasal bileşim sınır değerleri.

Kimyasal	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	A.K.	Alkaliler	Kızdırma b1
% min	65,42	0,81	0,64	0,71	0,39	3,54		
% max	87,48	3,42	2,48	9,37	7,20	13,42		
Sınır Değeri	En az 85	En çok 5	En çok 1,5	En çok 1	En çok 0,5		En çok 1	En çok 6

Diatomit yatakları dünyanın her yerinde bulunmaktadır. Ancak rezervlerin en yüksek olduğu yer ABD' dir [29]. Dolayısı ile tüketim oranı da en yüksek buradadır. Bunun yanında Kanada, Avustralya, Ortadoğu ve Arap ülkelerinde kullanımı gün geçtikçe artış göstermektedir [32].

Üretim verilerine göre 2010 yılında Amerika Jeolojik Araştırma Kurumunun yaptığı bir çalışmada A.B.D. %30, Çin %25, Danimarka %12, Meksika %7, Japonya %6, Bağımsız Devletler Topluluğu %4, Fransa %4, İspanya %3, Türkiye %2, Arjantin %2, İzlanda %1, İtalya %1 ve diğer ülkeler %3 oranında diatomit ürettiği saptanmıştır. Türkiye' deki yataklar ise Ankara, Afyon, Kayseri, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, Eskişehir, Kütahya, Nevşehir ve Van bölgelerinde yoğunlaşmaktadır [32].

2.2.3. Perlit

Perlit pomzadan elde edilen, yapısında %2-5 oranında su bulunduran camsı yapıda obsidyen bir mineraldir. Perlit ham halde ve ısıl işlemlerle genleştirilmiş olarak iki şekilde kullanılabilir [33], [34]. Renk bakımından incelendiğinde saydam griden siyaha kadar değişmekle birlikte genleştirme işlemi sonrası tamamen beyaz renge dönüşür [35][36]. Ham perlitin 700–1200 °C arasında ısıl işleme tabi tutulması ile yapısındaki su bünyeyi terkeder. Bu sayede gözenek miktarını daha da artırarak kendi hacminin 20 katı kadar bir hacme ulaşabilir [33], [34]. Dünyada perlit rezervleri bakımından en zengin ülke, ABD Jeolojik Araştırma Kurumu (USGS) kaynaklarına göre, belirlenen 5,6 milyar ton ile Türkiye'dir [37].Söz konusu bu perlit yataklarının önemli miktarı Manisa, İzmir, Eskişehir, Kütahya ve Erzincan'da bulunmaktadır.

Bu türde agregalar çimentoya ikame veya harç üretiminde hafif beton imalatı, elastikiyet, ses geçirgenliğinin düşüklüğü, ısıya karşı mukavemet, işlenebilme

ve ekonomiklik gibi özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe kullanımı artmaktadır [34][38]. Hafif agregalar harçların özelliklerini ciddi derecede olumlu etkilemekte hatta kullanılan genleştirilmiş perlit harç yoğunluğunu azaltarak sıva kaplama alanı miktarını yükseltmektedir[38]. Perlit ham halde çok farklı tane boyutunda üretildiği için dolgu malzemesi olarak da kullanılabilirliği söz konusudur. Bunun yanında alkali silika reaksiyonlarını karşıda direnci artırdığı tespit edilmiştir [36], [39]. Kullanılan perlit hangi türde olursa olsun yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içerdiğinden dolayı betonlarda dayanımı ve dayanıklılığı olumlu yönde etkilemektedir [40].

Perlitin kimyasal özelliklerine genel olarak bakıldığında Çizelge 2.2' de görülen özelliklere sahiptir [41].

Çizelge 2.2 Perlitin kimyasal özellikleri [35].

Kompozisyon	**Miktar (%)**
SiO_2	71,0-75,0
Al_2O_3	12,5-18,0
Na_2O	2,9-4,0
K_2O	0,5-5,0
CaO	0,5-2,0
Fe_2O_3	0,1-1,5
MgO	0,02-0,5
TiO_2	0,03-0,2
H_20	2,0-5,0
MnO_2, FeO, Cr	0,0-0,1
Ba	0,0-0,05
PbO	0,0-0,03
NiO, Cu, B, Be	Eser
SO_3, Serbest Silis ve klorürler	0,0-0,2

Perlit ham durumdayken yapısında yüksek oranda silis ve alümin barındırır. Dolayısı ile kalsiyum içerikli bağlayıcı malzemelerle reaksiyona girebilir. Bu özelliği ile çimentonun dayanım kazanmasında etkili olduğu için inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Tane boyutuna göre kullanım alanları da değişiklik göstermektedir. Perlit bu haliyle asit ve baz saldırılarına karşı mukavemeti yüksek olduğundan yer altı pis su atık borularında, don etkisinin yüksek olduğu kesimlerde binaların çatılarında, havuz inşasında, ısı yalıtım çözümü olarak sıva şeklinde, biriket tarzında hafif yapı elemanı şeklinde birçok alanda kullanımı görülmektedir [36], [42].

Perlite, yüksek sıcaklık uygulanarak, yapısında bulunan %2 ile %6 oranları arasındaki su hızlı bir şekilde bünyeden uzaklaştırılır. İşlem sonucunda perlit

patlayarak griden beyaz renge dönüşür. Bu şekilde oluşturulmuş yeni ürüne genleştirilmiş perlit denir [43]–[45]. Perlit genleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra öncelikle elastikiyet, düşük yoğunluk, ses geçişine direnç, ateş ve ısıya dayanım gibi sebeplerden yapı sektöründe tercih edilir. Bu hali ile binaların çatı ve zeminlerinde yalıtım amaçlı, hidrolik bağlayıcı malzemesi, yerine göre değişmekle beraber agrega konumunda hafif beton imalatı, yüzeyler arasında ısı ve ses yalıtımı sağlamak amaçlı, çeşitli alanlarda dolgu malzemesi şeklinde kullanılmaktadır [42].

2.2.4. Volkanik Tüf

Yer küresinde bulunan magma yapısında, gazlar ve çeşitli çözeltileri içerir. Sıcak ve sıvı haldeki magma yeryüzüne bir yolunu bularak çıkar bu sonuca volkanizma olayı denir. Volkanik patlamalar ile yeryüzünde atmosfer ile temas eden magma hızla soğuyarak camsı bir görünüm meydana getirir ve katılaşır [46]. Oluşan bu camsı doku havanın da etkisiyle zeolitleşme gösterir. Zeolit alümin, silis içeren mikro ve kristal yapıda bir malzemedir [47]. Bu durum oluşan ürünün puzolonik açıdan daha iyi hale gelmesini ve dolayısı ile puzolonik aktivitesini yükseltmektedir. Ayrıca ocaktan çıkarıldıklarında yumuşak vaziyette olan tüf ve benzeri yapılar zamanla yapısındaki nemliliği kaybederek daha sert ve mukavemeti yüksek bir duruma gelirler [47], [48]. Volkanik tüf, söz konusu püskürme sırasında meydana çıkan kül, kum, lav materyalleri gibi kısımların birleşip sıkılaşıp akabinde de katılaşması ile meydana gelmektedir. Tüflerin görünümü ağırlıkça hafif, bol gözenekli bir şekildedir. Genellikle sarı krem tonlarında olmakla birlikte ayrılma gösteren bölgelerde kahverengi tonları, kayacın yoğunluğu artan bölgelerinde zeolit ve klorit yoğunluğuna göre yeşil renk tonlarının da görülmesi muhtemeldir [46]. Ülkemiz volkanik aktivite bakımından yoğun bir dönem geçirmiş olduğu için bu malzeme açısından oldukça zengindir. Ayrıca doğal ürünler bakımından eskiye dayanan ve dünyada en çok rezerv barındıran bölgelerdendir [47]. Tüf yataklarına ülkemizin birçok bölgesinde rastlanmaktadır. Bunlar başta Nevşehir olmak üzere Ankara, Eskişehir, Kayseri, Konya ve Niğde olarak sayılabilir. Volkanik tüflerin kimyasal yapısı bölgelere göre farklılık göstermekle birlikte bazıları Çizelge 2.3' te sunulmuştur [48].

Çizelge 2.3. Ülkemizde bazı bölgelerde volkanik tüflerin kimyasal analizi[48]

Kompozisyon	Gölcük bölgesi (Isparta)	Nevşehir bölgesi	Van-Bitlis bölgesi (Ahlat Dağı)
SiO_2	61.55	68.50	69.00
Al_2O_3	15.50	14.00	14.65
Fe_2O_3	6.05	3.00	2.50
CaO	2.24	1.50	1.10
MgO	2.40	1.40	0.53
Na_2O	3.30	3.25	3.50
K_2O	3.43	3.50	3.50
TiO_2	0.40	0.25	0.38
SO_3	0.94	0.002	0.40
Kızdırma Kaybı	1.40	3.90	4.63

2.2.5. Genleşmiş Killer

Bir takım kil ve kil bulunduran şistlerin sinterleşme periyodu hızlı meydana gelir. Bu malzemeler 1100-1300˚C aralığında ısıtıldığında hacminde bir büyüme oluşur. Bu şekildeki oluşan yeni ürüne genleştirilmiş kil denir. Hafif yapı elemanlarının üretiminde mukavemeti en yüksek olan ürünler genleştirilmiş kilden elde edilenlerdir [49], [50]. Hali hazırda Avrupa' da kullanımı uygun olarak görülen, genleşme özelliğine sahip killer aktüel deniz dibi killeri, acı su killeri, lös killeri, jura killeri, killi şistler ve şifertonlardır. Genleştirilmiş killer, yüksek SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oranı ve gözenekli yapısı ile tercih edilen hafif yapı elemanı üretim malzemeleridir [50], [51]. Şekilsel olarak küre bir görünüşte siyah iç yapıya ve kahverengi bir dış görüntüye sahiptir. Bu renklerin tonları yapısındaki demir ve karbon oranına göre farklılık gösterebilmektedir. Görünüm olarak pürüzsüz olmakla birlikte mikro açıdan bakıldığında pürüzlü ve gözeneklidir. Bu durum mekanik özelliklerini etkilemektedir [52]. Agreganın fazla miktarda gözeneğe sahip olması su emilimini de aynı oranda arttırmaktadır. Bu durum sınırlandırılmazsa betonun gelişim sürecini olumsuz etkileyecektir. Sinterlenmiş agregaların gevşek birim hacim ağırlıkları 1600 ile 2100 kg/m^3 aralığında değişkenlik göstermektedir [52], [53]. Ülkemizde bol miktarda bulunan killerin ekonomiye katılması gerekmektedir. Hafif yapı elemanlarında kullanılan pomza, genleştirilmiş kil ve perlit gibi ürünlerle binalarda deprem yükünün azaltılmasının yanı sıra ses, ısı izolasyonu ile tasarruf sağlanması da mümkün olacaktır [51].

Genleştirilmiş killerin üretim esasları 1918 yılında belirlenmiş ve 1928 yılında ilk üretim gerçekleştirilmiştir. Kuru ve sulu olarak iki türde üretim yapılabilmektedir. Kuru yöntemde çok inceltilen killer sabit hızla dönen standart

bir kapta su ilavesi yapılarak oluşturulur. Bu durumda kil parçaları merkezkaç kuvvetinin de etkisiyle yoğun bir şekilde sıkışıp katılaşmaktadır. Sulu sistemde ise ocakta üretilen killer tesiste homojen bir şekilde değirmenlerde öğütülür. Sonra su ve genleştiriciler ilave edilerek ince yapıda plastik bir malzeme elde edilir. Akabinde kalıplardan geçirilerek istenilen şekil verilir ve döner fırınlarda kurutma işlemine tabi tutularak şekil alması sağlanır. Bu durumdaki malzemeye ani ve yüksek ısı uygulanarak yakma işlemi tamamlanır. Boyutlarına göre ayrılarak stoklanır [50].

Genleşen killer 1850 yılında keşfedilmiş ancak 1950 yıllarında inşaat sektöründe kullanılmaya başlamıştır. Amerika başta olmak üzere kullanılmaya başlanan ve halen kullanımı artan killer günümüzde ABD'nin yıllık hafif yapı agregası üretiminin yaklaşık %65' ini teşkil etmektedir [54]. Avrupa da zengin kil kaynakları sebebiyle Danimarka'da üretim çalışmaları yapılmıştır. Almanya'da ise üretim ancak 1955 yıllarında gerçekleşebilmiştir. Bunun dışında Rusya, Polonya ve Çekoslovakya gibi doğu bloğu ülkelerinde ciddi oranda üretim göze çarpmaktadır. Ülkemizde ise rezervlerimizin kalitesi bakımından ilk çalışmalar 2000 yılında projelendirilerek başlamış ancak kayda değer bir atılım görülememiştir. Bu sebeple yüksek orandaki rezervlerimiz için ciddi bir literatür çalışması yapılarak ürünün ekonomiye katılması gerekmektedir [55].

Genleştirilmiş killer su geçirgenlik özelliğine sahiptir. Bu yapıları ile drenaj işlemlerinde filtrasyon malzemesi olarak kullanılırlar. Böylece dona karşı dayanımı da yükseltmektedir. Ayrıca zemin döşeme yapılarında dolgu malzemesi olarak değerlendirilmekte ve çökmeler sınırlandırılmaktadır. Bu malzeme ile ısı, ses ve nem bakımından izolasyon sağlanabilmektedir. Ürün yangına çok dayanıklıdır ayrıca hafif olduğu için binaya ek yükler getirmez. Genleştirilmiş killer düşük özgül ağırlık ve yüksek dayanım ile düşey yöndeki toprak basıncını, kaya dolgulara göre %75 azaltmaktadır. Bu özelliği ile istinat duvarları, kazık duvarları, köprü arka dolguları gibi alanlarda basıncı dengeleyerek yapı sağlamlığına destek sağlar. Zemin altı inşa edilen tünel, otopark ve boru hatlarında stabilite sağlayarak deprem etkilerini azaltır [54].

3. KAYNAKLAR

1. Göncüoğlu, T. (2022). Kaplanmış Agregaların Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliği. Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri ABD., Yüksek Lisans Tezi, Düzce.
2. İpek, S. (2013). Improving the ductility properties of lightweight concretes by steel fiber addition. Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep.
3. Sayın, N. (2022). Hafif Beton Atıklarının Geri Dönüşüm Malzemesi Olarak Beton Teknolojisinde Kullanımının Araştırılması. Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Bitlis.
4. Şimşek, O. (2009). Beton ve Beton Teknolojisi. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
5. Gönen, T. (2009). Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Doktora Tezi, Elazığ.
6. Kamolzoda, T. (2018). Farklı Dayanımlı Bazı Özel Betonlar ile Geleneksel Betonun Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışlarının Karşılaştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
7. Oğuz, M. (2019). Geri Dönüştürülmüş Betonların Köpük Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Bartın.
8. Öztürk, E. (2019). Yapılarda Hafif Beton Kullanımında Son Gelişmeler. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
9. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S. (2015). Beton. İzmir: Birleşik Matbaacılık.
10. Alyamaç, K.E. (2008). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği Prensipleriyle İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Doktora Tezi, Elazığ.
11. Yolcu, C. ve Girgin, Z.C. (2017). Dünyada Yapay Hafif Agregalı Yapısal Beton Uygulamaları ve Doğal Pomza Agreganın Kullanılabilirliği. Aurum Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi, 1(2), 59-67.
12. Kaldı, C. (2011). Taşıyıcı Hafif Beton Tasarımı ve Çok Katlı Binalarda Kullanımı. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
13. Dikici, T. (2010). Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemesi ABD., Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

14. Karaca, E.O. (2020). Bitlis Pomzası ile Üretilen Farklı Çatlak Derinliklerine Sahip Kirişlerin Güçlendirilmesi. Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Bitlis.
15. Konuk, H. (2003). Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
16. Akol, C. (2010). Genleştirilmiş Vermikulit İçeren Hafif Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Davranışı. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Sivas.
17. Ergin, A. (2016). Bitlis Yöresi Pomzasının Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Mineral Katkı Olarak Kullanılabilirliği. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans, Elazığ.
18. Kayan, Y., Karaşin, A. ve Işık, E. (2020). Pomzadan İmal Edilmiş Çelik Lif Katkılı Bimsblokların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Dicle Üniv. Müh. Fak. Der, 11(2), 723-730.
19. Özün, S. ve Sivrikaya, O. (2018). Endüstriyel Hammadde Olarak Pomza: Önemi, Özellikleri ve Kullanım Alanları. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018), 1471-1476. Adana.
20. Yıldız, K., Dorum, A. ve Koçak, Y. (2010). Pomza Zeolit Ve Cem I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik Ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 25(4), 867-879.
21. Tolgay, A., Yaşar, E. ve Erdoğan, Y. (2004). Nevşehir Pomzasının Agrega Olarak Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. İzmir.
22. Albayrak, M., Yörükoğlu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Aruntaş, H. Y. ve Girgin, İ. (2007). Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. Build Environ, 42(9), 3161-3165.
23. Yıldız, K. ve Demirel, C. (2014). $MgSO_4$ Etkisine Maruz Rijit Yol Kaplamalarında Pomza ve Zeolit Katkılı Betonun Kullanılabilirliği. Politeknik Dergisi, 17(1) (Özel Sayı), 23-29.
24. Pınarcı, İ. (2022). Diatomit ve pomza ikameli çimentoların hidratasyon reaksiyonlarının ve yüzey özelliklerinin spektroskopik yöntemlerle araştırılması. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri ABD. Doktora Tezi, Düzce.
25. Eroğlu, G. ve Şahiner, M. (2020). Dünyada ve Türkiye'de Pomza. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.

26. Elmastaş, N. (2012). Türkiye Ekonomisi İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşi). Journal of International Social Research, 5(23), 197-206.
27. Davraz, M. ve Gündüz, L. (1997). Isparta Yöresi Pomza Taşının Hafif Yapı Elemanı Olarak Değerlendirilmesi Üzerine Bir Analiz., 61-70. Isparta.
28. Çetin, M. ve Taş, B. (2012). Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diyatomit. Tübav Bilim Dergisi, 5(2), 28-46.
29. Dinler, E. (2012) Yüksek Sıcaklığın Diyatomit Katkılı Harçlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması., Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitim ABD., Yüksek Lisans Tezi Ankara.
30. Savaş, M. (2012). Diatomit Ve Zeolit İkameli Betonların Kimyasal Etkilere Karşı Davranışlarının Araştırılması. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi ABD., Yüksek lisans tezi, Düzce.
31. Aruntaş, H.Y. (1996). Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ABD., Doktora tezi, Ankara.
32. DPT. (2001). Genel endüstri mineralleri IV (bentonit-barit-diatomit-aşındırıcılar", Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Ankara.
33. Sari, A., Tuzen, M., Citak, D. ve Soylak, M. (2007). Adsorption characteristics of Cu(II) and Pb(II) onto expanded perlite from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials, 148(1-2), 387-394.
34. Uygun, O. (2022). Doğal Zeolit, Perlit Ve Kil Mineralleri İle Sulu Çözeltilerden Kurşun İyonlarının Adsorpsiyonu. Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
35. DPT. (2001). 8. Kalkınma Planı (2001-2005) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Ankara.
36. Şanaldı, S. (2022). Perlitli Geopolimer Harçların Donma-Çözülme Davranışının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
37. U.S. Geological Survey, "Mineral commodity summaries 2017 ," 2017.
38. Torres M. L. ve García-Ruiz P. A. (2009). Lightweight Pozzolanic Materials Used In Mortars: Evaluation of Their İnfluence on Density, Mechanical Strength and Water Absorption. Cem Concr Compos, 31, 114-119.
39. el Mir, A. ve Nehme, S. G. (2017) Utilization of Industrial Waste Perlite Powder In Self-Compacting Concrete. J Clean Prod, 156, 507-517.
40. Rashad, A. M. (2016) A Synopsis About Perlite As Building Material–A Best Practice Guide for Civil Engineer. Construction and Building Material. 121, 338-353.

41. Çiçek, Y. E. (2002). Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton Ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ABD., Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
42. DPT. (2001). Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza, 96 Perlit, Vermikülit, Flogopit, Genleşen Killer), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı. Ankara.
43. http://www.ultraper.com/page_id=32.htm. (2022). Erişim Tarihi: 15.11.2022.
44. Altuncı, Y. T. (2019). Genleştirilmiş Cam Agregalı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Şap Harçlarının Performans Özellikleri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Doktora Tezi, Isparta.
45. Engin, C. (2018) Farklı Tane Boyutlu Genleştirilmiş Perlit Agregası İle Üretilen Ultra Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Van.
46. Keleş, E. (2020). Bitlis Pomzası, Bitlis Volkanik Tüfü, Afşin-Elbistan Uçucu Külü Ve Kirecin Yüksek Plastisiteli Kile Olan Etkisi," Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
47. Katrancı, F. (2018). Nano Silis, Mikro Silis Ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi Ve Özelliklerinin Araştırılması. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Doktora Tezi, Malatya.
48. Sınıksaran, M. (2012). Volkanik Tüf Tozları ile Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. ABD., Yüksek Lisans Tezi, Konya.
49. DPT. (2005). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Yapı malzemeleri - Genleşen Kiler. Ankara.
50. Güneş, O. (2019). Genleştirilmiş Kil Agregası ile Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
51. http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/genlestirilmis-kil. (2022). Erişim Tarihi: 17.11.2022.
52. Uslu, M. (2019). Genleştirilmiş Kil Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD., Yüksek Lisans Tezi, Bayburt.

53. Miguel, C. S. ve Pedro, D. S. (2014) Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate. Construction and Building Material, 63, 89–96.
54. Can, R. (2020) Genleştirilmiş Kil Agregaları ile Hazırlanan Kompozit Malzemelerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanılabilirliği. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
55. Kıral, N. (2002). Genleşen Kil Aramaları, MTA Raporu. Ankara.

DİJİTAL DÖNÜŞÜM ÇAĞINDA GELECEĞİN MESLEKLERİ

Öğr. Gör. İlhan UYSAL

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Emin Gülmez Teknik Bilimler MYO Bilgisayar Teknolojileri Bölümü
ORCID: 0000-0002-6091-9110

1. GİRİŞ

Son zamanlarda sıklıkla dile getirilen geleceğin meslekleri aslında yaklaşık yüz elli yıldır insan yaşamının doğal bir bölümüdür. Örneğin bir zamanların en çok saygı duyulan mesleklerinden biri olan arzuhalcilik gelişen teknolojiye yenik düşmüştür. İnsanlar içinde önemli bir yere sahip olan arzuhalciler zamana yenik düşerek teknolojisinin gerisinde kalmış ve günümüzde daktilonun yerini bilgisayar aldığı için önemini yitirmiştir. Meslekler üzerindeki değişim ya da gelişim bazen doğal olarak yok olma bazen de güncelliğini kaybetme şeklinde insanların karşısına çıkabilir. Aslında bu değişim ya da gelişimi mesleklerin yok olması şeklinde değil, mesleklerin yeni bir çehre kazanması gibi düşünmek daha gerçekçi olacaktır. Bu dönüşüm ve gelişimin gerçekleşmesinde insanlığın bu süreci nasıl karşılayacağı ve nasıl bir direnç ortaya koyacağı da önemli bir kriter olarak görülmektedir.

Yıllar önce sağlık kuruluşlarına giderken insanlar yanlarında sağlık karnesi taşırlardı. Tıbbi özgeçmişleri ile ilgili tüm bilgiler evraklar halinde dosyalarda saklanırdı. Dijital dönüşüm sayesinde insanlık evrak işinden bir nebze kurtulmuş oldu. Ülkemizde e-nabız uygulaması sayesinde sağlık kuruluşlarından randevu alma, doktorların yazdığı reçeteler, raporlar, koyulan tanı, tahlil sonuçları, aşı takvimi, radyolojik görüntüler vb. tüm işlemler yapılabilmektedir. Bu gibi yenilikler sayesinde insanlar elde evrak taşımaktan kurtulmuş, dijitalleşen kurumlar ile de iş yükü azalırken daha çok verim elde edilmektedir.

Dijital dönüşümün etkisiyle inovasyon ve kullanıcı odaklı, düzgün, sistemli ve etkin çalışma ortamları meydana gelmektedir. Dijital dönüşüm çağında tüm verileri ve sistemleri entegre ederek yapılan uygulamalar günden güne artmakta ve gelişmektedir. Kullanıcı verileri kayıt edilerek birçok hizmet çevrim içi platformlarda dijital olarak verilmektedir. Bunun sonucu olarak da insanlar zamandan ve maliyetten tasarruf ederek stresten uzaklaşmaktadırlar. Dolayısıyla yaşamın her alanında insanlara olumlu bir şekilde geri dönüşü olmaktadır.

Teknolojinin gün geçtikçe gelişmesi sanayi devrimlerini de etkilemiştir. Geçmiş sanayi devrimlerine kıyasla Endüstri 5.0'ın yalnızda halihazırdaki toplumsal yapıyı tesir etmekle yetinmeyip Toplum 5.0 olarak isimlendirilen yeni bir aşamaya geçilmesine sebep olacağı öngörülmektedir (Canbay ve Demircioğlu, 2021). Endüstri 5.0 ile insan ve yapay zekâ etkileşimine dayanan makinelerin birlikte çok iyi bir sistemde ve insanı merkeze alarak ahenk içinde çalışması beklenmektedir.

2. DİJİTAL DÖNÜŞÜMDE VERİ ve YAPAY ZEKA

Dünya Ekonomik Forumunun Geleceğin Meslekleri 2020 raporuna göre bulut bilişim, büyük veri ve e-ticaretin yükseliş trendi devam etmektedir. Bununla birlikte, dijital çağın yeni güvenlik açıklarını yansıtan şifreleme ve siber güvenliğe olan ilginin giderek arttığı ve insansı olmayan robotlar ile yapay zekayı benimsemeyi bekleyen firmaların sayısında da artış olduğu görülmüştür. Endüstride taleplerin azaldığı meslekler Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre eğitimden ulaştırmaya, muhasebeden işletmeye birçok alanda mesleklere olan talep giderek azalmaktadır.

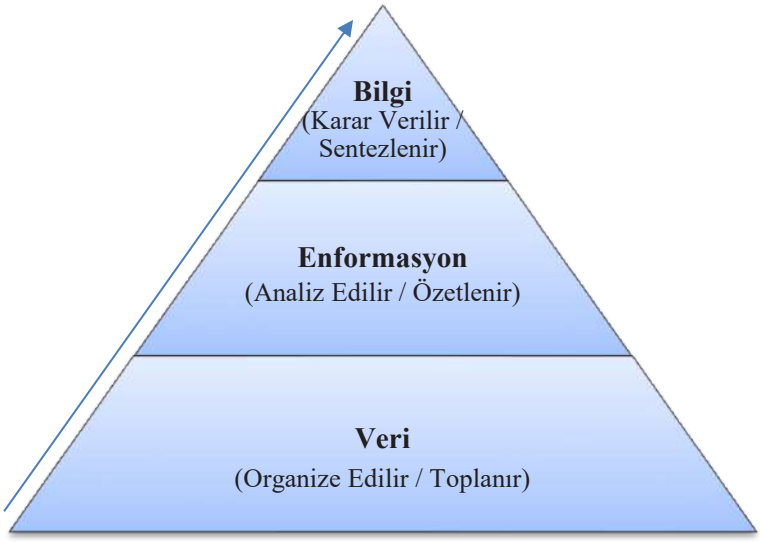
Yönetici Sekreteri
Finansal Analist
Müşteri Hizmetleri Çalışanları
Muhasebe ve Bordro Memurları
Muhasebeciler ve Denetçiler
Posta Hizmeti Memuru
Banka Veznedarları
İnsan Kaynakları Uzmanı
Eğitim ve Geliştirme Uzmanı
Malzeme Kaydı ve Stok Tutma Görevlisi
Satış Temsilciliği

Tablo 1. Endüstriler arasında azalan talebe göre bazı iş rolleri (Dünya Ekonomi Forumu, 2020)

Yeni mesleklerin ortaya çıkması ya da mesleklerin yeniden tanımlanması sonucu insanların bu meslekleri yapabilmesi için bazı becerilere sahip olması beklenmektedir. 2020 yılında Dünya Ekonomik Forumunda yayınlanan rapora göre 2025 yılı için beklenen becerilerden bazıları Tablo 2'de verilmiştir.

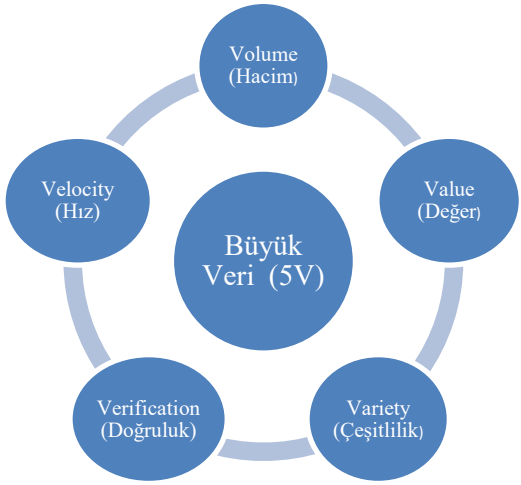
Tablo 2. 2025 için Geleceğin Becerileri (Dünya Ekonomik Forumu, 2020)

Araştırma ve gözlem gibi çeşitli metotlarla elde edilen ve kendi başlarına bir anlam ifade etmeyen sayı, sözcük, metin vb. şekilde temsil edilen ham parçacıklara veri adı verilmektedir. Verinin belirli bir standart ile düzenlenerek anlamlı hale getirilmesine ya da hesaplama ve sınıflandırma gibi analizler yoluyla değer kazanmasına enformasyon denir. Bilgi ise enformasyonun akıl yürütülmesi sonucunda yorumlanması ve bir hedef için meydana gelen kavramdır (Özdemir ve Kılınç, 2019). Veri, bilgi ve enformasyondan oluşan veri piramidi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Veri Dönüşüm Piramidi (Aksan, 2020)

İnternet ve internet teknolojilerinin internetteki nesneleri kullanarak gelişmesi ve ortama farklı yenilikler getirmesi kaçınılmazdır (Koçak, Bilen ve Köse, 2019). İnternetin yaygınlaşması ve sosyal medya platformlarının gündelik hayatın bir parçası olması, mobil uygulamaların sayısının gün geçtikçe artması gibi birçok gelişme ve değişme veri büyüklüğünün inanılmaz derecede artmasına neden olmaktadır. Birkaç yıl içinde dünya genelinde veri miktarının 160 Zetta ($160*10^{21}$ byte) byte'lara kadar artacağı öngörülmektedir. Bu veri miktarı yaklaşık 40 trilyon DVD anlamına gelmektedir (Özdemir ve Kılınç, 2019). Herhangi bir verinin büyük veri olarak nitelendirilebilmesi için sadece miktar olarak çok büyük miktarda olması yetmemektedir. Literatürde 3V, 4V, 5V, 9V ve 42 V'ye kadar tanımlama yapılmış olmasına rağmen temel olarak 5V ile nitelendirilen Volume (Hacim), Value (Değer), Variety (Çeşitlilik), Verification (Doğruluk) ve Velocity (Hız) kullanılmaktadır. 5V'nin görseli Şekil 2'de verilmiştir. Hacim ile verinin miktarı, hız ile verinin işlenme hızı, çeşitlilik ile verinin çeşitli formlardaki veri türü, doğruluk ile verinin doğru ve güvenilir olması, değer ile karar süreçlerinde yarattığı değer ya da katkı olarak ifade edilmektedir. Büyük veri saklama ve yönetim araçları olarak Hadoop ve Spark sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 2. Büyük Verinin 5V'si

Teknolojinin gelişim ivmesinin yukarı yönlü artması ile daha yüksek hızlara ulaşan işlemciler, yapay zekâ algoritmalarının geliştirilmesinde ve eğitiminde kullanılmaya başlanmıştır (Bilen, 2021). Ekonomiden sağlığa kadar her alanda yapay zekâ destekli uygulamaların kullanılması gün geçtikçe artmaktadır. İnsanların yaşamına bir anda girmemiş, yüzyıllar boyunca biçimlendirdiği düşlerinin bir meyvesi olarak sadece anı değil geleceği de şekillendiren yapay zekâ, multidisipliner etkileşimlerin de meydana gelmesini sağlamıştır (Köse, 2021). Yapay zekanın tarihçesine bakıldığında Alan Turing'den söz etmeden geçmek olmaz. Alan Turing 1950 yılında alanında uzman bir insan ile bir bilgisayarı zihinsel olarak karşılaştıran bir test geliştirmiştir. Yine 1950 yılında Isaac Asimov Ben Robot isimli kitabında bilgisayarların da insanlar gibi bilgi saklayabilmesini ve öğrenebilmesini hayal etmiştir. Yapay zekanın isim babası John McCarthy 1958 yılında LISP'i (Yapay zekâ programlama dili) geliştirmiştir. Joseph Weizenbaum, İngilizce sohbet robotunu 1965 yılında geliştirmiştir. 1966 yılında internetin atası olarak adlandırılan Arpanet kurulmuştur. 1970'li yılların başında İngilizce olarak komutları anlayan ilk robot kol üretilmiştir. 1984'de backpropagation (geri yayılım algoritması) yaygınlaşmaya başlamıştır. 1990 yılında WWW (World Wide Web), 1991 yılında Python Programlama Dili ve 1997 yılında IBM tarafından satranç oynayabilen DeepBlue geliştirilmiş ve dünya satranç şampiyonu Kasparov'u yenmiştir. 2000'de Honda tarafından insan gibi yürüyebilen ASIMO adlı robot üretimi gerçekleştirilmiştir. 2009 yılında spor haberleri yazabilen Stats Monkey adlı yapay zekâ programı geliştirilmiştir. 2015 yılında Google Deepmind AI, 49 atari oyununu öğrenerek tüm oyunları başarıyla tamamlamıştır. 2016'da ilk robot vatandaş Sophia tanıtılmıştır. 2017'de AlphaGo

yazılımı strateji oyunu Go'da Çinli şampiyonu yenmeyi başarmıştır. 2018 yılında Çin'de ilk yapay zekâ spikeri haber programını sunmuştur.

Yapay zekadaki insanlık adına tüm olumlu gelişmeler gelecek için umut verici olsa da insanların yapay zekaya tam olarak güvenebilmesi için yapay zekanın açıklanabilirlik sorununu ortadan kalkması gerekmektedir. Yapay zekâ destekli tüm uygulamalar kara kutu gibi görünmektense insanlar için daha güvenilir bir şekilde sunulmalıdır. Yapay zekâ çalışmalarında, geliştirilen algoritmalar ürettikleri sonuçlarda, kararları neye göre, nasıl alındığını açıklanmalı ve tüm sürecin şeffaf olarak hesap verilebilir bir şekilde kullanıcıya sunulmalıdır.

3. GELECEĞİN MESLEKLERİ

Günümüzde yoğun talep görmeye başlayan ve yakın gelecekte insanları bekleyen mesleklerin neler olacağı ile ilgili öngörüler bilimsel verilere göre oluşturulmuştur. Dijital uygarlık ve yapay zekâ çağında insanlara rehberlik etmesi beklenen bu bölümde, geleceğin meslekleri açıklamalarıyla verilmiştir.

Veri Analisti / Veri Bilimci : Verinin değerinin ortaya çıkmasıyla bu mesleklerin önemi katlanarak artmaktadır. Dünya genelinde büyük bir talep olan bu mesleğin geleceği önümüzdeki yıllarda da çok açıktır. Veriden değer elde etme günümüz teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Verinin toplanması, ön işleme tabi tutulması, analiz edilmesi, modelin belirlenip kullanılması gibi işlemleri gerçekleştirip veriyi anlamlandıran meslek veri analistidir. Veri bilimci ise, bunlara ek olarak özgün bir bakış açısı ile enformasyondan bilgiye geçişte veri üzerindeki tecrübesiyle fark yaratıp kendi yöntemini sentezleyebilen meslek olarak tanımlanabilir.

Akıllı Ev Tasarım Yöneticisi : Akıllı evler, teknolojinin her geçen gün gelişmesiyle insanların yaşamlarını daha da kolaylaştıracağı, güvenlik, konfor, enerji kullanımı ve sağlık açısından daha başarılı hale getirilmesini amaçlayan bir araştırma-geliştirme alanıdır. Nesnelerin interneti (IoT) kavramının gün geçtikçe başarısını arttırması ile akıllı ev düşüncesinin sorunlarını giderecektir. Maliyet açısından henüz herkes için uygun olmasa da verinin etkili bir biçimde kullanılması ve yapay zeka desteği ile akıllı ev tasarımı kişilere özel olarak oluşturulması konusunda akıllı ev tasarım yöneticisi mesleğine olan ihtiyacın önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir.

Deniz Kenarı Gelgit Suyu Mimari : İklim değişikliği ve deniz seviyesinin yükselmesine ilişkin küresel zorluk, her yerde var olan bir problem olmaya devam edecektir. Gelgit suyu mimarları, 21. yüzyılın en büyük inşaat mühendisliği projelerinden bazılarında doğayla birlikte çalışacaktır. Cognizant's "Jobs of the Future Index (CJoF) Endeksi'ne göre, bu mesleğe olan talepler 2021'in ilk çeyreğinde %37 artmıştır.

İnsan-Makine Ekip Yöneticisi : Salgın dönemi olmasına bakılmaksızın, iş yerinde robotların bitmeyen yükselişi hız kesmeden devam etmektedir. İnsan-Makine Ekip Yöneticileri, insanların ve robotların kesiştiği noktada çalışacak ve eksiksiz iş birlikleri oluşturacaktır. Robotik teknisyenleri gibi öncü roller için açıklıklar, CJoF) Endeksi'ne göre 2021'in ilk çeyreğinde %50 artmış durumdadır.

Yapay Zekâ Destekli Sağlık Teknisyeni : Doktorların hastalara teşhis, tanı koyabilmesi için hasta ile aynı fiziksel ortamda bulunarak hastayı görmesi gerekmektedir. Yapay zekâ destekli sağlık teknisyeni sayesinde bu durum kısmen ortadan kalkacaktır. İnsanlar doktora gitmeden, yapay zeka destekli sağlık teknisyenleri kapılarına gelerek yazılımları ile hastalık için tanı koyabilecek hatta doktorlar ile iletişim kurup doktorun hastayı anlık olarak incelemesini sağlayabilecektir.

Siber Felaket Tahmincisi : COVID-19'un yanı sıra, 2020'nin diğer büyük felaketinin, SolarWinds gibi devlet destekli devasa siber saldırıların ve bireysel kötü aktörlerin fidye yazılımı açıkları yaymasına kadar devam eden saldırısı olduğu tartışılabilir. Bunun gibi olayları tahmin etme yeteneği, kültürel olayları önceden uyarmak için çok önemlidir. CJoF Endeksi bunu doğruluyor: Cyber Calamity Forecasters açılışlarındaki büyüme 2021'in ilk çeyreğinde %28 artmıştır.

Chatbot Uzmanı : Yakın gelecekte insanların, gerçek dünyadaki kişilerden daha fazla sohbet robotları (chatbot) ile iletişim kuracakları öngörülmektedir. Doğal dil işleme alanındaki çalışmalarda chatbotların insan gibi tepkiler verebilmesi amaçlanmaktadır. Sanal dünyada iletişim kurarken sorulan her soruya doğru cevap vermek, karşı tarafın sizin bilgilerinize ulaşması demektir. Karşıdaki iletişim kurulan kişinin gerçekten insan mı yoksa chatbot mu olduğunu anlamak da her geçen gün zorlaşacaktır. Belli bir amaç için geliştirilmiş bu sistem, amacına ulaşmak için insan gibi davranışlar göstererek insanların bilgilerine ulaşıp, insanlar hakkında siyasi görüşünden tercihlerine kadar tahminler oluşturacaktır. Bu durumda mahremiyet sınırları da zarar görecektir. Chatbotların işleyebileceği suçlar için ülkelerin kültürleri ve hukuklarını iyi bilen Chatbot Uzmanları da geleceğin meslekleri arasında gösterilmektedir.

Dijital Terapist : Dijital terapist, insanlara, insanların problemleri ve endişeleri konusunda çözüm üretebilen, tedavi gereken süreçlerde de destek olabilen dijital teknoloji konusunda uzmanlaşmış kişidir. İnsan sosyal bir varlık olduğu için, insanın sosyal varlığı ile teknoloji arasında dengeli bir ilişki kurmak dijital terapistin görevleri arasındadır. Aynı zamanda insanın anlayabileceğinden daha fazla maruz kaldığı aşırı bilgi artışı konusunda da insanlara destek olarak fiziksel, iletişim ve sağlık sorunları konusunda da yardımcı olacaktır.

Dijital Terzi : İnsanların beden ölçülerini sensörlü kabinlerde alarak e-ticaret firmaları için de iade oranlarının azaltılmasını sağlayacak bir meslek olarak ön plana çıkmaktadır. Dijital terzi, beden ölçüsü için sensörlü kabinlerden bir kez alınan ve insanların kendilerinde önemli bir değişiklik fark edene kadar bu verileri saklayıp kullanan ve giysi modeli ile bu ölçüleri yapay zeka destekli yazılımlar ile bilgisayarda modelleyerek insanlar için en uygun kıyafeti ortaya çıkaran bir meslek olarak yakın gelecekte önemli bir ihtiyacı karşılayacaktır.

Robo Sosyopsikolog : Robotların insan hayatına girmesi ile yaşamı kolaylaştırması arzu edilmektedir. Robo sosyopsikolog mesleğini yapacak kişiler, insanı ve yaşadığı sosyal çevreyi, toplumu iyi bilmesi, tanıması, etik ve ahlaki değerlere değer vererek insan ile robot arasında bir köprü görevi görecektir. Dolayısıyla robotların insanların hayatlarına daha kolay entegre olmasını sağlayacaktır.

Açıklanan bu mesleklerin dışında daha geniş bir listeye ulaşmak isteyenler için Şebnem Özdemir ve Deniz Kılıç'ın Geleceğin Meslekleri kitabı önerilmektedir (Özdemir ve Kılınç, 2019).

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Gelecek on yıl içinde halihazırda var olan mesleklerin en az yüzde yetmişinin kaybolması öngörülmektedir. Bu durum yapay zekâ tarafından gerçekleştirilecektir. Bu yüzden robotik ve veri bilimi gibi mesleklerin popülerliği giderek artacak, matbaacılık ve kasiyerlik gibi meslekler ise zamanla ortadan kalkacaktır. İnsanlar iklim değişikliği ile yaşadığı için teknoloji ile birlikte birçok önlem alınmaya çalışılmıştır. Mesleklerde de teknoloji ile makineleri de insanlarla birlikte kullanmak yeni meslekleri beraberinde getirecektir. İnsan makine etkileşimine dayalı birçok meslek ortaya çıkmaktadır ve çıkmaya da devam edecektir. İklim değişikliğinin etkisi olmadan yeni şehirler oluşturan, doğayı, suyu ve yeşili koruma altına alan insanlar olacaktır. Dijital etik üzerine de çalışmalar başlayacaktır.

Geleceğin meslekleri hibrit olacaktır. Mesela bundan on sene önce sosyal medya yoktu ama günümüzde yirmi milyona yakın insan sosyal medya sayesinde iş sahibi olmuştur. Makineler veri sayesinde insanlara üstünlük kurabilir ama sadece insanlara özgü olan insani değerler ile yeni meslekler ortaya çıkacaktır. Akıllı teknoloji gün geçtikçe önemini arttırmakta ve genç nesiller için çok daha hızlı bir dünya beklenmektedir. Teknoloji umut vaat etse de etik değerleri yoktur. Teknolojinin gücü insan gücü ile kontrol edilmezse, aşırı teknoloji kullanımı dijital obeziteyi ortaya çıkaracaktır. İnsanlığın mutlu bir gelecek için teknolojiye ihtiyacı olduğu kadar etkileşim, deneyim gibi değerler de olması gerekmektedir.

İnsanlar algoritma olmadığı için teknolojiden faydalanırken insani yönlerini kaybetmeyerek makine gibi olmasının önüne geçilmelidir.

Dijital dünyada insan hakları mutlaka olmalıdır. İnsanlar daha önce çevrimiçi olma hakkı varken, insan kalabilmek için yeni dönemde çevrimdışı olabilme hakkına sahip olması gerekmektedir. Her yerde izlenildiği için bir nevi dijital kölelik yaşanmaktadır. En özel bilgilere bile sadece emniyet değil tüm inşalar ulaşabilirken gözlem altında olmak insan olma hakkını ortadan kaldırıyor. İsteyen herkes internette herkese ulaşabilmektedir. İnsan olma hakkının olması için gizli kalma, mahrem kalma, ortadan kaybolma gibi hakları olmak zorundadır.

Dünya Ekonomik Forumu'nun Davos'ta 2022 yılındaki toplantısı sonucunda geleceğin mesleklerinin birçoğunun kökleri enerji geçişine dayanacağı, yeşil geçişin mantığını anlamayan ekonomilerin geride kalacağı öngörülmüştür. Genç nesillere sunulabilecek en mükemmel şeyin yeşil endüstriyel dönüşüm olacağı düşünülmektedir (World Economic Forum, 2022).

KAYNAKÇA

1. Aksan, C.E. (2020). Veri, Enformasyon ve Bilgi. 5 Kasım 2022 tarihinde https://ceaksan.com/tr/veri-enformasyon-ve-bilgi adresinden erişildi.
2. Bilen, M. (2021). A New Approach for Determining Hyperparameters in Artificial Neural Networks: Enhanced Black Hole Optimization Algorithm. Journal of Multidisciplinary Developments, 6(1), 18-28.
3. Canbay, P., Demircioğlu, Z. (2021). Endüstri 5.0'a Doğru: Zeki Otonom Sistemlerde Etik Ve Ahlaki Sorumluluklar . AJIT-e: Academic Journal of Information Technology 12 (45), 106-123. DOI: 10.5824/ajite.2021.02.006.x
4. Dünya Ekonomik Forumu. (2020). 4 Kasım 2022 tarihinde https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2020.pdf adresinden erişildi.
5. Köse, U. (2021). "Yapay Zekâ Kavramı". Yapay Zekâ Etiği (Ed. Utku Köse), Nobel Yayıncılık.
6. Koçak, Ç., Bilen, M., Köse, U.(2019). "Nesnelerin Internetinden Ortam Zekasına Yolculuk," presented at the International Marmara Sciences Congress (IMASCON 2019), Kocaeli.
7. Özdemir, Ş., Kılınç, D. (2019). Geleceğin Meslekleri. İstanbul: Abaküs Yayınları.
8. World Economic Forum. (2022). This is the future of work, according to experts at Davos 2022. 23 Kasım 2022 tarihinde http://weforum.org/agenda/2022/05/future-work-jobs-davos-experts adresinden erişildi.

DENİM ATIKLARINDAN YAPILAN UPCYCLE DOKUMALAR

Güler ÖNCÜ[1]
Meruyert KAYGUSUZ[2,*]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim,
Ayakkabı ve Deri Bölümü
ORCID ID: 0000-0002-3139-4554
[2]Doç. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü
ORCID ID: 0000-0003-2176-7094
**meruyertkoi7@gmail.com*

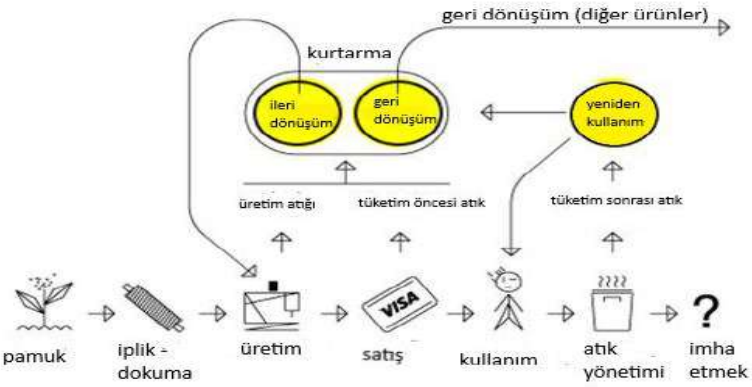
GİRİŞ

Tekstil atıkları, ait olduğu işletmeye faydası olmayan ve çöpe atılarak toplumun diğer kesimleri ve çevre için sorun oluşturan her türlü malzemedir. Atıklar, üretim esasına göre tüketim öncesi tekstil atıkları, tüketim sonrası ve endüstriyel tekstil atıkları olarak sınıflandırılmıştır.

Tüketim öncesi atık, hammaddeden pazara hazır nihai ürünlere kadar endüstride kalan üretim süreçleridir. Bu tür atıklar, diğer amaçlar için kullanılmak üzere homojen ve doğası gereği temiz olan kesimler, kesme, kenarlar, reddedilen malzemeler, B sınıfı giysiler, ihracat fazlası ürünleri kapsamaktadır. Söz konusu atıklar ilgili acentelere düşük oranlarda satılabilir veya çöplüklere gönderilebilirler. Bu sınıftaki atıklar, yeniden kullanım ve geri dönüşüm için büyük potansiyele sahiptir.

Tüketim sonrası tekstil atığı, yaşam döngüsünü tamamlamış ve artık hem işlev hem de estetik açıdan tüketici için yararlı olmayan herhangi bir ürünü ihtiva etmektedir. Bu atıklar, tüketicinin artık ihtiyaç duymadığı ve eskimiş, yıpranmış, hasarlı, uyumsuz ve modası geçtiği için elden çıkardığı ürünlerdir. Çoğu durumda, oldukça iyi olan giysi veya ürün geri kazanılabilir ve ikinci el giysi olarak kullanılabilir. Kullanılmayan ürünler parçalanarak üretimde kullanılmak üzere hammaddeye dönüştürülebilir (Radhakrishan, 2017).

Günümüzde çoğu endüstriyi, topluluğu ve hükümeti en çok ilgilendiren konu, üretilen atığın büyüklüğü ve bunun çevre üzerindeki olumsuz etkisidir. İnsanların yaşam standartlarının iyileşmesiyle birlikte gün geçtikçe dünya üzerindeki atık tekstil miktarı da artmaya devam etmektedir (Weber et al., 2017). Küresel tekstil atık miktarının 2050 yılına kadar 895 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Telli and Babaarslan, 2017). Büyük miktarda tekstil atığı, ciddi çevresel kirliliğe neden olan yakma ve gömme yoluyla yok edilmeye çalışılmaktadır (Meng et al., 2020). Bu nedenle tekstil atıklarının çevre dostu yöntemlerle geri dönüşümü veya yeniden kullanılması oldukça önemli bir konudur. Atık tekstillerin en az %50'sinin geri dönüştürülebilir düzeyde olduğu bildirilmektedir (Barbero-Barrera, et al., 2016). Günümüzde tekstil atıkları kimyasal ve mekanik yöntemlerle dayalı geri dönüştürülmektedir (Pickering, 2006). Ancak, kimyasal geri kazanım, çok fazla kimyasal ve enerji tüketilmektedir (Ouchi et al., 2010). Mekanik geri kazanımda ise, düşük maliyetli, kolay işlenen bir dönüşüm söz konusudur (Tserki et al., 2003). Tekstil atık türleri ve dönüştürme yöntemleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Bir sektörün atığı, başka bir sektör için muhtemel yeniden kullanılabilir bir kaynak olabilir.



Şekil 1. Tekstil atık türleri (Trash to Trend, 2016)

DENİM KUMAŞIN TARİHÇESİ

Güçlü bir kumaş olan denim kumaşlar, insanın hayal gücünün ötesinde sayısız çeşidiyle her yaşta insanın severek kullandığı en popüler tekstil ürünüdür. Denim, modaya meydan okuyan ve her sezonun parçası olan trend bir kumaş olmakla kalmayıp hem dayanıklılığı hem de her sezon giyilebilmesi ile tüketici açısından vazgeçilmez moda unsuru haline gelmiştir.

Tarihçiler hala denimin çıkış yerini tartışırken, söz konusu kumaş renkli çözgü ipliği ve beyaz atkı ipliği kullanılan dimi dokuma olarak bilinmektedir. Yaygın bir görüşe göre denim, Fransa'nın Nîmes kentinde ilk ortaya çıkmıştır. 17. yüzyılın sonlarında, Fransa'nın Nimes kentindeki dokumacılar, "serge" adı verilen başka bir popüler ağır hizmet kumaşının üretim sürecini kopyalamaya çalışırken, modern kot kumaşı olan pamuklu, doğal ve sağlam bir kumaş geliştirdiklerini fark etmişler. Bu kumaşta, diagonal yönde dizilerek bağlantı yapan dimi örgü kullanılarak dokuma yapılmıştır. Dokumacılar, çözgü ipliklerini maviye boyamak için indigo boya kullanmışlar, ancak atkı ipliklerini doğal beyaz renginde bırakmışlar. Bu işlem kumaşın bir tarafına beyaz diğer tarafına ise benzersiz bir mavi renk kazandırmıştır. Bu süre zarfında yapılan tekstiller, genellikle ilk üretildikleri yerin adı ile adlandırıldığı için, yeni malzemeye kelimenin tam anlamıyla "Nimes dimisi" anlamına gelen "serge de Nimes" adını vermişler. Rivayetlere göre, zamanla, kumaş daha yaygın kullanılmaya başlandıkça, İngiliz ve Fransız tüccarlar adını "denim" (Nimes'den gelen) olarak kısaltmışlar (Kassia, 2018).

Aynı dönemde İtalya'nın Cenova kentinde tekstil işçileri indigo boyalı yün ve pamuktan yapılan bir dokuma kumaş üretmişler. Denime benzeyen bu dayanıklı kumaş denizciler ve işçi sınıfı tarafından tercih edilmiş, pantolondan paltoya hatta uzun elbiseye kadar "blue genes" (burada "gene" Cenova (Genoa) için kullanılan

kısaltma) olarak adlandırılan daha sonra jeans olarak tanımlanan her türlü giysi üretilmiştir. Böylece, teknik olarak jean ve denim iki farklı kumaş olsa da zamanla aynı kumaş olarak karşımıza çıkmıştır. 1969'da American Fabrics dergisi, denimin en eski kumaşlardan biri olduğunu, ancak sürekli kullanım ve ilgi nedeniyle 'ebediyen genç' kaldığını kanıtladığını belirtmiştir (Downey, 2014).

1850 yılında Levi Strauss isimli Amerikalı bir genç, altın arayıcılarının ihtiyacı olan sağlam pantolonlar üretmek için tente ve vagon örtüsü olarak kullanılan kanvası kullanmıştır. 1870'lerin başlarında, Nevadalı terzi Jacob Davis, madenciler, çiftçiler ve çiftlik çalışanları için pamuklu denim kumaş ve ceplerde bakır perçinler kullanarak, dayanıklı işçi pantolonları üretmeye başlamıştır. Daha sonra kimi zaman denim kumaşlarını satın aldığı Levi Strauss'a maddi destek için başvurmuş, böylece mavi denim pantolonlarda Levi Strauss&Co. ortaklığı kurulmuştur (Öz vd., 2018). Türkiye'ye denim kumaşların gelmesi ise 1940'lı yılları bulmuştur (Sağırkaya, 2021).

DÜNYA VE TÜRKİYE'DE DENİMİN DURUMU

Denim pazarının dünya ekonomisindeki payı oldukça fazla olup düzenli olarak artış göstermektedir. Denim sektörü 2018 yılında 19,7 milyar dolar tutarında mal üretmiş ve yakın tarihli bir araştırmaya göre, bu tutarın önümüzdeki yedi yıl içinde ortalama %3,2 yükseliş kaydederek 2025 yılında 25,4 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Precision Reports, 2019). Türkiye, denim giysi üretimi, tasarımı, marka ve pazarlama çalışmaları ile dünyanın önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır. Dünyada 200 milyondan fazla insan Türk denim pantolonu giymekte ve dünyadaki denim kumaş ihtiyacının %60'ı Türkiye'den karşılanmaktadır (Atalyaman, 2019).

Günümüzde denim kumaşlar, dimi 3/1 dokuma örgü yapısı ile dokunmuş %100 pamuk ipliğinden üretilen çözgü ipliği indigo boyalı veya boyanmamış çözgü ve atkı pamuk ipliklerinden üretilmektedir. Ayrıca 2/2 dimi, 3/1 kırık dimi ya da 1/1 bezayağı dokuma örgüsüne sahip denim kumaşlar da mevcuttur. Çözgü iplikleri genellikle atkı ipliklerinden daha ince ve bükümlüdür. Sıklık bakımından da çözgü sıklığı, atkı sıklığına göre daha yüksek tercih edilmektedir (örneğin 24-27 çözgü/cm'ye karşılık 15-18 atkı/cm). Kumaş gramajları 250-500 g/m^2 arasında değişmektedir (Çataloğlu, 2007). Değişen moda eğilimleri denim kumaşlarına da yansımış ve günümüzde çeşitli denim kumaşları ortaya çıkmıştır:

- **Blue denim:** Çözgü iplikleri indigo boyalı atkı iplikleri beyazdır.
- **Renkli Denim:** Çözgü ve atkı ipliklerinin dokumada renkli olarak dokunmasıdır.
- **Çift Taraflı Denim**: Kumaş halindeyken her iki yüzeyin farklı boya grubu ile boyanması ile yapılmaktadır.

- **Kaplamalı Denim:** Mavi veya siyah renkte, sıcak yapıştırıcı toz ile kumaşın tüm yüzeyinin kaplanmasıdır.
- **Stretch Denim**: Atkı ipliklerinde elastan içerikli lif karışımlı ip kullanılarak üretilir.
- **Bistretch Denim**: En ve boydan elastik yapıya sahip denimdir.
- **Warp Stretch Denim:** Çözgüde elastan içerikli lif kullanılır (Seviç, 2019).

Denim kumaşın hammaddesi olan pamuk elyafı, yıllık yaklaşık 26 milyon ton tüketimi ile (Meyer and Dew, 2022) tekstil endüstrisinin, özellikle de giyim sektörünün en sık kullandığı liflerden biridir (Subramanian et al., 2021). Dünya üzerinde üretilen pamuğun %10'u denim kumaş üretiminde kullanılmaktadır (Amutha, 2017). Ancak pamuk ekimi, yüksek hacimde su tüketmesi ve önemli miktarda pestisit kullanması nedeniyle ciddi ekolojik ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Bununla birlikte, üretim ürünleri için pamuğun işlenmesi için çok fazla su tüketilirken, pamuk hasadı için de önemli miktarda böcek ilacı kullanılmaktadır (Kanan et al., 2022).

Denim büyük miktarlarda üretilmekte ve kullanılmakta, dolayısıyla denimin üretimi, kullanımı ve bertarafı büyük bir çevresel etkiye sahiptir (Luiken and Bouwhuis, 2015). Denim üretiminde kullanılan doğal kaynaklar düşünülünce sürdürülebilir denim üretim gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla denim üretim sürecinde üreticiler bitkiden başlayarak iplik, kumaş ve boya terbiye süreçlerinde daha az su, geri dönüşüm gibi yollarla ürünlere sürdürülebilirlik özelliği kazandırmaktadırlar (Kobayashi, 2013; Baker 2013; Vohra 2015). H&M'in 2019 sürdürülebilirlik hedeflerinden bir tanesi olarak kullanacağı denim kumaşların hepsinde %20 geri dönüştürülmüş elyaf (PCW) kullanma şartı getirmiştir (Atalyaman, 2019).

Ancak sürdürülebilirlik uygulamalarının sadece üretim süreci ile sınırlı kalması atık yönetimi açısından özellikle konfeksiyon atıklarına çözüm getirmede yeterli olmamaktadır.

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE DENİM ATIKLARLA UPCYCLE DOKUMALAR

Ekolojik sürdürülebilirlik, Dünya İş Konseyi tarafından az malzeme ve enerji tüketimi, geri dönüştürülebilirlik, yenilenebilir kaynak kullanımı, ürün ömrünün artırılması olarak belirtilmiştir (Tobler-Rohr, 2011). Önceki yıllarda sürdürülebilirlik kavramı ekstra harcama olarak nitelendirilirken, bugün ekstra katma değer sağlamaktadır. Sürdürülebilirlik için yapılan küçük iyileştirmeler, şirketler tarafından tüketici algısını değiştirmek için kullanılmaktadır (Telli et al., 2012). İleri dönüşüm (upcycle); yeniden biçimlendirme yoluyla atıkların moda döngüsüne katılmasını sağlayan ve kullanım ömrünü uzatan yüksek kaliteli ürün

oluşturma eğilimidir (Bovone, 2017). Atık yönetim stratejilerinin asıl amacı olan materyali en değerli hali ile mümkün olduğunca uzun süre yaşam döngüsü içerisinde tutmak ileri dönüşüm ile sağlanabilir (Fletcher, 2008). Yeniden kullanım ve yeniden tasarım da sürdürülebilirlik için vazgeçilmez çözümler arasında yerini almaktadır. Özellikle sosyal ve kamusal sorumluluklar çerçevesinde sürdürülebilirliğe katkı dayanımı yüksek olan denim ürünlerinin ileri dönüşümü ile sağlanabilir.

Denim kotlar tüketiciler tarafından büyük miktarlarda satın alınmakta ve kot pantolon üretiminin 3,6 milyar çift olduğu tahmin edilmektedir. Amerikalılar yılda 450 milyon çift kot pantolon satın almakta, ki bu ortalama olarak her kişinin 7 çift kot pantolonu olduğu anlamına gelmektedir. Söz konusu ürünler bir ya da iki yıl kullanıldıktan sonra atılmaktadır. Bu da teorik olarak yıllık 2,16 milyon ton tüketim sonrası kot atığı potansiyelinin mevcut olduğu anlamına gelmektedir. Sadece bu miktarın küçük bir kısmı toplanmakta ve yeniden kullanılmakta veya geri dönüştürülmektedir. Tahminlere göre Batı Avrupa'da tekstil ürünlerinin sadece %35-%50'si toplanmaktadır (Luiken and Bouwhuis, 2015). Birçok ülkede, toplanan tekstil malzemesi (kot pantolon dahil) miktarını artırmak için daha fazla çaba sarf edilmektedir.

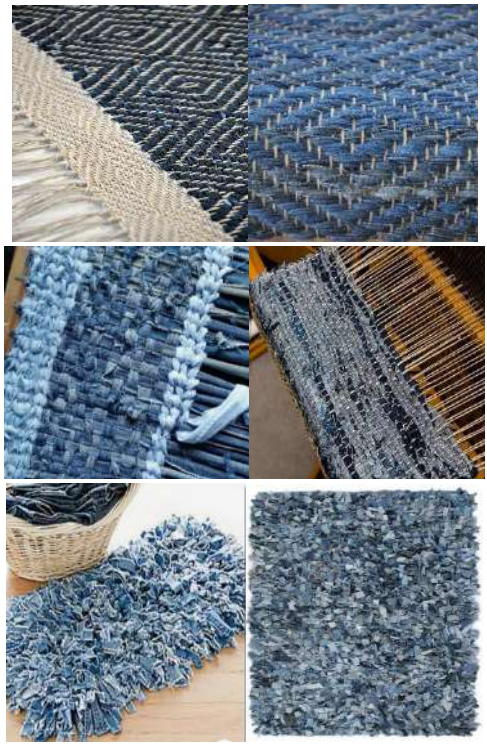
Tekstil ürünlerinin geri dönüşümü giderek daha fazla dikkat çekmekte ve 'döngüsel ekonomi' gibi terimler tekstil ve giyim endüstrisinde, perakendecilerde ve tüketici düzeyinde yaygınlaşmaktadır. Tüketicilerin sürdürülebilir ürünlere artan ilgisi, geri dönüştürülmüş ürünler sunan ve çevresel sorumluluk üstlenen ana perakendecilerin yanı sıra kaynak verimliliği ve yeşil kamu alımlarını hedefleyen ulusal ve uluslararası düzeydeki politikalar nedeniyle, tüketim sonrası kot pantolonların üst düzey uygulamalarına olan ilgi hızla artmaktadır. Bu nedenle, birçok araştırma kuruluşu geliştirme çalışmalarını kot pantolonlar da dahil olmak üzere tüketim sonrası tekstil ürünlerinin yüksek katma değerli geri dönüşümüne odaklamıştır (Luiken and Bouwhuis, 2015).

Birçok ürün, estetik ve teknik beceriye sahip yaratıcı tasarımcılar tarafından yapılabilir. Bunun için kullanım dışı örneğin kot pantolondan belirli kalınlık veya genişlikte iplikler hazırlanır (Şekil 2). El dokuması pamuklu ve kot kilimler, masa örtüleri, kilim veya kapı paspası, makinede kurutulan yıkanabilir ürünler olarak dokunabilir. El yapımı battaniyeler, yastık kılıfları, minder kılıfları, sanat objeleri, duvar askıları, tutacaklar, bez çantalar, kostüm takıları, giysiler ve aksesuarlar gibi sayısız ürün (Şekil 3), kot pantolonlardan geri dönüştürülen öğelerin hiç bitmeyen listesinden bazılarıdır (Lindzy, 2016; Etsy, 2016).

Şekil 2. Atık kot pantolondan iplik hazırlanması (URL 1-2)

Şekil 3. Atık denim kumaştan üretilen up-cycle ürünler (URL 3-6)

İleri dönüşüm, az gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkede gerçekleştirilmekte ve bu teknik, genç tasarımcılar, yaratıcı sanatçılar, üreticiler ve perakendeciler için birçok yol açarak sürdürülebilirlik örneği olarak karşımıza çıkmaktadır (Radhakrishnan, 2017).



Şekil 4. Farklı dokuma teknikleri ile yapılan up-cycle denim ürünler (URL 7-12)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tüm zamanların bir klasiği olan 'Denim jeans' dünyanın dört bir yanındaki insanların can damarı haline gelmiştir. Geçmişten izler taşıyan “blue jeans” büyüsünü kanıtlayarak bugüne ve geleceğe iz bırakmaya devam etmektedir. Kot üretimi dünya nüfusunun geniş kesimlerine tedarik sağladığından, çevre kirliliği çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Daha iyi bir gelecek için başta çalışma kültürü, çevre, sağlık ve güvenlik konularındaki insani kaygılara daha fazla özen gösterilmesi çok önemlidir. Tüketicileri/son kullanıcıları satın almak istedikleri tekstil ürünlerinin çevresel etkileri konusunda eğitmek de önemlidir, böylece yaptıkları seçimlerin etkilerinin farkında olurlar.

Çalışmalar, kot üretimindeki üretim uygulamalarının tehlikelere neden olduğunu ve geleceğin sürdürülebilir üretim ve kullanım ömrü sonu yönetimine ait olduğunu göstermiştir. Literatür, yakma ve düzenli depolama gibi mevcut alternatiflerin de insanlara ve çevreye zararlı olduğunu kanıtlamıştır. Tasarım, üretim ve kullanım, yeni ürün geliştirme için başka hiçbir kaygı olmaksızın yürütülen aşamalardır, dolayısıyla günümüzde sürdürülebilir yeni ürün geliştirme odak noktası haline gelmiştir.

İleri dönüşüm terimi, yan ürünlerin, istenmeyen ürünlerin veya atık malzemelerin daha kaliteli malzemelere veya daha iyi çevresel değere sahip ürünlere dönüştürülmesine verilen isimdir. Kot pantolonun gerçek güzelliği ve değeri uzun süre kullanımdan sonra keşfedilir. Ayrıca denim kumaş ömrünün uzun olması ileri dönüşüm sürecini destekler. Üstelik, atık denim kumaşlarının dokunarak ileri dönüşüm ürünler haline gelebilmesi için gerekli olan dokuma tezgâh temin masrafı yüksek değildir. Bu nedenle, günümüzde özellikle ev hanımlarının bilinçlendirilerek sürdürülebilirliğe evden katkı sağlanması atık yönetimi için inanılmaz fayda sağlayacaktır.

Tasarım sürecinde bilinen ve kullanılan örme, dikiş tekniklerinin yanı sıra farklı teknikler ile dokunabilirliği ve geniş ürün yelpazesine sahip olması özellikli tasarım ürünlerin ortaya çıkmasına imkân sağlayacaktır. Dokuma yapılmış ürünün ömrü, örgü ve dikişe nazaran daha uzundur ve dokuma stabil yapıdadır. Tasarımların dokuma işlemi yoluyla yapılması ileri dönüşüm ürün haline getirmede oldukça etkili olacaktır. Denim kumaşlar da dahil olmak üzere tekstil endüstrisinde geri dönüşüm, sıfır atıklı döngüsel ekonomi kavramları uzun vadeli hedeflerdir. Ferah ve temiz bir dünya için bu hedef doğrultusunda çalışmamız gerekmektedir.

Kaynaklar

1. Amutha, K. (2017). Environmental Impacts of Denim, UK, Woodhead Publishing.
2. Atalayman, N. (2019). Gelişen teknoloji ve moda eğilimlerinin günümüz denim modasına etkileri. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, İzmir.
3. Baker, B. (2013). Innovative company transforms recycled jeans into coasters, Wallets and rings. 9 December. http://ecowatch.com/wp-content/uploads/2013/12/Untitled.jpg. Accessed April 17, 2016.
4. Barbero-Barrera, M. del M., Pombo, O., & Navacerrada, M. de los Á. (2016). Textile fibre waste bindered with natural hydraulic lime. Composites Part B: Engineering, 94, 26–33.
5. Bovone, L. (2017). Ethical Fashion as a Post-Postmodern Phenomenon. Fashion Through History: Costumes, Symbols, Communication Vol. I, (Eds. G. Motta ve A. Biagini). UK, Cambridge Scholars Publishing.
6. Çataloğlu, A. (2007). Elastan Karışımlı Denim Kumaşların Elastikiyet ve Kalıcı Deformasyon Özellikleri Üzerine Bir Araştırma, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63 s.
7. Downey, L. (2014). A short history of Denim. http://www.levistrauss.com/wp-content/uploads/ 2014/01/A-Short-History-of-Denim2.pdf.
8. Etsy (2016). Recycled denim rug. https://www.etsy.com/in-en/market/recycled_denim. Accessed April 15, 2016.
9. Fletcher, K. (2008). Sustainable Fashion and Textiles Design Journeys. London: Earthscan.
10. Kanan, M., Wannassi, B., Barham, A.S., Ben Hassen, M., Assaf, R. (2022). The Quality of Blended Cotton and DenimWaste Fibres: The Effect of Blend Ratio andWaste Category. Fibers 2022, 10, 76.
11. Kassia, S. C. (2018). The Golden Thread: How Fabric Changed History. John Murray, London, 177 p.
12. Kobayashi, V. (2013). Raw materials for blue jeans. 3 March. http://www.designlife-cycle.com/ denim/. Accessed April 19, 2016.
13. Lindzy, V. (2016). Denim upcycled—rag rug—loom woven. https://www.etsy.com/in-en/listing/ 243499935/denim-upcycled-rag-rug-loom-woven? Accessed April 15, 2016.
14. Luiken, A., Bouwhuis, G.H. (2015). Recovery and recycling of denim waste. Editor(s): Roshan P., In Woodhead Publishing Series in Textiles, Denim, Woodhead Publishing, pp. 527-540.

15. Meng, X., Fan, W., Ma, Y., Wei, T., Dou, H., Yang, X., Tian H., Yu Y., Zhang T., Gao, L. (2020). Recycling of denim fabric wastes into high-performance composites using the needle-punching nonwoven fabrication route. Textile Research Journal, 90(5-6):695-709.
16. Meyer, L.A., Dew, T. (2022). Cotton and Wool Outlook: May 2022 CWS-22e; United States Department of Agriculture, Economic Research Service: Washington, DC, USA, 2022.
17. Ouchi A, Todida T, Kumaresan S, et al. (2010). A new methodology to recycle polyester from fabric blends with cellulose. Cellulose, 17: 215-222.
18. Öz C., Kaya R., H., Begiç N. Sınıfsız Bir Giysi Olarak Denim. Hars Akademi Uluslararası Hakemli Kültür-Sanat-Mimarlık Dergisi, 1(1), 16-24.
19. Pickering, S. J. (2016). Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. Compos A Appl Sci Manuf, 37:1206-1215.
20. Precision Reports, (2019). https://www.precisionreports.co/global-denim-fabric-market-21067990 Erişim tarihi 06.12.2022
21. Radhakrishnan, S. (2017). Denim Recycling, Muthu (ed.), Textiles and Clothing Sustainability, Textile Science and Clothing Technology.
22. Sağırkaya, F. S. (2021). Denim'de Sürdürülebilir Uygulamalar. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi. Denizli, 73 s.
23. Seventekin, N., (2003). Kimyasal Tekstil Muayeneleri, E.U. TEKAUM Yayini, p.80.
24. Sevinç, G. (2019). Geçmişten Günümüze Denim ve Sürdürülebilir Moda İçin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Arel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Moda ve Tekstil Tasarımı Programı.
25. Subramanian, K., Sarkar, M.K., Wang, H., Qin, Z. H., Chopra, S.S., Jin, M., Kumar, V., Chen, C., Tsang, C. W., Lin, C.S.K. (2021). An Overview of Cotton and Polyester, and Their Blended Waste Textile Valorisation to Value-Added Products: A Circular Economy Approach - Research Trends, Opportunities and Challenges. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2021, 52, 3921–3942.
26. Şenol, D. (2021). Sürdürülebilir Moda Tasarimina Bir Yaklaşım: Denim Giysi Atiklarinin İleri Dönüşümü. Ulakbilge, 63:1108–1118.
27. Telli A. and Babaarslan O. (2017). Usage of recycled cotton and polyester fibers for sustainable staple yarn technology. Text Appa, 27:224–233.

28. Telli, A., Ozdil N., Babaarslan, O. (2012). Usage of PET Bottle Wastes in Textile Industry and Contribution to Sustainability, Journal of Textiles and Engineer, 19:86, 49-55.
29. Tobler-Rohr, M. I. (2011). Handbook of Sustainable Textile Production. UK, Woodhead Publishing Limited.
30. Trash to Trend. (2016). Trash to trend—Concept. http://trash-to-trend.myshopify.com/pages/ concept. Accessed March 29, 2016.
31. Tserki V, Matzinos P and Panayiotou C. (2003). Effect of compatibilization on the performance of biodegradable composites using cotton fiber waste as filler. J Appl Polym Sci 88: 1825-1835.
32. Vohra, A. (2015). The green denim. 19 April. http://www.financialexpress.com/article/industry/ companies/the-green-denim/64861/. Accessed April 20, 2016.
33. Weber S., Lynes J., Young S.B. (2017). Fashion interest as a driver for consumer textile waste management: reuse, recycle or disposal. J Cons Stud 41:207-215.

Görsel kaynakları

URL-1. https://tr.pinterest.com/pin/107593878587310457/

URL-2. https://tr.pinterest.com/pin/122441683603801092/

URL-3. https://tr.pinterest.com/pin/440578776064533456/feedback/?invite_code=fe3c7272da254c1991633acccec839d5&sender_id=440578913454806266

URL-4. https://tr.pinterest.com/pin/440578776064533461/feedback/?invite_code=0ca858ae8c9f4469a3216adb8d8fd96d&sender_id=440578913454806266

URL-5. https://tr.pinterest.com/pin/440578776064533497/feedback/?invite_code=4b079b850e4d4f858b166833399c46eb&sender_id=440578913454806266

URL-6. https://tr.pinterest.com/pin/440578776065069990/feedback/?invite_code=d2a44b7de40c4f3dabb1420b1d556c00&sender_id=440578913454806266

URL-7.http://loppberga.blogspot.com/2013/09/avslut-i.html

URL-8. http://3.bp.blogspot.com/_FT45S2NeCtg/S1jDbPFEpbI/AAAAAAAAC-0/s0WMtkRL7V8/s1600-h/DSC_0892.JPG

URL-9. https://tr.pinterest.com/pin/440578776065069929/feedback/?invite_code=893d0ce2bb2a493fa75b956f2e890234&sender_id=440578913454806266

URL-10. https://tr.pinterest.com/pin/440578776064533512/feedback/?invite_code=f16baadc000641ec9898a2167ac64108&sender_id=440578913454806266

URL-11. https://tr.pinterest.com/pin/440578776065069978/feedback/?invite code= 2ce2154d16e14a7097cbe36a7d9af05c&sender_id=440578913454806266

URL-12. https://tr.pinterest.com/pin/440578776065069991/feedback/?invite_code=1aa7f1ffa17d436b99970ddff729f028&sender_id=440578913454806266

ISPARTA İLİNİN EKİM 2020-MART 2021 TARİHLERİ ARASINDAKİ HAVA KALİTE PARAMETRELERİNİN HYSPLIT PROGRAMI İLE MODELLENMESİ

M. Yunus PAMUKOĞLU[1]
Ali TEKELİ[2]

[1]Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye
[2]Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

1. Giriş

Hava Dünya'yı çevreleyen yüksek oranda oksijen ve azot içeren renksiz ve kokusuz bir gaz kütlesidir ve canlıların yaşamı için hayati bir öneme sahiptir. Hava kirliliği tanımı ise ‘‘havada katı, sıvı, gaz olarak bulunan yabancı maddelerin, insan sağlığına, canlı hayatına ve ekosisteme zararlı olacak derişim ve sürede bulunması’’ şeklinde yapılabilir. Hava kirliliğinin tarihçesi insanın ateşi bulmasına dayansa da 1800'lü yıllarda İngiltere'de başlayan sanayi devrimi ile beraber fosil yakıt tüketimi madencilik vb. faaliyetler giderek artarak önemli bir tehdit haline gelmiştir. İlk toplu ölüm ise 1930'da Belçika Meuse vadisinde gerçekleşti ve 1972 yılında Stockholm Konferansında temiz hava eylemleri yapıldı. Bu kitlesel ölümlerden sonra ilk yasal düzenleme 1955 yılında Hava Kirliliği Kontrol Kanunu adı altında İngiltere'de kabul edilmiştir. (Oruç ve ark.,)

Havaya kirletici maddelerin karışmasında 3 unsurun bir arada olması gerekir.

Kirlilik kaynağı

Taşıyıcı ortam

Alıcı ortam

Alıcı için hava kalitesinin nasıl olması gerekliliği hava kalitesi kriterleri denilen listelerle ortaya konulur. Bu kriterlerin yasal hale getirilmesi de standartları oluşturur. Bu kriterlere uyulması için 2 grup değişkenin bir arada düzenlenmesi gerekmektedir. Bu değişkenler;

Kaynak performansına ilişkin olanlar (yakıtlar, yakma teknolojileri)

Ortama ilişkin olanlar (kirletici kütlesinin atmosferdeki dağılımı)

Araştırması yapılan yörenin meteorolojik durumuna göre değişkenlik gösterebilir bu nedenle alıcı ortamın meteorolojik koşulları gerek bölgede hava kalitesinin oluşumunda gerekse de matematiksel olarak modellenmesi yardımıyla belirlenmesi büyük önem taşır. (Tırıs ve ark., 1993)

Bu çalışmanın amacı Isparta ilinde özellikle Ekim – Ocak aylarında ısınmaya bağlı hava kirliliği yaşanmaktadır ve akşam saatlerinde kalorifer, soba vb. kullanımına bağlı bölgesel ve yerel olarak havada kirlilik artışı yaşanmaktadır. Bu kirlilik sorununun en önemli etkilerinden biri şehrin çanak şeklinde olmasıdır. Bu çalışma ile Hava Kalitesi İzleme İstasyonlarındaki veriler karşılaştırılıp HYSPLIT programı ile geri modellemesi yapılması amaçlanmıştır (Isparta Çevre Durum Raporu, 2020).

2. Hava Kalitesi ve Isparta İli

Hava kirliliğinin tanımı, oluşturduğu sorunlar, havada bulunan kirletici kaynakları, kirletici maddeleri ve havanın insan ve canlı ekosistemi için önemi anlatılmıştır. Bir ülkede hava kalitesinin iyileştirilmesini sağlayacak ve kirliliği azaltacak en önemli olgulardan biri bilinçli, bilgilendirilmiş duyarlı vatandaş

olmaktır. Bir bölgedeki kirliliği ve kirliliğin seviyesini tespit etmek için bir araç geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu araç kirlilik seviyesi hakkında yetkililerin verileri takibi vatandaşın ise kirlilik hakkında bilgi alması için gereklidir.

Bu amaçla, geliştirilen standart değerler gerek uyarıcı ve anlaşılabilir olması gerekse de kullanımı açısından yaygın olarak bir indekse çevrilerek sunulmaktadır (Kyrkilis vd, 2007)

2.1. Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) (Air Quality Index/AQI)

Hava Kalitesi İndeksi, kirletici partikül maddelerin emisyon ölçümüne dayanır. İndeks belirli kategorilerde farklı renk ve tanımlarla belirtilip her kirletici için ayrı ayrı düzenlenir. (Url-9)

2.2. Ulusal Hava Kitle İndeksi

Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği başta olmak üzere ulusal mevzuatımız ve sınır değerlerimize uygun olarak oluşturulmuştur. 5 temel kirletici için hava kalitesi indeksi hesaplanmaktadır.

Bu kirletici maddeler;

(PM10)
(CO)
(SO_2)
(NO_2)
(O_3)' tür.

Hava kalitesi değerlendirme ve yönetiminde limit değerlerinde kademeli azaltım ve uyarı eşikleri Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. Hava kalitesi değerlendirme ve yönetiminde limit değerlerinde kademeli azaltım ve uyarı eşikleri (Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği)

KİRLETİCİ	ORTALAMA SÜRE	LİMİT DEĞER		UYARI EŞİĞİ
		2019 (µg/m³)	2020 (µg/m³)	
SO_2	**saatlik** -insan sağlığının korunması için-	350	350	500 µg/m³ (hava kalitesinin temsili bölgelerinde bütün bir "bölge" veya "alt bölge"de veya en azından 100 km²'de – hangisi küçükse- üç ardışık saatte ölçülür)
	24 saatlik -insan sağlığının korunması için-	125	125	
	yıllık ve kış dönemi (1 Ekim'den 31 Marta kadar) -insan sağlığının korunması için-	20	20	
NO_2	**saatlik** -insan sağlığının korunması için-	250	240	400 µg/m³ (hava kalitesinin temsili bölgelerinde bütün bir "bölge" veya "alt bölge"de veya en azından 100 km²'de – hangisi küçükse- üç ardışık saatte ölçülür)
	yıllık -insan sağlığının korunması için-	40	40	
NO_X	**yıllık** -vejetasyonun korunması için-	30	30	----
PM_{10}	**24 saatlik** -insan sağlığının korunması için-	50	50	----
	yıllık -insan sağlığının korunması için-	40	40	
Pb	**yıllık** -insan sağlığının korunması için-	0,5	0,5	----
BENZEN	**yıllık** -insan sağlığının korunması için-	7	6	----
CO	**maksimum günlük 8 saatlik ortalama** -insan sağlığının korunması için-	10.000	10.000	----

Ulusal Hava Kalite İndeksi Kesme Noktaları Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Ulusal Hava Kalite İndeksi Kesme Noktaları (Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği)

İndeks	HKİ	SO_2 [µg/m³]	NO_2 [µg/m³]	CO [µg/m³]	O_3 [µg/m³]	PM10 [µg/m³]
		1 Sa. Ort.	1 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	24 Sa. Ort.
İyi	0 – 50	0-100	0-100	0-5.500	0-120[L]	0-50
Orta	51 – 100	101-250	101-200	5.501-10.000	121-160	51-100
Hassas	101 – 150	251-500	201-500	10.001-16.000[L]	161-180[B]	101-260
Sağlıksız	151 – 200	501-850	501-1.000	16.001-24.000	181-240[U]	261-400
Kötü	201 – 300	851-1.100	1.001-2.000	24.001-32.000	241-700	401-520
Tehlikeli	301 – 500	>1.101	>2.001	>32.001	>701	>521

L: Limit Değer
B: Bilgi Eşiği
U: Uyarı Eşiği

Çalışmada SO_2 ve NO_2 gazlarının saatlik ortalama değerleri, CO ve O_3 gazlarının son 8 saatlik ortalama değerleri ve PM10 toz değerinin son 24 saatlik ortalama değerleri hesaplanarak kullanılmıştır.

2.3. Isparta İli Kullanılan Yakıt Türleri ve Miktarları

Ağırlıklı olarak kış aylarının gelmesiyle fosil yakıt tüketimi ısınma vb. temel ihtiyaçlara bağlı olarak artış göstermektedir. Sanayi, fabrika ve diğer endüstrilerin yakıt tüketimi il genelindeki kirlilik miktarını önemli oranda etkiler. 2020 yılı kullanılan yakıt türleri ve miktarları Tablo 3.3'de verilmiştir.

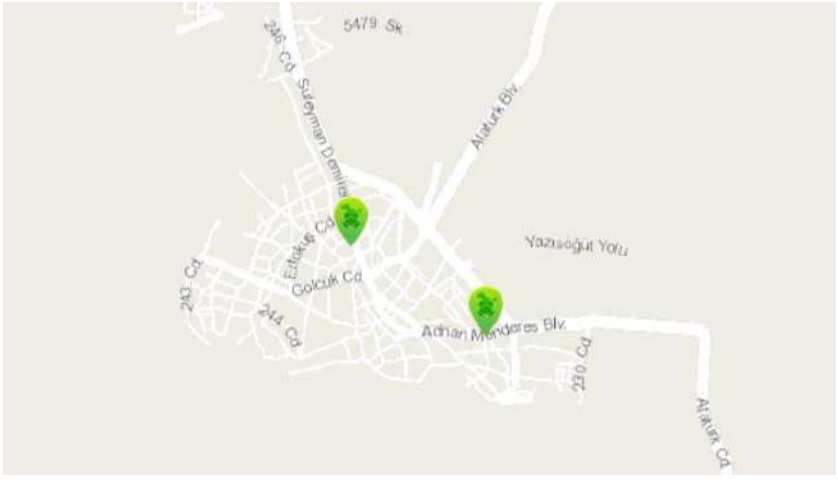
Tablo 3.3. 2020 yılında kullanılan yakıt türleri ve miktarları (İl Sanayi ve Teknoloji Müdürlüğü-Toros gaz, Isparta Belediye Başkanlığı, 2021)

	Katı Yakıt			Doğalgaz		Fuel Oil	
	Kullanım Yeri	**Cinsi**	**Tüketim Miktarı (ton)**	**Kullanım Yeri**	**Tüketim Miktarı (sm^3)**	**Kullanım Yeri**	**Tüketim Miktarı (kg)**
Sanayi	Üretim tesisleri	**Linyit Kömürü**	225599	sanayi	46.189.476,93	Üretim Tesisleri	264175000
	Üretim tesisleri	Taş Kömürü	4518838	Üretim tesisleri	22917068		
	Üretim Tesisleri	Odun	2526				
	Tüketim Miktarı (ton)			**Tüketim Miktarı (sm^3)**		**Tüketim Miktarı (m^3)**	
Konut	**8.086**			91.072.038,42			

sm^3 : Standart metreküp

2.4. Isparta İli Hava Kalite Ölçüm İstasyonları

Isparta İli sınırları içerisinde Hava kalitesi ölçümü yapan 2 adet istasyon vardır. ISPARTA VE ISPARTA-ORMAN adı verilen bu istasyonlar 24 saatlik kirletici parametre takibi yapmakta olup Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı SİM (Sürekli İzleme Merkezi) üzerinden veri kaydı yapılmaktadır. Hava Kalite Ölçüm İstasyonlarının konumu Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Hava Kalite İstasyonları (SİM,2021)

Çalışmada ISPARTA isimli Hava Kalite Ölçüm istasyonu verileri kullanılmıştır (Şekil 3.2).

Şekil 3.2. ISPARTA isimli Hava Kalite Ölçüm istasyonu Uydu görüntüsü (Isparta Çevre Durum Raporu, 2020)

3. Materyal ve Metot

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Hava Kalite İzleme İstasyonu günlük ve saatlik verileri kullanılmış olup excel programı yardımıyla ortalama değerler tablosu oluşturuldu ve çalışma kapsamında (Ekim 2020 – Mart 2021) karşılaştırmalı grafikleri hazırlanmıştır. Sınır değer aşımı yapılan günler HYSPLIT programı ile geriye dönük olarak PM10 taşınım özellikleri incelemesi yapılmıştır.

3.1. HYSPLIT (Hybrid Single – Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Programı

Çalışma kapsamında HYSPLIT modelinde bölge koordinatları haritada belirlenerek geri yörüngeler (back trajectory) oluşturulmuş toz taşınımını gösteren ve çeşitli kirleticileri gösteren haritalar elde edilerek incelenmiştir. HYSPLIT modeli hava kütlelerinin kaynağını ve kaynak - alıcı ilişkisini kurmak için kullanılan en verimli sistemlerdendir. Modelin yörünge hesaplarında kullandığı meteorolojik veriler çok geniş bir veri tabanına ihtiyaç duymaktadır (Stein, A. F. ve ark., 2015).

4. Araştırma Verileri ve Tartışma

Elde edilen veriler doğrultusunda 2020 Ekim ayı – 2021 Mart ayı kirletici parametreleri değer tablo ve grafikleri oluşturuldu. *Bu veriler ham veriler olup değişkenlik gösterebilmektedir. Oluşturulan tablolarda kaynak olarak Mevzuat bilgi sisteminde yer alan Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'nde yer alan limit değerler esas alındı. Tablo 5.1'de kirletici parametreleri limit değer tablosu verilmiştir.

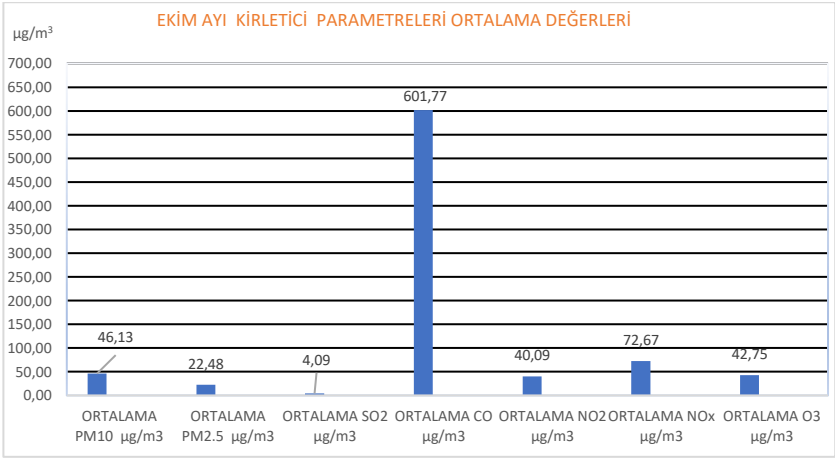
Tablo 5.1. Kirletici Parametreleri Limit Değer Tablosu (Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği,2020)

KİRLETİCİ	SO_2	NO_2	NO_X	PM10	CO	O_3
Ortalama Süre	24 saat	1 saat	yıllık	24 saat	8 saat	8 saat
Limit Değer	125 µg/m^3	200 µg/m^3	30 µg/m^3	50 µg/m^3	10000 µg/m^3	120 µg/m^3

** PM 2.5 verisi için limit değer yönetmeliklerce belirlenmemiştir.

4.1. Ekim Ayı (2020) Kirletici Parametre Değerleri

Araştırılan veriler doğrultusunda aylık ortalama değerler Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ekim ayı Kirletici Parametreleri Ortalama Değerleri

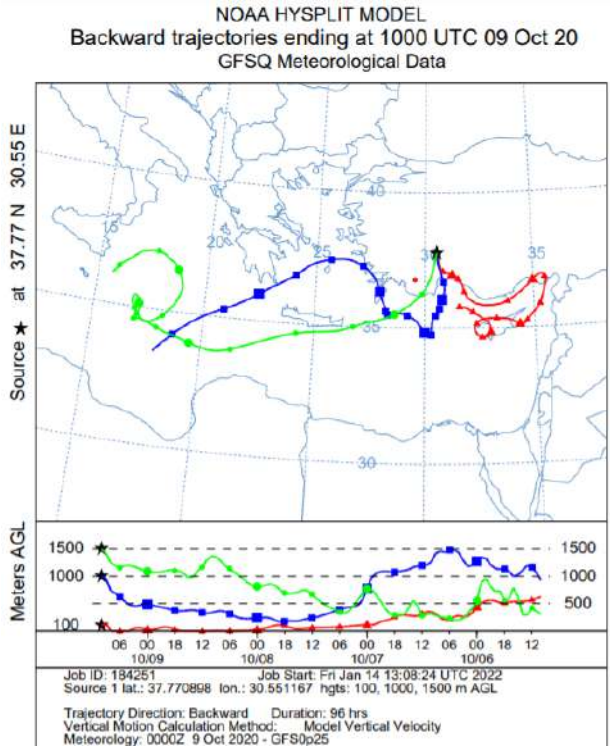
Aylık ortalama değer bazında kirletici parametreleri limit değer aralığında olsa da Ekim ayı PM10 değerinde 11 adet günlük limit aşımları olmuştur. Limit aşımı olan tarih ve kirlilik değeri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Limit Aşım – Tarih Tablosu

TARİH	PM10 µg/m3
5.10.2020	74,78
6.10.2020	81,98
7.10.2020	77,99
8.10.2020	59,15
9.10.2020	51,32
17.10.2020	54,06
18.10.2020	55,45
23.10.2020	50,62
24.10.2020	57,46
25.10.2020	67,99
26.10.2020	56,82

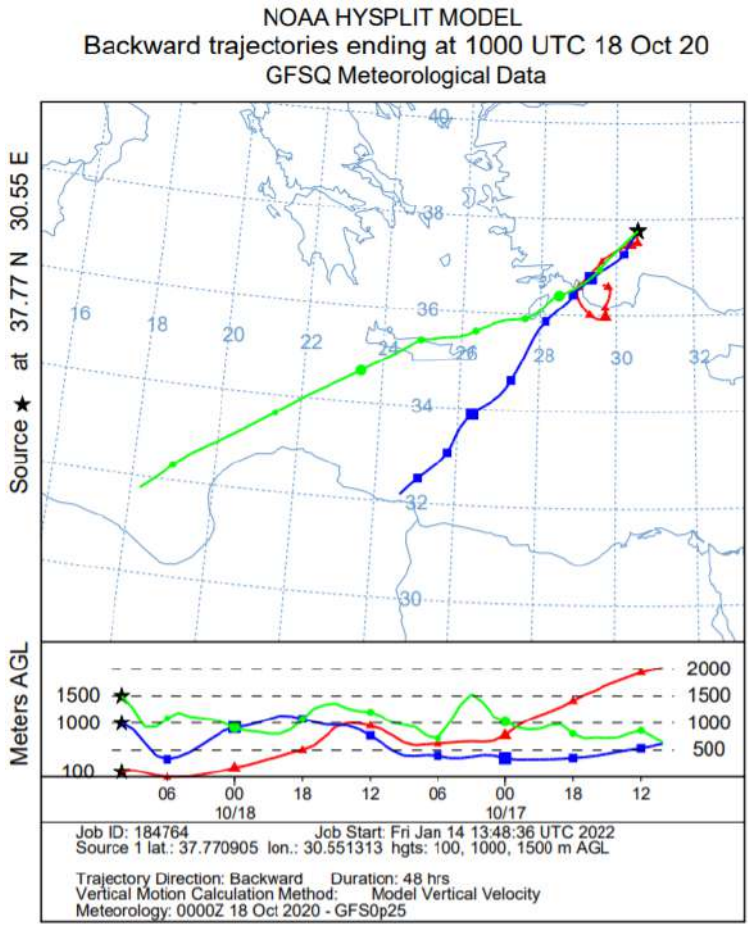
5.1.1. HYSPLIT ile Geri Yörüngeler Oluşturma

Yukarıda verilen limit aşım tarihleri doğrultusunda ilk olarak 05.10.2020 - 09.10.2020 tarihleri arası HYSPLIT modellemesi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



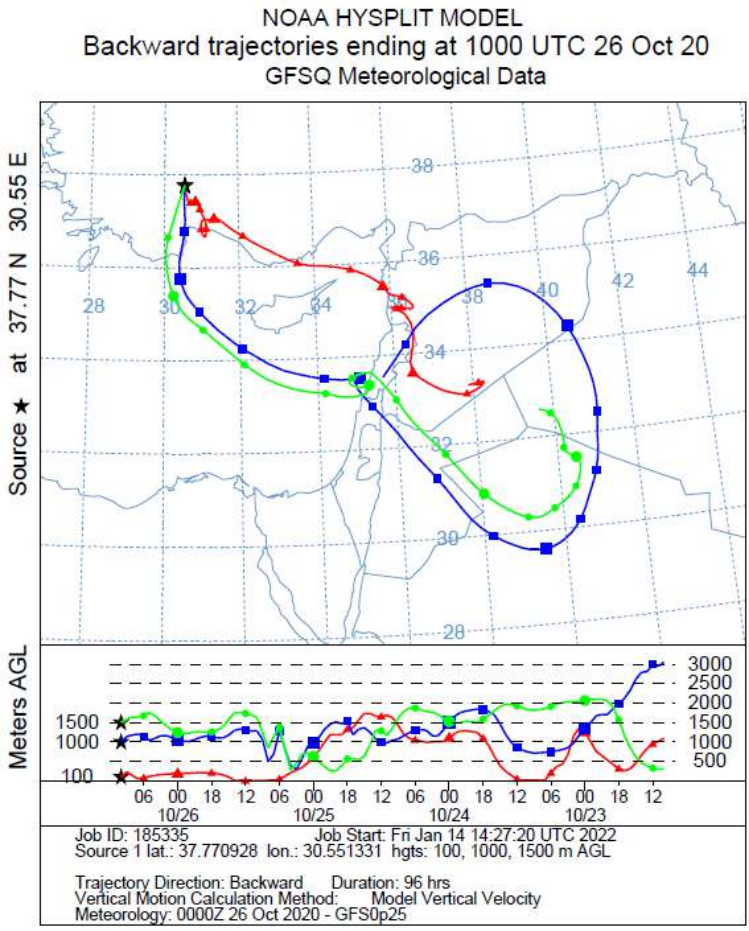
Şekil 5.2. (05.10.2020 - 09.10.2020) tarihleri arası HYSPLIT modellemesi

Modelleme incelendiğinde PM10 taşınımlarının geriye dönük taramasında Malta açıkları (1500 m), Libya kıyıları (1000 m), Antalya ili açıklarından (500 m) taşınımın gerçekleştiği ve ağırlıklı olarak Akdeniz bölgesinin farklı bölümlerinden gerçekleştiği belirlenmiştir. Denizden yükseklik olarak 100 m – 1000 m – 1500 m alınmıştır. 17.10.2020 – 18.10.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. (17.10.2020 – 18.10.2020) tarihleri arası HYSPLIT modellemesi

Modelleme incelendiğinde PM10 taşınımlarının geriye dönük taramasında Libya Sirte açıklarından (1500 m), Libya Tobruk kıyısından (1000 m), Muğla – Antalya sınırı Uyluk Tepe bölgesinden PM10 taşınımı gerçekleştiği belirlenmiştir. Uyluk Tepe bölgesinde mermer ocağı faaliyetleri artışta olduğu bilinmektedir (Url-13). 23.10.2020 – 26.10.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.4'de verilmiştir.

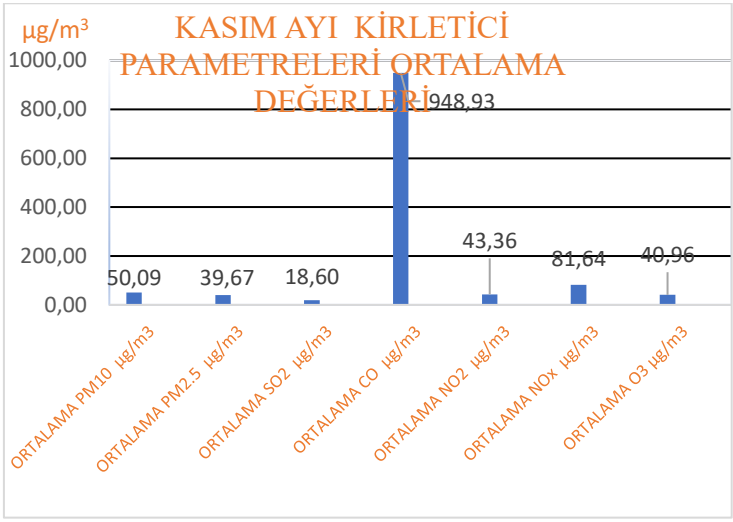


Şekil 5.4. (23.10.2020 – 26.10.2020) tarihleri kapsayan HYSPLIT modellemesi

Modelleme incelendiğinde PM10 taşınımlarının geriye dönük taramasında Ürdün Rukban yerleşiminden Lübnan kıyılarından (1500 m), Lübnan Beyrut açıklarından sırasıyla Suriye, Ürdün ve Batı Şeria bölgelerinden (1000 m), Suriye Şam kentinden (100 m) PM10 taşınımı gözlemlenmiştir.

4.2. Kasım Ayı (2020) Kirletici Parametre Değerleri

Araştırılan veriler doğrultusunda aylık ortalama değerler Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Kasım ayı Kirletici Parametreleri Ortalama Değerleri

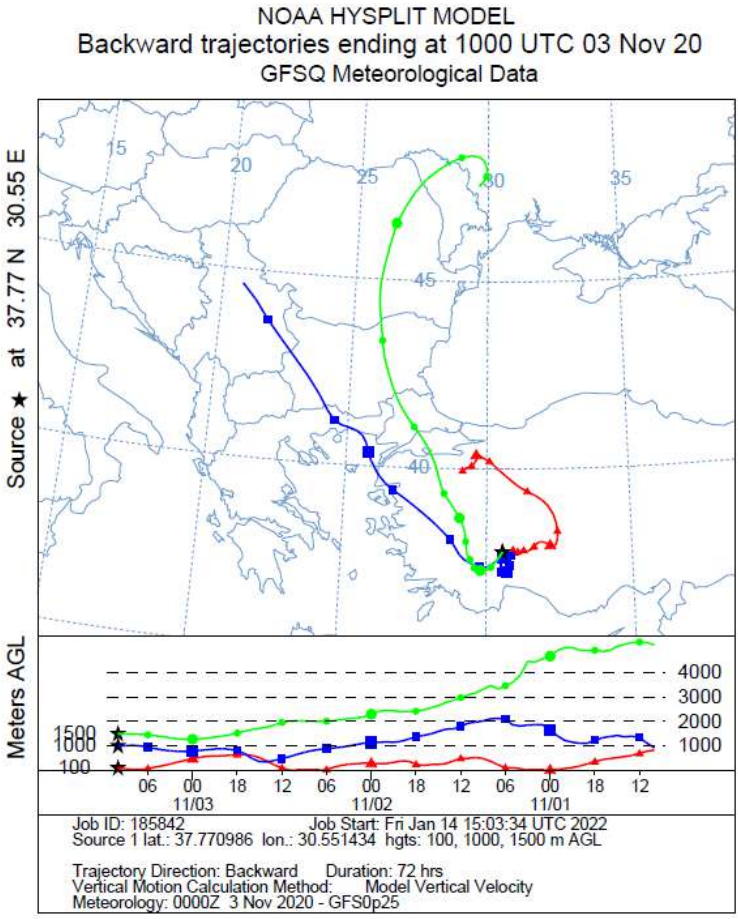
Kasım ayında yapılan aylık ölçümlerde yapılan günlük ölçümlerde diğer kirlilik parametreleri limit değerlere uygun ölçülse de PM10 parametresinde 10 adet günlük limit aşımı ölçüldü. Limit aşımı – Tarih tablosu Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Limit aşımı – Tarih tablosu

TARİH	PM10 µg/m3
03.11.2020	61,76
10.11.2020	58,67
13.11.2020	63,28
16.11.2020	64,55
17.11.2020	80,37
18.11.2020	82,72
24.11.2020	101,69
28.11.2020	89,62
29.11.2020	111,95
30.11.2020	124,16

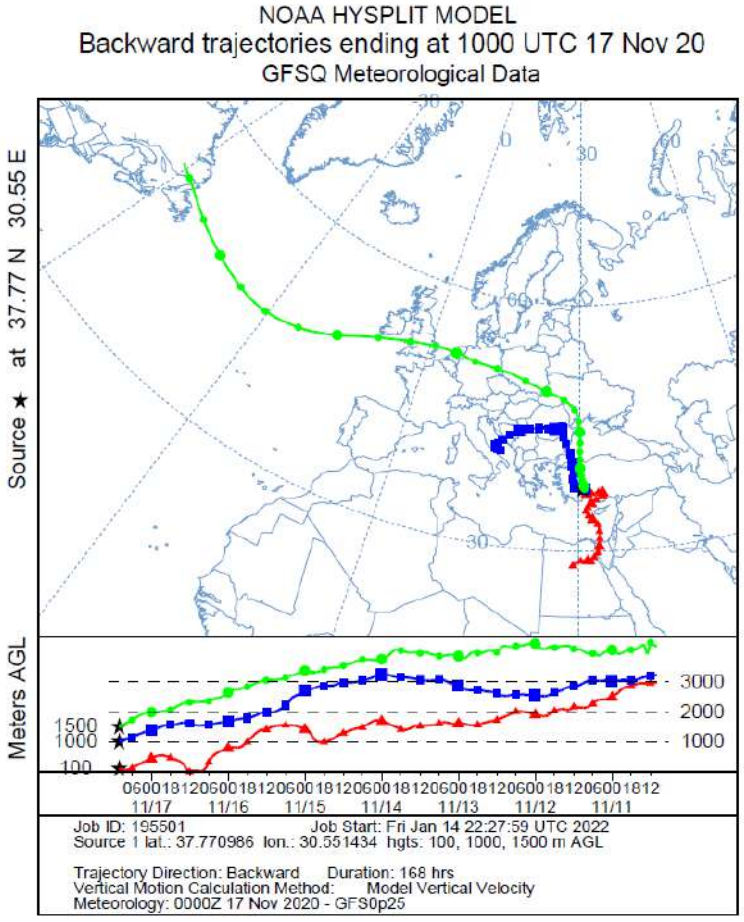
5.2.1. HYSPLIT ile Geri Yörüngeler Oluşturma

03.11.2020 tarihinin 72 saatlik geri yörüngesini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.6'da verilmiştir.



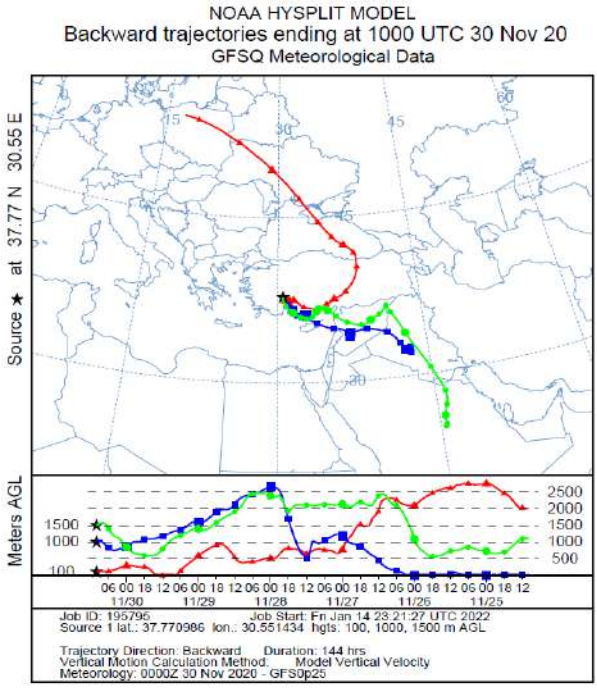
Şekil 5.6. (03.11.2020) tarihinin 72 saatlik geri yörüngesini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Moldova açıklarından (1500 m), Sırbistan Belgrad kenti yakınından (1000 m), Bursa Orhaneli (100 m) alanlarından PM10 taşınımı olduğu belirlendi. Balkan ülkelerinin farklı bölgelerinden taşınım olduğu gözlemlenmiştir. 10.11.2020 – 18.11.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. (10.11.2020 – 18.11.2020) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

İngiltere Cardiff kıyıları Fransa, İtalya ve Yunanistan ilerleyişiyle (1500 m), Yunanistan çıkışlı Balkan ülkeleri güzergâhı (1000 m) ve Karadeniz açıklarından (100 m) PM10 taşınımı gözlemlenmiştir. 24.11.2020 – 30.11.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.8'de verilmiştir.

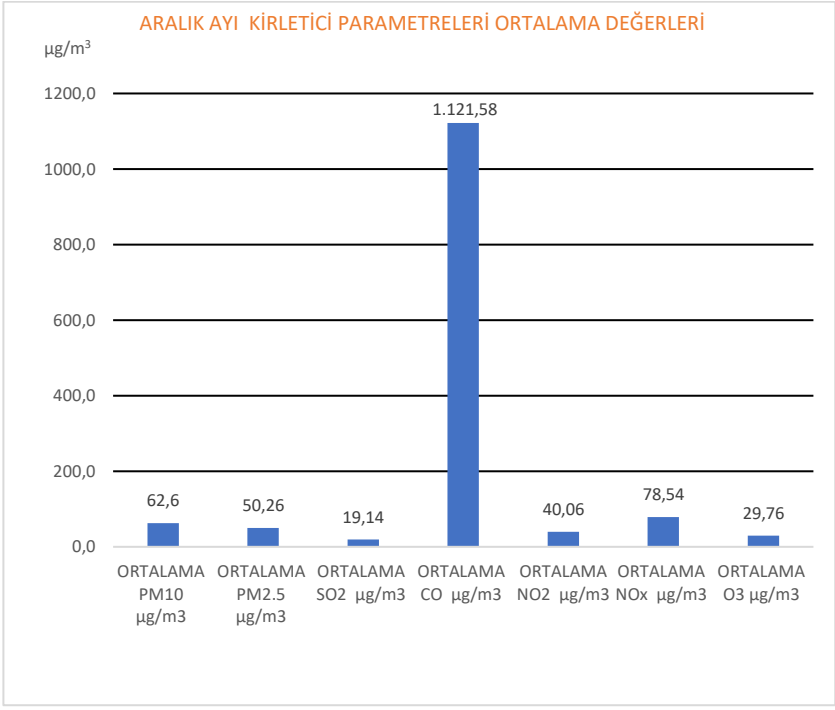


Şekil 5.8. (24.11.2020 – 30.11.2020) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Suudi Arabistan merkezli (1500 m) çöl tozları, Irak merkezinden hareketli Akdeniz kıyılarından (1000 m) ilerleyiş gösteren ve Polonya merkezli Karadeniz kıyılarından ilerleyen Balkan ülkeleri üzerinden (100 m) taşınım gösteren PM10 kaynakları gözlemlenmiştir.

4.3. Aralık Ayı (2020) Kirletici Parametre Değerleri

Araştırılan veriler doğrultusunda aylık ortalama değerler Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Aralık ayı Kirletici Parametreleri Ortalama Değerleri

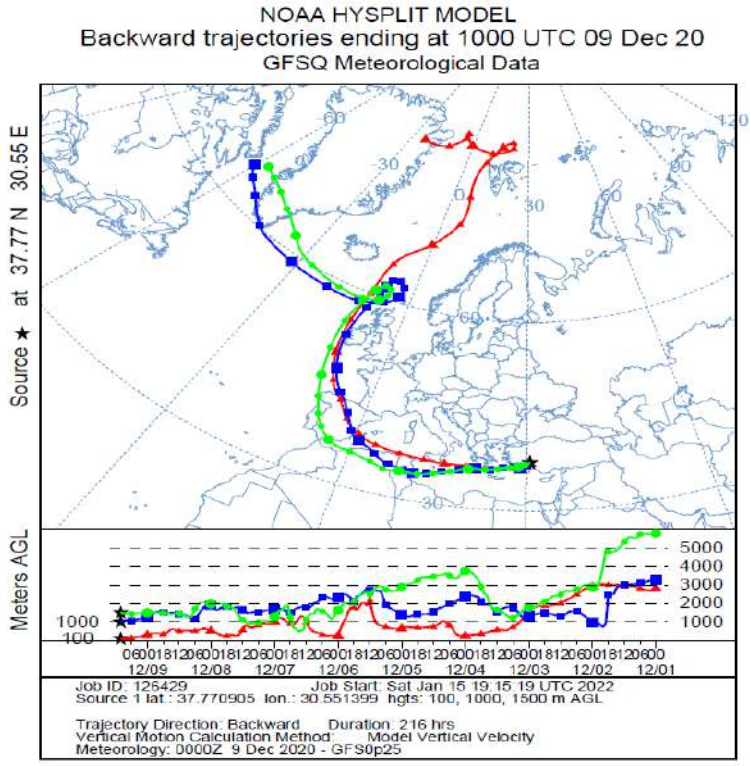
Aralık ayının günlük kirletici ortalamalarına bakıldığında günlük limit değer aşımı PM10 verisinde olup 21 adet limit değer aşımı ölçülmüştür. Tablo 5.4'de Limit Değer – Tarih tablosu verilmiştir. Bu limit değer aşınımının artışında en önemli sebeplerden bazıları fosil yakıt tüketimi, biokütle tüketimi ve endüstriyel faaliyetlerdir (Sari ve Esen, 2019).

Tablo 5.4. Limit aşımı – Tarih tablosu

TARİH	PM10 µg/m^3
01.12.2020	97,36
02.12.2020	75,8
03.12.2020	60,52
04.12.2020	68,36
05.12.2020	63,85
06.12.2020	93,17
07.12.2020	79,29
09.12.2020	78,4
18.12.2020	73,62
19.12.2020	86,9
20.12.2020	78,73
21.12.2020	87,53
22.12.2020	144,37
23.12.2020	62,86
24.12.2020	65,97
25.12.2020	105,02
26.12.2020	56,77
27.12.2020	53,51
29.12.2020	66,39
30.12.2020	113,98
31.12.2020	87,15

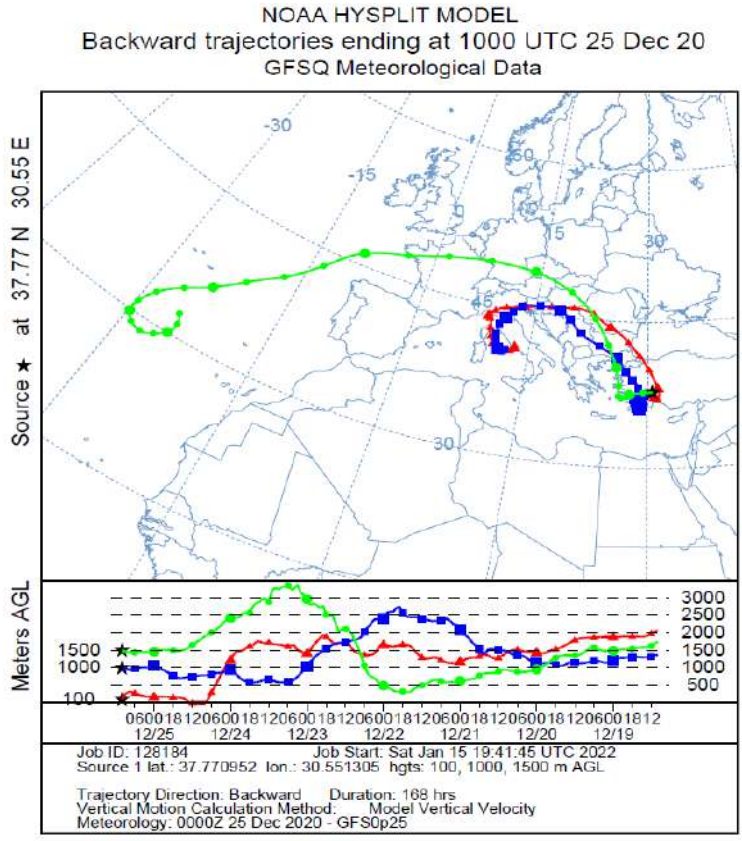
5.3.1. HYSPLIT ile Geri Yörüngeler Oluşturma

01.12.2020 – 09.12.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.10'da verilmiştir.



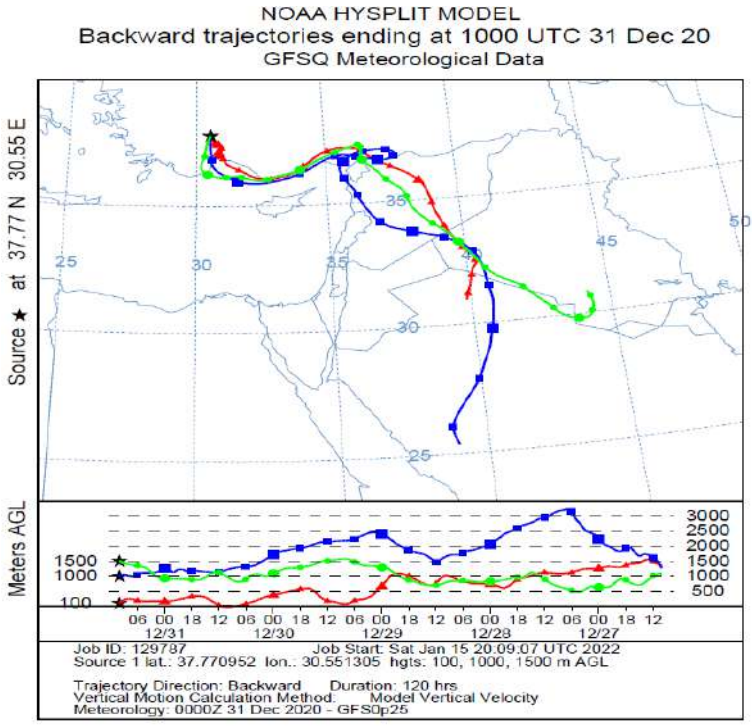
Şekil 5.10. (01.12.2020 – 09.12.2020) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Grönland'dan harekete başlayan PM10 kaynağı (1500 m) Kuzey Avrupa ardından Portekiz ve İtalya ardından Akdeniz'i geçerek ulaşmıştır. Grönland'ın diğer bir kıyısından harekete başlayan PM10 kaynağı (1000 m) Norveç denizi üzerinden Kuzey Avrupa ve Akdeniz'i geçerek ulaşım sağlamıştır. Denizden yüksekliği 100 m olarak hesaplanan PM10 kaynağı da 1500 m denizden yükseklik ile hesaplanan kaynağa yakın yörüngede hareket etmiştir. 18.12.2020 – 25.12.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. (18.12.2020 – 25.12.2020) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Portekiz Kuzey Atlantik Okyanusu açıklarından harekete başlayan PM10 kaynağı (1500 m) Batı Avrupa ülkelerini geçerek ulaşım sağlamaktadır. İtalya Tiren Denizi açıklarından harekete başlayan PM10 kaynağı Avrupa ülkeleri üzerinden geçiş yapmaktadır. İtalya Sezze bölgesinden çıkan PM10 kaynağı (100 m) Slovenya ve diğer Avrupa ülkeleri üzerinden geçiş yaparak ulaşım yörüngesini oluşturur. 25.12.2020 – 31.12.2020 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.12'de verilmiştir.

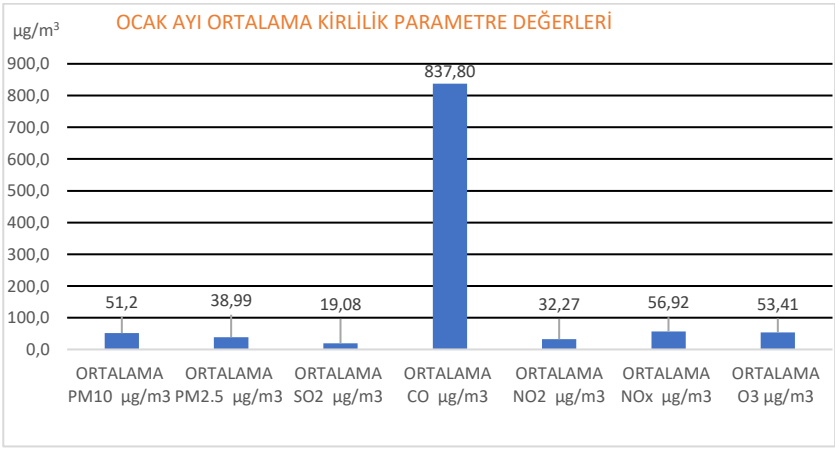


Şekil 5.12. (25.12.2020 – 31.12.2020) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Irak Samava kenti yakınlarından çıkan PM10 kaynağı (1500 m) Suriye'nin ardından Akdeniz kıyı şeridini takip edip ulaşmaktadır. Suudi Arabistan Birmah bölgesinden çıkan PM10 kaynağı (1000 m) Suriye üzerinden Akdeniz kıyı şeridini takip ederek ulaşmaktadır. Suudi Arabistan, Hazem Aljalamid bölgesinden (100 m) çıkan PM10 kaynağı da benzer yörüngeyi izlemektedir.

4.4. Ocak Ayı (2021) Kirletici Parametre Değerleri

Araştırılan veriler doğrultusunda aylık ortalama değerler Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Ocak ayı Kirletici Parametreleri Ortalama Değerleri

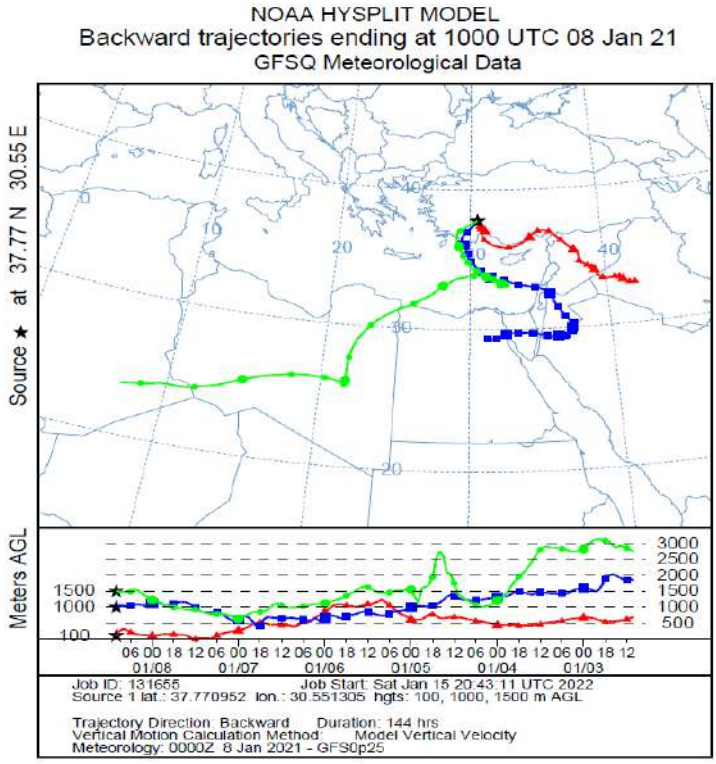
Ocak ayı kirletici parametrelerinde yapılan günlük ölçümlerde PM10 parametresinde 14 adet limit değer aşımı ölçülmüştür. Limit Aşımı – Tarih Tablosu Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5. Limit aşımı – Tarih tablosu

TARİH	PM10 µg/m3
02.01.2021	92,18
03.01.2021	95,22
04.01.2021	67,53
06.01.2021	59,74
07.01.2021	71,79
08.01.2021	70,16
10.01.2021	54,03
11.01.2021	81,94
12.01.2021	66
16.01.2021	77,95
21.01.2021	79,38
22.01.2021	109,77
23.01.2021	133,6
30.01.2021	73,85

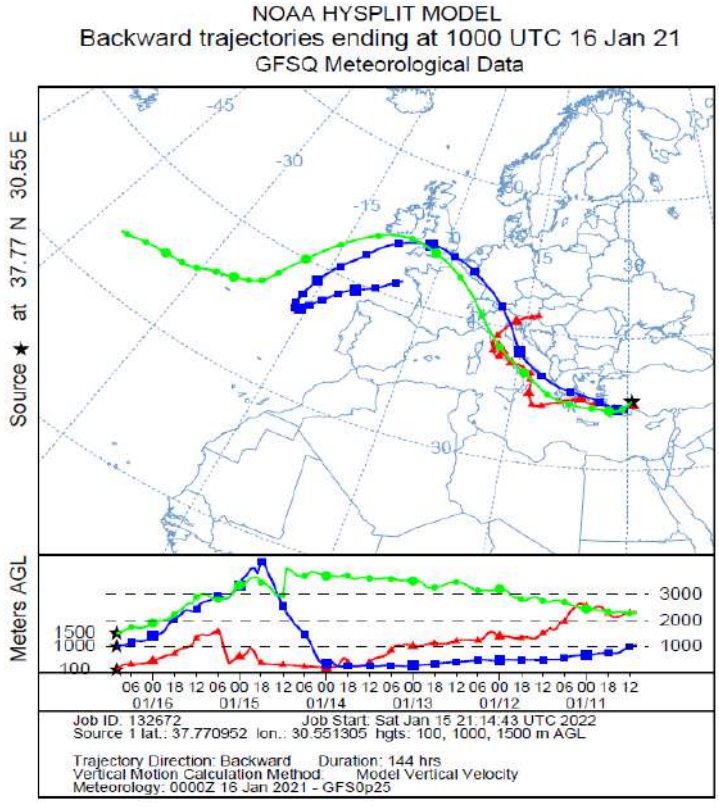
5.4.1 HYSPLIT ile Geri Yörüngeler Oluşturma

02.01.2021 – 08.01.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.13'te verilmiştir.



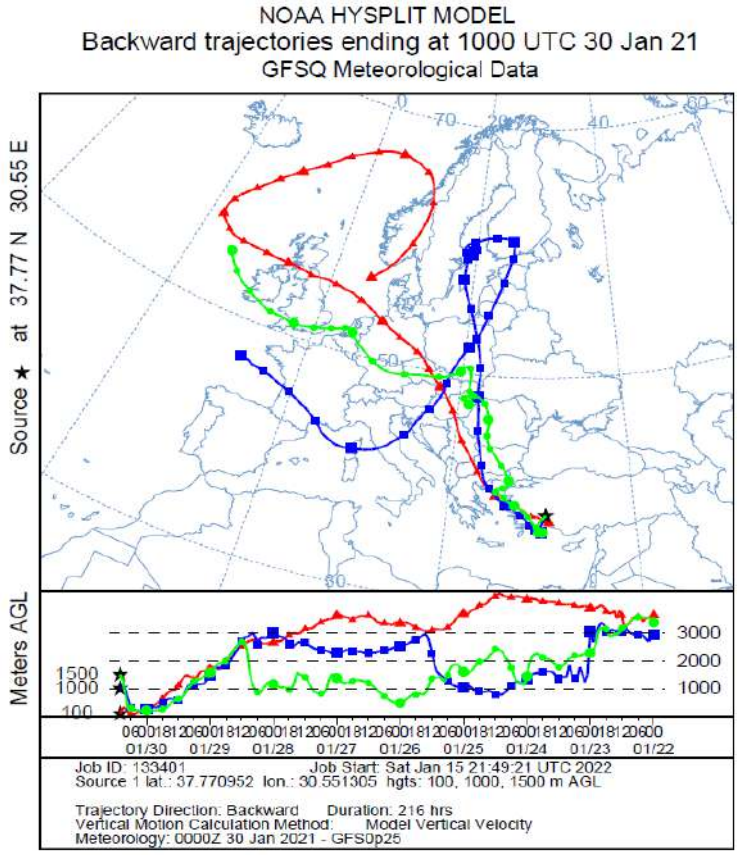
Şekil 5.14. (02.01.2021 – 08.01.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Cezayir – Libya sınırından çıkan PM10 kaynağı (1500 m) Akdeniz ve Kıbrıs üzerinden ulaşım sağlamaktadır. Mısır Al - Wasta bölgesinden çıkan PM10 kaynağı (1000 m) Süveyş Kanalı üzerinden Akdeniz'i geçerek ulaşır. Irak'tan çıkan PM10 kaynağı (100 m) Suriye, Adana ve Gaziantep üzerinden ilerleyip yörüngesini tamamlamaktadır. 10.01.2021 – 16.01.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.15. (10.01.2021 – 16.01.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Kuzey Atlas Okyanusu açıklarından çıkan PM10 kaynağı (1500 m) Kuzey Avrupa, İtalya, Yunanistan üzerinden hareketle yörüngesini tamamlamaktadır. Fransa kıyılarından çıkan PM10 kaynağı (1000 m) Avrupa kıtası üzerinden ilerleyerek Yunanistan üzerinden giriş yapıp yörüngesini tamamlamaktadır. Macaristan – Slovenya sınırından çıkan PM10 kaynağı (100 m) Malta açıklarından hareketle yörüngesini tamamlamaktadır. 21.01.2021 – 30.01.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.16'da verilmiştir.

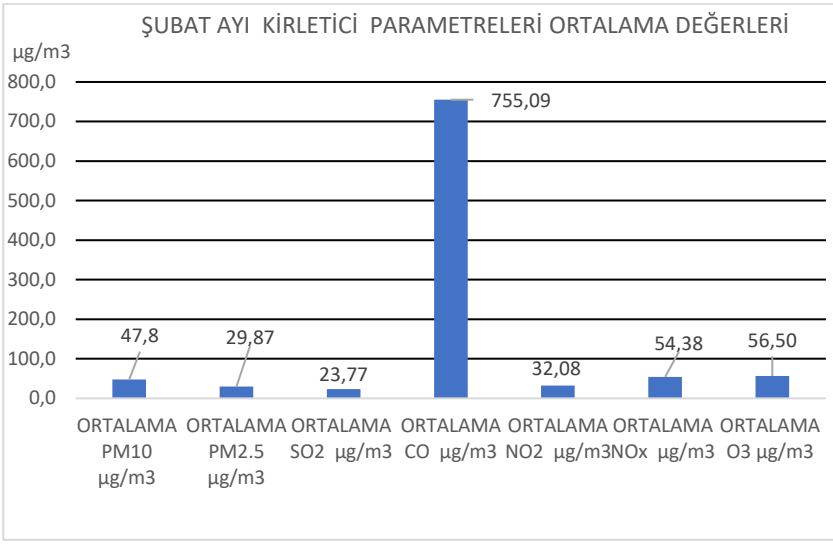


Şekil 5.16. (21.01.2021 – 30.01.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

İrlanda açıklarından çıkan PM10 kaynağı (1500 m) Çekya üzerinden ilerleyip Bulgaristan'ı da geçmesiyle giriş yapmaktadır. Fransa kıyılarından harekete geçen PM10 kaynağı (1000 m) İtalya üzerinden Baltık Denizine ilerleyip Avrupa ülkeleri üzerinden dönüş yaparak Yunanistan üzerinden giriş yapmaktadır. Kuzey Denizinden çıkan PM10 kaynağı (100 m) Birleşik Krallıklar üzerinden ilerleyip Sırbistan ve Yunanistan üzerinden yörüngesinde ilerlemektedir.

4.5. Şubat Ayı (2021) Kirletici Parametre Değerleri

Araştırılan veriler doğrultusunda aylık ortalama değerler Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17. *Şubat ayı Kirletici Parametreleri Ortalama Değerleri*

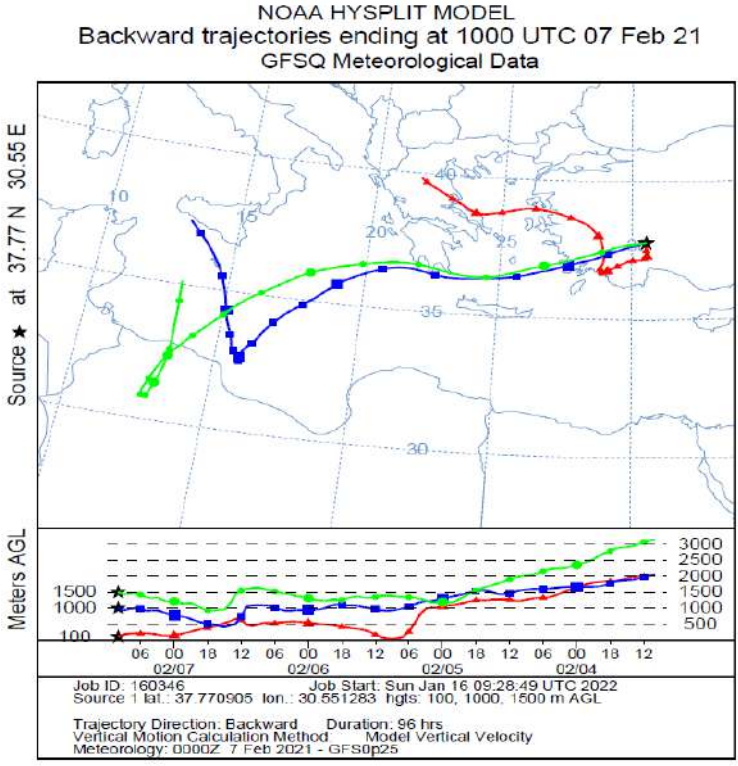
Şubat ayı verileri incelendiğinde 13 adet PM10 aşınımı belirlenmiştir. Tablo 5.6'da Limit Aşımı – Tarih tablosunda verilmiştir.

Tablo 5.6. Limit aşımı – Tarih tablosu

TARİH	PM10 µg/m^3
03.02.2021	75,15
04.02.2021	93,42
05.02.2021	66,97
06.02.2021	90,44
07.02.2021	72,36
11.02.2021	61,01
19.02.2021	50,65
21.02.2021	67,92
22.02.2021	56,84
23.02.2021	50,58
24.02.2021	75,03
27.02.2021	61,42
28.02.2021	91,5

5.5.1 HYSPLIT ile Geri Yörüngeler Oluşturma

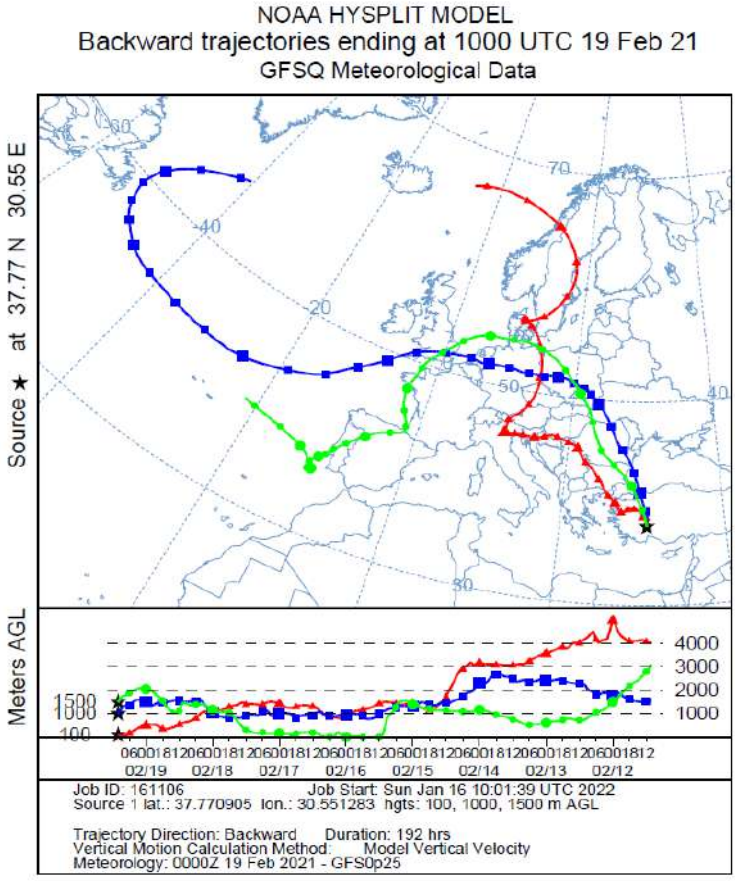
03.02.2021 – 07.02.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.18. (03.02.2021 – 07.02.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

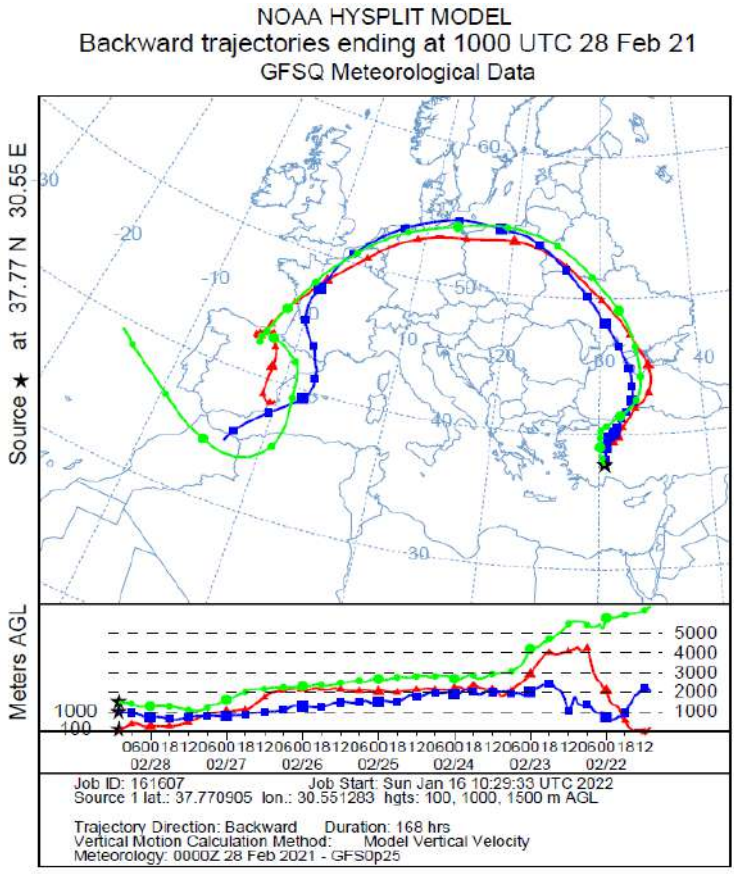
Malta açıklarından harekete başlayan PM10 kaynağı (1500 m) Akdeniz'i geçerek Muğla İli üzerinden giriş yapmaktadır. Sicilia bölgesinden harekete geçen PM10 kaynağı (1000 m) Akdeniz'i geçerek Muğla – Bodrum üzerinden giriş yapmaktadır. Yunanistan merkezli PM10 kaynağı (100 m) Ege Denizini geçerek Manisa üzerinden giriş yapmıştır.

11.02.2021 – 19.02.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.19'de verilmiştir.



Şekil 5.19. (11.02.2021 – 19.02.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Portekiz açıklarından çıkan PM10 kaynağı (1500 m) Kuzey Avrupa üzerinden giriş yapıp ulaşımını sağlamaktadır. Labrador Denizinden harekete geçen PM10 kaynağı (1000 m) Birleşik Krallık üzerinden Avrupa'yı geçerek ulaşmaktadır. Norveç Denizinden çıkan PM10 Kaynağı (100 m) İsveç üzerinden Kuzey Avrupa Ülkelerinden geçerek Karadeniz üzerinden giriş yapmaktadır. 21.02.2021 – 28.02.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.20'de verilmiştir.

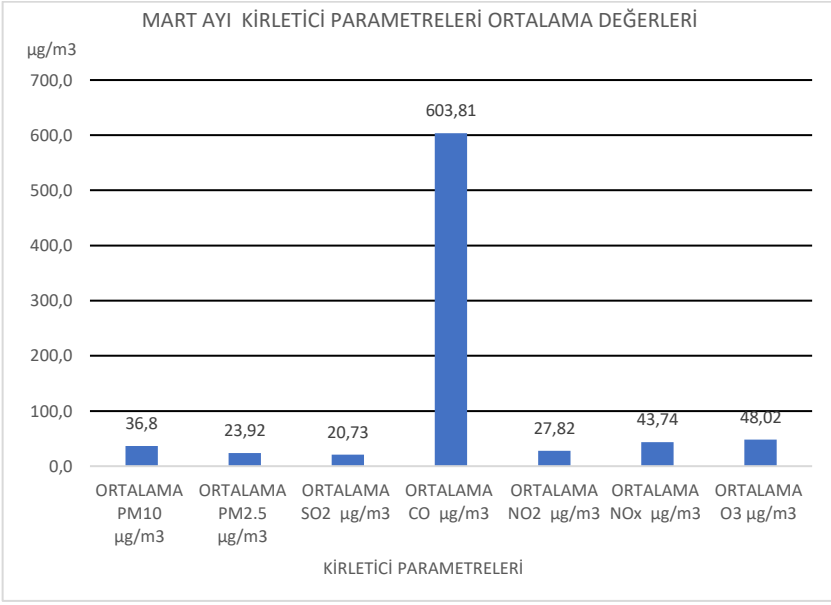


Şekil 5.20. (21.02.2021 – 28.02.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Cebelitarık Boğazı kıyılarından çıkan PM10 kaynağı (1500 m) İspanya ve diğer Avrupa ülkeleri üzerinden hareketle Karadeniz'i geçerek ulaşmaktadır. İspanya Benidorm kıyısından çıkan PM10 Kaynağı (1000 m) Avrupa ülkeleri üzerinden Ukrayna'nın ardından Karadeniz'i geçerek ulaşmaktadır. Diğer PM10 kaynağı da benzer bir yörünge ile hareket etmektedir.

4.6. Mart Ayı (2021) Kirletici Parametre Değerleri

Araştırılan veriler doğrultusunda aylık ortalama değerler Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21. Mart ayı Kirletici Parametreleri Ortalama Değerleri

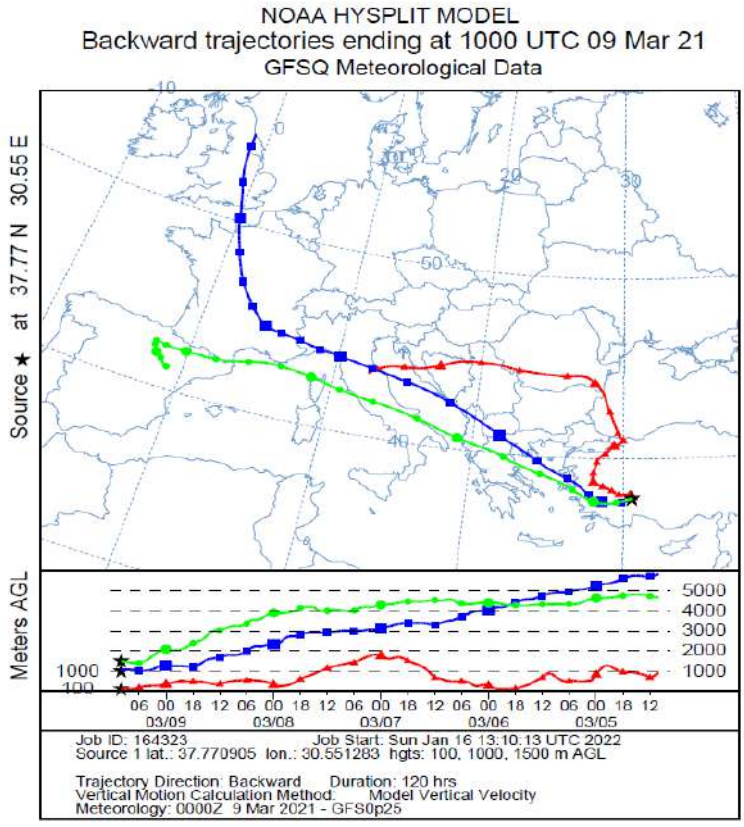
Mart ayında 24 saatlik ölçümlere bağlı ortalamalarda aylık olarak limit değerler sağlansa da PM10 parametresinde 8 adet limit değer aşımı ölçülmüştür. Tablo 5.7'de Limit Değer – Tarih tablosu verilmiştir.

Tablo 5.7. Limit aşımı – Tarih tablosu

TARİH	PM10 µg/m3
04.03.2021	59,86
05.03.2021	85,92
07.03.2021	58,38
09.03.2021	66,39
10.03.2021	79,03
11.03.2021	68,07
13.03.2021	63,09
14.03.2021	61,94

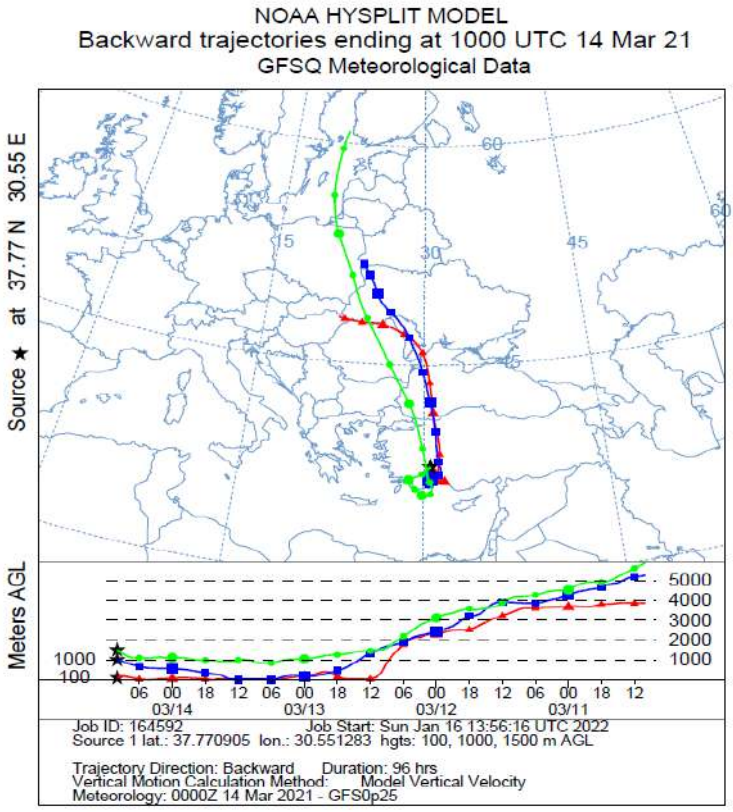
5.6.1. HYSPLIT ile Geri Yörüngeler Oluşturma

04.03.2021 – 09.03.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.22'de verilmiştir.



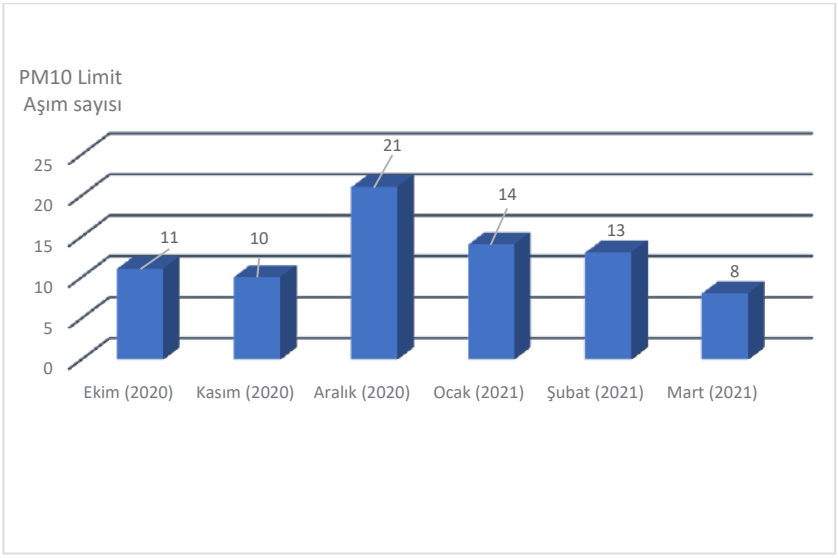
Şekil 5.22. (04.03.2021 – 09.03.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

İspanya Zaragoza bölgesinden çıkış gösteren PM10 kaynağı (1500 m) İtalya ve Yunanistan üzerinden ilerleyerek Ege Denizinden giriş yapmaktadır. Birleşik Krallık bölgesinden çıkış yapan PM10 kaynağı (1000 m) Fransa ve İtalya üzerinden ilerleyerek Ege Denizinden giriş yapmaktadır. İtalya'dan çıkış yapan PM10 kaynağı (100 m) Hırvatistan ve Romanya'yı geçerek Karadeniz üzerinden giriş yapmıştır. 10.03.2021 – 14.03.2021 tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi Şekil 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.23. (10.03.2021 – 14.03.2021) tarihlerini kapsayan HYSPLIT modellemesi

Finlandiya kıyılarından çıkış yapan PM10 kaynağı (1500 m) Polonya ve Romanya üzerinden ilerleyip Karadeniz'den giriş yapmaktadır. Belarus'dan çıkış yapan PM10 kaynağı (1000 m) Moldova üzerinden ilerleyip Karadeniz üzerinden geçmektedir. Macaristan üzerinden çıkış yapan diğer PM10 kaynağı da (100 m) Moldova üzerinden benzer yörüngeyi izlemektedir. Yukarıda verilen grafik ve tablolar incelendiğinde PM10 günlük limit aşım değeri sayısı 6 aylık süreç içerisinde Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. PM10 Limit aşım sayısı aylık karşılaştırması

PM10 parametresi kış mevsiminin yoğun olarak yaşandığı Aralık (21), Ocak (14), Şubat (13) aylarında en tepe limit aşım değerlerine ulaşmıştır. Bu aylarda tepe değerlere ulaşmasının en önemli nedenlerinden biri de ısınma ihtiyacına bağlı fosil yakıt vb. tüketiminin artması olarak açıklanabilir. PM10 uzun mesafeli taşınım ile hareket edebilir. Türkiye Orta Doğu ve Afrika kaynaklı çöl tozlarının etkisinde kalan bir ülke olup HYSPLIT programı ile geri yörüngeler oluşturulup kaynağı belirlendi.

4.7. PM ve SO_2'nin Meteorolojik Veriler ile İlişkisi

Isparta İlindeki Atmosferde Bulunan Kükürt dioksit (SO_2) ve Partikül Madde (PM) Konsantrasyonunun Çoklu Doğrusal Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi çalışmasında SO_2'nin meteorolojik verilerle ilişkisi ortaya konmuştur. Yapılan çalışmada 2009-2010 yılı kış ayları için SO_2'nin rüzgar hızı ve nem miktarı ile pozitif (+); sıcaklık, basınç, güneşlenme miktarı ve toplam yağış arasında negatif (-) ilişki tespit edilmiştir. SO_2 ile sıcaklık arasında yüksek negatif ilişki (-0,70) gözlenmiştir. Aynı dönem için PM ile basınç, nem ve toplam yağış arasında pozitif (+); rüzgâr hızı, sıcaklık ve güneşlenme miktarı arasında negatif ilişki tespit edilmiştir (Güngör et al., 2013).

5.7.1. PM10 / SO2 Oranı Değerlendirmesi

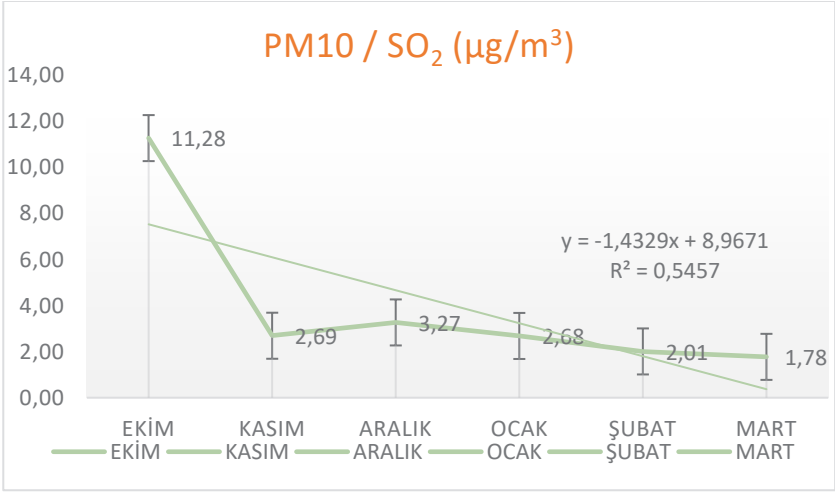
Hava Kalite istasyonunda ölçülen veri – kaynak ilişkisinde yön gösteren bu iki parametrenin birbirine oranı katı yakıtlarla ilgili olarak ısınma kaynaklı hava

kirliliğinin kontrolü yönetmeliğinde belirlenmiş kükürt ve kül/uçucu madde oranı ile karşılaştırmak amacıyla yapılır (Url-11). 2020 Ekim – 2021 Mart dönemi incelendiğinde PM10 ve SO_2 verisi bu verilerin oranı Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8. PM10 / SO_2 Oranı Değerlendirmesi

AYLAR	PM10 (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)	PM10 / SO_2 (µg/m³)
EKİM	46,13	4,09	11,28
KASIM	50,09	18,6	2,69
ARALIK	62,6	19,14	3,27
OCAK	51,2	19,08	2,68
ŞUBAT	47,8	23,77	2,01
MART	36,8	20,73	1,78

2020 Ekim – 2021 Mart dönemi incelendiğinde PM10/ SO_2 oranı grafiği Şekil 5.25'de verilmiştir.



Şekil 5.25. PM10 / SO_2 Oranı Grafiği

Şekil 5.25'de incelenen grafikte Ekim ayı PM10/ SO_2 oranı en yüksek değer çıkmıştır. Bunun önemli nedenlerinden biri SO_2 değerinin diğer aylara göre düşük seyretmesidir. Kış mevsiminin etkileri hissedilmeye başladıkça kükürt içeren yakıt vb. madde kullanımıyla bu oranın azaldığı görülmektedir. Bu araştırmada incelenen veriler kapsamında dar bir zaman aralığı incelendiğinden R^2 istenilen değerden uzak görünmektedir.

5. Sonuç

Türkiye ve Isparta ili, küresel, yerel ve yüzeysel rüzgarların etkisi altında kalmaktadır. Bu çalışmada HYSPLIT modellemelerinde denizden yükseklik 100 m, 1000 m, 1500, m alınarak yukarda verilen rüzgar türlerinin PM10 taşınımındaki etkisi ve çizdiği yörünge incelenmiştir. Bu modelleme sonucu Kuzey Batı Türkiye ve Isparta iline PM10 taşınımında Avrupa'dan taşınan partikül maddelerin önemli bir kirlilik kaynağı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra Türkiye coğrafi konumu olarak çöl tozlarının etkisi altında kalmaktadır. Sahra Çölü, Arabistan Yarımadası ve İran Çölü başta Türkiye olmak üzere Isparta ilini de önemli bir şekilde etkilemektedir.

Diğer bir açıdan 2020 Ekim – 2021 Mart döneminde Isparta ili hava kirletici parametreleri verileri incelendiğinde özellikle kış aylarında kömür, fosil yakıt, endüstriyel tesis faaliyetlerine bağlı dönemsel PM10 ve SO_2 artışları grafik ve tablolarla belirlenmiştir. Hava Kirliliği ölçüm istasyonları verileri incelendiğinde Isparta İli hava kirliliği oluşabileceği 1. derece riskli iller arasında yer alır. İlin çanak yapısında olması sebebiyle hava kirliliğinin yoğunlaştığı illerdendir. Bu yapısına bağlı olarak hava kirliliğinin azaltılması büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. Erişim Tarihi: 04.02.2022 (Sitesinden alınan görsel)
2. Ertürk, F., Hava Kirliliğinin Çevre Üzerindeki Etkileri, Derleyenler: Tırıs, M., Kalafatoğlu, E., Okutan, H., Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü, Gebze-MAM, Gebze-Kocaeli, 1993
3. George Kyrkilis, Arhontoula Chaloulakou, Pavlos A. Kassomenos, Development of an aggregate Air Quality Index for an urban Mediterranean agglomeration: Relation to potential health effects, Environment International, Volume 33, Issue 5, 2007, Pages 670-676
4. Güngör, A., & Sevindir, H. C. (2013). Isparta İlindeki Atmosferde Bulunan Kükürt dioksit (SO_2) ve Partikül Madde (PM) Konsantrasyonunun Çoklu Doğrusal Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(1), 95-108.
5. Irmak, M. E., & Aydilek, İ. B. (2019). Hava Kalite İndeksinin Tahmin Başarısının Artırılması için Topluluk Regresyon Algoritmalarının Kullanılması. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(3), 507-514.
6. Isparta Çevre Durum Raporu, 2020. T.C. Isparta Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, Isparta
7. Kılıç, A., Kum, S., Ünal, A., & Kındap, T. (2014). Marmara Bölgesi'ndeki Hava Kirliliğinin Modellenmesi, Kirlilik Azaltımı ve Maruziyet Analizi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16(1), 27-46.
8. Mevzuat Bilgi Sistemi, Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, Mevzuat No:12188, Resmi Gazete Sayısı:26898
9. Nazmi, Oruç, Ataman, E., & Kırkgöz, H. Eskişehir'de hava kirliliği ve doğal gazın tarihçesi: genel değerlendirme, Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi, (1)4, Aralık 2012, 161-170
10. Orhun, Z. (2013). Türkiye Coğrafi Bölgelerinde Örnek Şehirlerde Ölçülen Pm10 Değerlerinin Değişiminin İncelenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
11. Sari, M. F., & Fatma, Esen. (2019). PM10 ve SO_2 Konsantrasyonları ve Meteorolojik Parametrelerin Konsantrasyonlar Üzerine Etkileri. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 689-697.
12. Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport And Dispersion Modeling System. Bulletin of the American Meteorological Society, 96(12), 2059-2077.

13. Tırıs, M., Kalafatoğlu, E., & Okutan, H. (1993). Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü. Syf,69
14. Url-1<https://havakalitesi.ibb.gov.tr/Icerik/bilgi/kirletici-kaynaklar (Sitesinden alınan görsel)
15. Url-10<https://www.havaizleme.gov.tr/> Erişim tarihi: 23.12.2021
16. Url-11< https://webdosya.csb.gov.tr/db/giathm/menu/uzun-donem-degerlendirmesi-isparta_20190923024850.pdf> Erişim Tarihi: 02.01.2022
17. Url-2<https://www.yesilist.com/biliminsanlari-uyariyor-iklim-degisikligi-volkanik-patlamalara-da-sebep-olabilir/ (Sitesinden alınan görsel)
18. Url-3<http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/pm10.html> Erişim Tarihi: 11.12.2021
19. Url-4 <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/hava-kalitesinde-pm10-ve-so2-ortalamalari-i-85734> Erişim Tarihi: 11.12.2021
20. Url-5 <https://www.cevremuhendisligi.org/index.php/79-haberler/yazar-gc/1558-hava-kirletici-parametresi-olan-pm-2-5-pm-10-hakkinda-neler-biliyoruz>Erişim Tarihi: 11.12.2021
21. Url-6<http://www.cevrekorumadairesi.org/air/tr-index.php> Erişim Tarihi: 11.12.2021
22. Url-7<https://ispartada.gen.tr/isparta-genel-bilgiler/>Erişim Tarihi: 16.12.2021
23. Url-8< http://www.rehhber.com/default.asp?il=isparta&linkad=sehirdetay&id=20>
24. Url-9 <https://waqi.info/tr/> Erişim Tarihi: 17.12.2021

GÖMÜLÜ SİSTEMLERDE İŞLEVSEL GÜVENLİK VE GÜVENCE

Dr. Öğ. Üy. Mustafa Engin

Ege Üniversitesi Ege MYO Elektronik ve Otomasyon Bölümü
ORCID: 0000-0001-7247-4545

Giriş

Gömülü sistemler endüstriden, tarıma, sağlığa, haberleşmeye, ulaştırmaya ve hatta spora kadar her noktada hayatımızı kolaylaştıran aygıtların içerisinde denetim görevini yerine getirirler. Gömülü sistemlerin denetlediği cihazların çalışmaları sırasında onu kullanan insanlara zarar vermeden veya diğer cihazların çalışmasını engellemeden görevlerini yerine getirmeleri bekleriz. Bu beklentimizi karşılayabilmesi için gömülü sistemlerin üretimi ve kullanımı sürece bazı standartlara uyum sağlaması gerekir. Bu amaçla gömülü sistemlerin aktif çalışmaları süresince uyum sağlamaları gereken işlevsel güvenlik ve güvence standartları tanımlanmıştır.

Özellikle "güvenlik" (safety) ve "güvence" (security) günlük konuşmada neredeyse birbirinin yerine kullanılma eğiliminde olduğundan, iki terimi ayırt ederek başlayayım. Elektronik ve gömülü sistemlere uygulandığında işlevsel güvenliğin özel bir anlamı vardır: bir dizi arızaya yanıt olarak sistemin doğru şekilde davrandığının bir ölçüsüdür. İşlevsel güvenlik, mülkiyete veya çevreye verilen zararın bir sonucu olarak doğrudan veya dolaylı olarak kabul edilemez fiziksel yaralanma veya insan sağlığına zarar verme riskinden uzak olma anlamına gelir. Donanımda meydana gelebilecek hataların sonucu gömülü sistemi kullanan kişilere veya birlikte çalıştığı sistemlere zarar verme olasılığı varsa tasarımcının hem donanımsal hem de yazılımsal bu zararı engelleyebilecek çözüm sunabilmesi gerekir. Oluşabilecek diğer arızalar arasında insan hatası, çevresel koşullarındaki aşırı değişim, kopuk bağlantılar ve yaşlanma etkileri sayılabilir.

Fonksiyonel güvenlik fikri sadece aktif sistemler için geçerlidir. Bir evdeki ön kapı kilidi güvenlik sağlar, ancak herhangi bir arızayı aktif olarak önleyemez. Kapı, pasif güvenlik örneğidir. Fonksiyonel güvenlik, yerinde güvenlik mekanizmalarına sahip aktif bir sistemi kapsar. Bu mekanizmalar, bu arızaları tespit etmek, önlemek ve kontrol etmek veya zararlı etkilerini azaltmak için faaliyetler veya teknik çözümlerdir (Kahraman, 2022). Fonksiyonel güvenlik her zaman var olmuştur. Ancak daha fazla insan-makine etkileşimi ve otonom teknolojilerin fabrikalarda, arabalarda makinelere uygulanmasıyla, özel bir teknik alan ve mühendislik disiplini haline gelmiştir. Fonksiyonel güvenlik insan hayatı için herhangi bir risk oluşturmadan güvenli makine ve araç performansı ile ilgilenir.

Gömülü sistemin güvenceli olması oldukça farklıdır. Yüksek düzeyde güvenceli olmak, hiçbir özel bilginin dışarı sızmayacağı ve sistemi kontrol etmek için hiçbir kötü niyetli aracının içeri giremeyeceği anlamına gelir. Sistem kimlik doğrulaması, gizlilik, bütünlük, yeniden üretilmemesi ve erişim kontrolü için uygun güvenceli olması kritik öneme sahiptir. Güvenceli olma, genellikle bir

yazılım konusu olarak düşünülse de arabellek taşmalarını kullanan iyi bilinen açıklar sayesinde, donanım için de aynı derecede önemlidir. Bu, birçok yaygın mikroişlemcideki Meltdown ve Spectre güvence açıklarının 2018'de açıklanmasıyla çarpıcı biçimde doğrulanmıştır (Bennett et al., 2018; Trippel et al., 2018).

Endüstri 4.0 ve bir bütün olarak güvenlik endüstrisi göz önüne alındığında, yeni küresel tahminlere göre işle ilgili kazaların ve yaralanmaların maliyeti yılda 476 milyar Euro'ya ulaşıyor. Yani endüstriyel güvenlik sorunu nispeten ciddidir; bu nedenle, fiziksel yaralanma ve insanların sağlığına zarar vermeden gömülü bir uygulamanın güvenli çalışmasının nasıl sağlanacağı çok önemlidir. İşlevsel güvenlik, mülkiyete veya çevreye verilen zararın bir sonucu olarak doğrudan veya dolaylı olarak kabul edilemez fiziksel yaralanma veya insan sağlığına zarar verme riskinden özgür olma anlamına gelir (Joshi & Heimdahl, 2005; Zhang et al., 2010). Güvenlik açısından kritik bir gömülü uygulama, güvenli çalışma için ilgili işlevsel güvenlik standartlarına uymalıdır. Otomotiv elektroniği, endüstriyel güvenlik bileşenleri, fabrika otomasyonu, proses endüstrisi, nükleer güç enstrüman kontrolü, demiryolu trafik sinyalleri, akıllı şebeke ve güvenlikle ilgili diğer birçok alanda güvenlik sorunları mevcuttur (Xie et al., 2021).

İşlevsel güvenlik ve güvence, birçok uygulamada kaçınılmaz derecede gereklidir. Otonom araçlar bu gerekliliği en iyi açıklayan bir örnektir. Hiç kimse bir otonom arabanın ters trafiğe girmesine veya kötü bir bilgisayar korsanının kontrolü ele geçirip kasten bir kazaya neden olmasını istemez. Nükleer santraller, askeri sistemler ve vücut içerisine yerleştirilmiş tıbbi cihazlar hem işlevsel güvenlik hem de güvencenin kaçınılmaz ve kritik olduğu diğer birkaç uygulamadır. Uydular ve diğer uzay kaynaklı uygulamalar, kozmik ışınlar nedeniyle yüksek güvenlik riskine sahiptir. Güvenlik, Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları için de büyük bir endişe kaynağıdır, çünkü bunlar, uygun yapılandırma konusunda eğitim almamış kişiler tarafından kurulmalıdır ve denetimleri kötü saldırganların eline geçmeyecek şekilde korunmalıdır. Bunun gibi daha birçok örnek sayılabilir. Birçok uygulama, hedef pazarlarının ihtiyaçlarını karşılamanın yanı sıra profesyonel standartları da karşılamalıdır. İşlevsel güvenlik ve güvence, standardizasyon için nispeten yeni bir çalışma alandır, dolayısıyla henüz tam anlamıyla tüm gereksinimlere yanıt verecek bir standart geliştirilememiştir (Royuela et al., 2017).

Güvenlikle ilgili sistemler endüstride proses endüstrisi, enerji santralleri ve makineler gibi birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Üreticiler, parçaları farklı kaynaktan alıp sistem haline getiren birleştiriciler ve kullanıcılar giderek daha fazla güvenlik standartlarına uygun sistemler talep etmektedirler. Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla ilk olarak 2005 yılında IEC 61508-0

standardı kabul edilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (Bellairs, 2019). IEC 61508-0 standardı programlanabilir sistemler, aygıtlar ve devre elemanları ile ilgili karşılanması gereken güvenlik ve güvence standartlarını ve aşamalarını tanımlar. Bu standart, son yıllarda güvenlikle ilgili programlanabilir sistemleri tasarlamak, geliştirmek, onaylamak ve belgelemek için kullanılmaktadır. Aynı zaman diliminde uygulamaya bağlı, sektöre özel standartların geliştirilmesi yer almıştır. Gömülü sistemlerin çoklu disiplin yapısı gereği tek başına IEC 61508 tün güvenlik gereksinimlerin karşılayamaz. IEC 61508 temel standart kabul eden her sektörün kendi gereksinimlerini karşılayacak standartlar tanımlanması zorunlu hale gelmiştir. Bu gelişmeye örnek olarak proses endüstrisi için IEC 61511 ve makine endüstrisi için IEC 62061 verilebilir (Gall, 2008). Şekil-1'de her sektörün gereksinimlerini karşılamak amacıyla geliştirilen standartlar gösterilmiştir.

IEC 61508 – Şemsiye Standardı

IEC 61508-0 2005 yılında şemsiye güvenlik standardı olarak yayınlanmıştır. IEC 61508 serisi, elektrikli, elektronik veya programlanabilir elektronik (E/E/PE) sistemlerin ve ürünlerin yaşam döngüsü için işlevsel güvenlik standartları sağlar. Bu standart elektronik veya gömülü sistemlerin veya aygıtların parçaları olan ve otomatik olarak işlevsel güvenliği sağlayan sensörler, mikroişlemciler, kontrol mantığı ve aktüatör gibi elemanların sahip olması gereken özellikleri ve elemanların hangi kısıtlarla bir araya gelebileceklerini tanımlar.

IEC 61508, elektronik ve ilgili yazılımlardaki tüm güvenlik sistemlerine uygulanabilen tek tip bir teknik yaklaşımın geliştirilmesine olanak tanır. Geniş bir sektör yelpazesinde geçerli olan yatay bir standarttır. Standart, belirli bir sistem veya cihazın potansiyel risklerinin veya tehlikelerinin analizini gerektirir. Potansiyel bir tehlikenin olasılık seviyesini ve meydana gelmesi durumunda sonuçlarını belirlemek için kategoriler sağlar.

Şekil-1. IEC 61508'i temel alan sektörel işlevsel güvenlik standartları.

IEC 61508, bir sistemin belirtilen güvenlik fonksiyonlarını karşılama derecesini belirtmek için dört güvenlik entegrasyon seviyesi (**S**afety **I**ntegration **L**evels, SIL) tanımlar. Tablo-1'de gösterildiği gibi güvenlik entegrasyon seviyesini SIL 1, SIL 2, SIL 3 ve SIL 4 olmak üzere dört seviyeli tanımlamıştır (Kathiresh & Neelaveni, 2021a).

Tablo-1. IEC 61508 Güvenlik entegrasyon seviyeleri.

Safety Integrity Level	Probability of Failure on Demand	Risk Reduction Factor
SIL 4	$\geq 10^{5}$ to $<10^{4}$	100,000 to 10,000
SIL 3	$\geq 10^{4}$ to $<10^{3}$	10,000 to 1,000
SIL 2	$\geq 10^{3}$ to $<10^{2}$	1,000 to 100
SIL 1	$\geq 10^{2}$ to $<10^{1}$	100 to 10

IEC 61508 standardı yedi bölümden oluşur

- IEC 61508-1, Genel gereksinimleri tanımlar.
- IEC 61508-2, Elektrik/elektronik/programlanabilir gereksinimler Elektronik güvenlikle ilgili sistemleri tanımlar.
- IEC 61508-3, Yazılım gereksinimlerini tanımalar.

- IEC 61508-4, Tanımlar ve kısaltmaları içerir.
- IEC 61508-5, Emniyetin belirlenmesi için yöntem örnekleri ve bütünlük seviyelerini açıklar.
- IEC 61508-6, IEC 61508-2 ve IEC 61508-3'ün uygulanmasına ilişkin yönergeleri içerir.
- IEC 61508-7, Tekniklere ve önlemlere genel bakış.

Gömülü kodlama, otomobiller, uçaklar veya tıbbi cihazlar gibi daha büyük cihazlara kurulan ve belirli bir özel işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmış sistemleri güçlendirmeye yardımcı olur. Her özel işlev, gömülü kodlama yoluyla desteklenir. Herhangi bir güvenlik açığı gömülü sistemlerin güvenliği ve güvencesi için yıkıcı sonuçlara yol açabileceğinden, bu kod güvenilir ve hatasız olmalıdır. Bu nedenle, kodun güvenilir ve yüksek kalitede olmasını sağlamak için MISRA gibi bir kodlama standardı uygulanması önemlidir (Bagnara et al., 2018).

Kodlama kuralları ve yönergelerine uyulduğunda geliştirilen gömülü yazılım aşağıdaki özellikleri kazanmış olur.

- Güvenli: Zarar vermeden kullanılabilir.
- Güvenceli: Saldırıya uğramaz.
- Güvenilir: Her seferinde olması gerektiği gibi çalışır.
- Test edilebilir: Kod düzeyinde test edilebilir.
- Sürdürülebilir: Kod tabanınız büyüse bile korunabilir.
- Taşınabilir: Her ortamda aynı şekilde çalışır.

Kodlama standartlarının önemli olmasının nedeni, güvenlik, güvence ve güvenilirliği sağlamaya yardımcı olmalarıdır. Her gömülü yazılım geliştirme ekibi bir kodlama standardını kullanmalıdır. En deneyimli geliştirici bile farkında olmadan bir kodlama hatası yapabilir ve bu tek kusur küçük bir aksaklığa yol açabilir. Ya da daha kötüsü, ciddi bir güvenlik ihlali gerçekleşebilir. Kodlama standartlarını kullanmanın dört temel faydası vardır:

- Endüstri standartlarına uygunluk (ör. ISO).
- Tutarlı kod kalitesi, kodu kim yazarsa yazsın.
- Baştan itibaren yazılım güvenliği.
- Azaltılmış geliştirme maliyetleri ve hızlandırılmış pazara sunma süresi.

Gömülü sistem endüstrilerinde, uyumluluk için bu standartlar gereklidir. Çoğu gömülü sistem geliştiricisi C veya C++ programlama dillerini kullanır.

IEC 61508 Standardı, geniş ürün yelpazesindeki üreticiler, sistem kurucular, tasarımcılar ve bileşen ve alt sistem tedarikçileri tarafından kullanılır ve uygunluk değerlendirmesi ve belgelendirme hizmetleri için temel oluşturur. Emniyet sistemi yöneticileri, emniyet yaşam döngüsü aktivitelerinin değerlendirmelerini yürütmek için bu standardı referans olarak kullanırlar. Standart ayrıca birçok IEC

TC (Teknik Komite) tarafından kendi sektörlerine veya ürüne özel E/E/PE güvenlikle ilgili sistemleri kapsamında olan Uluslararası Standartları hazırlarken kullanmaktadırlar. Örneğin nükleer enerji sektörü, karayolu araçları sektörü, makine üreticileri sektörü kendi sistemleri için Uluslararası Standartları oluşturmak için IEC 61508 standardını şemsiye standart olarak kabul etmişlerdir (Bellairs, 2019).

Şekil-1.

ISO 26262 – Karayolu Araçları için işlevsel Güvenlik

ISO 26262 standardı arabalarda kullanılabilecek güvenli bir ürün yaratmak için tüm tedarikçilere, orijinal ürün üreticilerine kılavuzluk eder (Annable et al., 2022). Modern otomobillerde görülen arka görüş kamerası, navigasyon sistemi, fren sistemi ve şerit değiştirme uyarı sistemleri gibi özelliklerin fonksiyonel güvenlik standartlarına uyması gerekir. ISO 26262'ye dayalı otomotiv yazılımının fonksiyonel güvenlik doğrulaması, insan yaşamına zarar verebilecek istenmeyen arızalardan koruyacağı için kritik nitelikte bir süreçtir (Sini et al., 2019). Bu, bir tehlikeyi önlemek için potansiyel olarak güvenli olmayan arızaların tespit edilmesi ve kontrol edilmesiyle sistemlerin doğru şekilde çalışması gerektiği anlamına gelir. Tüm otomotiv uygulama tasarım süreçleri, bu belgede kısaca açıklanan gereksinimlerin çift yönlü izlenebilirliğini zorunlu kılan güvenlik standartlarına uygun olmalıdır (Avižienis et al., 2004). ISO 26262, IEC 61508 standardından derlenmiş risk tabanlı işlevsel güvenlik standardıdır. Sürücü destek sistemlerini, sürüş sistemleri ve araç dinamik denetim ünitesini içerir. Bu standart araç üretiminde işlevsel güvenlik aşamalarını aşağıdaki işlem basamakları ile gerçekleştirir.

- Gereksinimlerin tanımlanması.
- Tasarım.
- Uygulama.
- Birleştirme.
- Doğrulama.
- Onaylama.
- Konfigürasyon.

ISO 26262 standardının amacı otomobilin tasarımından başlayarak geri dönüşüme gidene kadarki kullanım ömründe güvenliği sağlamaktır. Bunu başarılı şekilde yapabilmesi için otomobilin tasarım düşüncesinden başlayarak üretimin her evresinde uyulması gereken kurallar doğru sınırlar çizilerek tanımlanmalıdır (Yamili & Kathiresh, 2021). ISO 26262 bu evreleri on bölümde tanımlamıştır.

- Bölüm 1: Kelime bilgisi.
- Bölüm 2: Fonksiyonel güvenliğin yönetimi.

- Bölüm 3: Konsept aşaması.
- Bölüm 4: Sistem düzeyinde ürün geliştirme.
- Bölüm 5: Donanım düzeyinde ürün geliştirme.
- Bölüm 6: Yazılım düzeyinde ürün geliştirme.
- Bölüm 7: Üretim ve işletme.
- Bölüm 8: Destekleyici süreçler.
- Bölüm 9: ASIL odaklı ve güvenlik odaklı analiz.
- Bölüm 10: Güvenlik standardına ilişkin kılavuz.

Tanımlanan standartlara uyum sağlayarak sistematik arızalar hasar verici etkisi ortaya çıkmadan kontrol altına alınabilir. Öte yandan rastgele oluşan donanım arızaları kolaylıkla belirlenir ve kontrol altına alınabilir, ortaya çıkabilecek hasarlar tamamen ortadan kaldırılamasa bile etkileri hafifletilebilir. Gömülü sistemi doğrudan kapsayan bölüm 5 donanım ve bölüm 6 yazılım geliştirme aşamalarıdır.

ISO 26262 riski dört seviyeli olarak tanımlar. Bu seviyelere ASIL (Automotive Safety Integrity Level) adı verilir, ASIL-A en düşük riski tanımlarken ASIL-D en yüksek riski tanımlar. Bu seviyelerin dışında aslında birde beşinci seviye vardır, bu seviyede tanımlı güvenlik bilgisi gerektirmeyen otomotiv parçasının kalite yönetimi standartlarına uyması istenir. Kısaca QM seviyesi olarak belirtilir (Furst & Bechter, 2016; Kathiresh & Neelaveni, 2021b; Mishra & Kumar, 2021). ASIL seviyesi üç faktöre göre belirlenir; önem (severity), maruz kalma (exposure), kontrol edilebilirlik. Önem dört ana başlıkta toplanmıştır.

- S0: Yaralanma olmayan.
- S1: hafif ile orta arası yaralanma.
- S2: Ciddi yaralanma (tedavi edilebilir seviyede)
- S3: Yaşam riski bulunandan ölümcül seviyede zarar görme (kurtuluşu mümkün değil).

Maruz kalma, belirli bir arızanın güvenlik tehlikesine yol açacağı koşulların olasılığıdır. Her koşulun olasılığı beş puanlık bir ölçekte sıralanır.

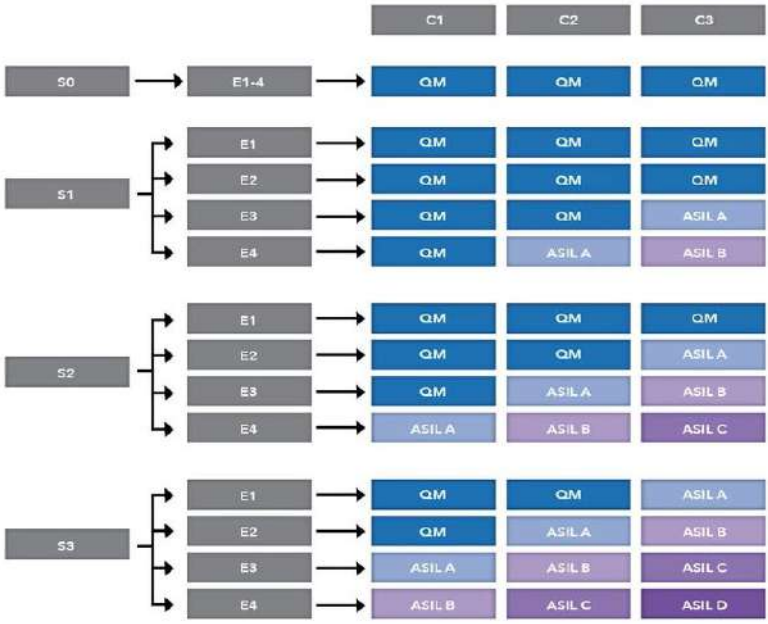
- E0: İnanılmaz derecede olası değil.
- E1: Çok düşük olasılık (yaralanma sadece nadir çalışma koşullarında olabilir).
- E2: Düşük olasılık.
- E3: Orta olasılık.
- E4: Yüksek olasılık (çoğu çalışma koşulunda yaralanma olabilir).

Tehlikeli bir durumun kontrol edilebilirliği dört puanlık bir ölçekte sıralanır.

- C0: Genel olarak kontrol edilebilir.

- C1: Basitçe kontrol edilebilir.
- C2: Normalde kontrol edilebilir (çoğu sürücü yaralanmayı önlemek için harekete geçebilir).
- C3: Kontrol edilmesi zor veya kontrol edilemez.

Önem, maruz kalma olasılığını ve kontrol edilebilirliği belirledikten sonra, Otomotiv Güvenliği Bütünlük Düzeyini şekil-2'den belirleyebilirsiniz.



Şekil-2. Riskin önem, maruz kalma ve kontrol edilebilirliğine gör ASIL seviyesinin belirlenmesi.

EN 50128 – Demiryolları

EN 50128, demiryolu endüstrisinde kullanılan bir güvenlik standardıdır. Demiryolu kontrol ve koruma uygulamaları için elektrikli ve elektronik ekipmanları kapsar. Bu standart, güvenlik gereksinimlerini belirlemek için Yazılım Güvenliği Bütünlük Düzeylerini (SSILs 0-4) kullanır.

IEC 62304 – Medikal Cihazlar

IEC 62304, yazılımın güvenliği tasarımını ve bakımını kapsayan işlevsel bir güvenlik standardıdır. Güvenliği sağlamak için süreçler, faaliyetler ve görevler tanımlanmıştır. Bu standart yazılımın kendisinin bir medikal aygıt olması durumunda veya yazılımın, nihai tıbbi cihazın gömülü veya ayrılmaz bir parçası olduğunda kullanılabilir. IEC 62304 dokuz bölümden oluşur.

- Bölüm 1: Kapsam.

- Bölüm 2: Normatif referanslar.
- Bölüm 3: Terimler ve tanımlar.
- Bölüm 4: Genel gereksinimler.
- Bölüm 5: Yazılım geliştirme süreci.
- Bölüm 6: Yazılım bakım süreci.
- Bölüm 7: Yazılım risk yönetimi süreci.
- Bölüm 8: Yazılım yapılandırma yönetimi süreci.
- Bölüm 9: Yazılım sorunu çözme süreci.

Bu standardın uygulanabilmesi için bir kalite yönetim sistemi ve risk yönetim sistemi kullanıldığı varsayılmaktadır. Bu standart, riske dayalı gereksinimleri belirlemek için yazılım güvenlik sınıflandırmasını (A-C sınıfları) kullanır. Tıbbi cihaz endüstrisinde bu standarda ek olarak;

- ISO 13485, kalite yönetimi.
- ISO 14971, Risk yönetimi.
- EU Medical Device Regulation, Avrupa birliği medikal cihaz yönergesi. 2020 yılında yenilenmiştir.
- FDA regulations, Amerika birleşik devletlerinde medikal cihazların karşılaması gereken yönergeler.

Geliştirmenin başlangıcından itibaren güvenliği sağlamak önemlidir. Ürün testi, hasta güvenliğini sağlamak için yeterli değildir ve hasta güvenliği çok önemlidir. Ayrıca, süreçlerinizde güvenliği erkenden oluşturmak, daha sonra zamandan ve maliyetten tasarruf etmenizi sağlar. Standarttaki yazılım güvenlik sınıflandırması, kullanmanız gereken güvenlikle ilgili süreçleri belirler. Bu, gereksinimler ve kodlamadan sürüm ve bakıma kadar tüm yazılım geliştirme yaşam döngüsünü etkiler. Standart, yazılım için üç güvenlik sınıfı tanımlanmıştır.

- A Sınıfı: Yaralanma veya sağlığa zarar verilmesi mümkün değildir.
- B Sınıfı: Yaralanma mümkündür, ancak ciddi değildir.
- C Sınıfı: Ölüm veya ciddi yaralanma mümkündür.

Uluslararası standarda uymak, diğer bölgesel standartların gereksinimlerini karşılar. AB'de, Tıbbi Cihazlar Direktifinin (yakında AB Tıbbi Cihaz Yönetmeliği ile değiştirilecektir) temel gerekliliklerini karşılamaktadır. Güvenlik standardına uymak için süreçlerin iyi belgelenmesi gerekir. Yazılım geliştirme araçlarını kullanmak, uyumluluğu belgelemenize ve hızlandırmanıza yardımcı olabilir (Myklebust & Stålhane, 2021).

Güvenlik standardının 5. bölümü, yazılım geliştirme süreçlerini açıklar.

- 5.1: Geliştirme planlaması.
- 5.2: Gereksinim analizi.
- 5.3: Mimari tasarım.

- 5.4: Detaylı tasarım.
- 5.5: Birim uygulaması ve doğrulama.
- 5.6: Entegrasyon ve entegrasyon testi.
- 5.7: Sistem testi.
- 5.8: Serbest bırakma.

Her süreç, her tıbbi cihaz sınıfı için tamamlanması gereken faaliyetleri ve görevleri içerir. Yazılım geliştirme araçlarını kullanmak, bu gereksinimlerin karşılanmasına yardımcı olabilir. B Sınıfı ve C Sınıfı için yazılım gereksinimleri için testler oluşturulması gerekir. Örneğin, gereksinimlere dayalı olarak test senaryoları oluşturabilir ve bir gereksinim izlenebilirlik matrisi oluşturabilirsiniz. Ek olarak B ve C Sınıfı yazılımların bir doğrulama süreci oluşturulması gerekir (Karthick et al., 2021).

Güvenlik standardının 6. Bölümü, yazılım bakımına yönelik süreçleri açıklar.

- 6.1: Yazılım bakım planı oluşturun.
- 6.2: Problem ve değişiklik analizi.
- 6.3: Değişikliklerin uygulanması.

Bakım aşamasında kullanıcı geri bildirimi almak ve sorunları çözmek önemlidir. Örneğin, yazılım geliştirme araçlarını kullanmak, bakım sürecinde güvenliği sağlamanıza yardımcı olabilir. Değişimi yönetmek, bakım sürecinde anahtar rol üstlenir, bu amaçla yazılım üzerinde yapılan değişimleri kayıt altında tutan yazılım paketi kullanmak, yazılım geliştirme yaşam döngüsü boyunca size değişim konusunda görünürlük sağlar. Kodun yerleşik bir standarda göre yazılmasını sağlayarak ve kod kalitesini ölçerek yazılım bakımını azaltabilirsiniz (Lukas et al., 2021).

Güvenlik standardının 7. Bölümü, yazılım risk yönetimi süreçlerini açıklar.

- 7.1: Tehlikeli durumlara katkıda bulunan yazılımların analizi.
- 7.2: Risk kontrol önlemleri.
- 7.3: Risk kontrol önlemlerinin doğrulanması.
- 7.4: Yazılım değişikliklerinin risk yönetimi.

Güvenlik standardı ile, tehlikeli bir durumdan bir risk kontrol önlemine kadar izlenebilirlik göstermek önemlidir. Örneğin, bir arıza modları ve etkileri analizi yaparak tehlikeleri belirlemek için yazılım paketi kullanabilirsiniz. Ardından, tehlikeyi uygun risk kontrol önlemine bağlamak için aracı kullanabilirsiniz ve bunu bir izlenebilirlik matrisi kullanarak otomatikleştirebilirsiniz (Toivakka et al., 2021).

Güvenlik standardının 8. Bölümü, yazılım konfigürasyon yönetimine yönelik süreçleri açıklar.

- 8.1: Yapılandırma tanımlaması.

- 8.2: Kontrolü değiştirin.
- 8.3: Yapılandırma durumu hesabı.

Güvenlik standardı, Bilinmeyen Kaynak Yazılımına karşı uyarıda bulunur. Yazılım paketi kullanarak, üçüncü taraf yazılımlarının güvenlik standartlarını karşılayıp karşılamadığı test edilebilir. Değişimi yönetmek de önemlidir. Performans için statik analizörler ve yazılım geliştirme araçlarını kullanabilirsiniz (Granlund et al., 2021).

Güvenlik standardının 9. Bölümü, yazılım sorununun çözümüne yönelik süreci açıklar.

- 9.1: Sorun raporları hazırlayın.
- 9.2: Sorunu araştırın.
- 9.3: Dahili taraflara tavsiyede bulunun.
- 9.4: Değişiklik kontrol sürecini kullanın.
- 9.5: Kayıtları koruyun.
- 9.6: Eğilimler için sorunları analiz edin.
- 9.7: Yazılım sorununun çözümünü doğrulayın.
- 9.8: Belge içeriğinin test edilmesi.

Yazılım sorununun çözümünün iyi belgelenmesi gerekir. Kodlama standartları, yazılım kabul kriterlerinin önemli bir parçasıdır. İstenen kod özelliklerini tutarlı bir şekilde elde etmek için, tercih edilen bir kodlama stilini belirtmek için kodlama standartları kullanılmalıdır. Kodlama standartlarına örnekler arasında anlaşılabilirlik, dil kullanım kuralları veya kısıtlamaları ve karmaşıklık yönetimi için gereksinimler yer alır (Brusan et al., 2021). MISRA gibi kodlama standartları, güvenlik açısından kritik geliştirmelerde özellikle etkilidir.

IEC 62061 – Makine

IEC 62061, makine endüstrisinde kullanılan bir güvenlik standardıdır. Elektrik, elektronik ve programlanabilir elektronik kontrol sistemlerini kapsar. Bu standart ayrıca riski azaltmak için Güvenlik Bütünlüğü Seviyelerini (SIL'ler) kullanır. ISO 13849 dahil olmak üzere makineler için diğer güvenlik düzenlemeleri de kullanılmaktadır.

IEC 60880 – Nükleer

IEC 60880, nükleer santrallerde kullanılan bir güvenlik standardıdır. Güvenlik fonksiyonlarını yerine getiren yazılımı kapsar. Güvenli bir sistem geliştirebilmek için, doğru araçlar kullanmak gerekmektedir. Bu araçlar sayesinde:

- Risk tanımlanır ve analiz edilir.
- Riske dayalı uyumluluk standardı gereklilikleri yerine getirilir.
- Bu uyumluluğu belgelemek için bir izlenebilirlik matrisi oluşturulur.

- Bir kodlama standardı uygulanır ve kodlama kurallarına uyulduğundan emin olunur.
- Test yoluyla yazılım doğrulanır.
- Uyumluluk elde edilir ve daha hızlı sertifika alınır.

Tablo-2. Farklı standartlara göre risk seviyelerinin karşılaştırılması.

İşlevsel Güvenlik Standardı	Güvenlik Seviyeleri (Düşükten Yükseğe Doğru Sıralanmıştır)				
IEC 61508	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL4
ISO 26262	ASIL A	ASIL B	ASIL C	ASIL D	-
DO-178C	Level E	Level D	Level C	Level B	Level A
IEC 62304	Class A	Class B		Class C	
EN 50128	SSIL 0	SSIL 1	SSIL 2	SSIL 3	SSIL 4

Fonksiyonel Güvenliği ve Güvenceyi Sağlamak için Araçlar

Yazılım hatalarının ve problemlerinin çoğu, yetersiz gereksinimlerden ve iyi yönetilmeyen bir süreçten kaynaklanır. Yetersiz gereksinimler, işlevlerin yanlış veya güvenilmez uygulanmasına yol açar ve bu da işlevsel güvenliğin başarısız olmasına yol açar. Bir fonksiyon yanlış uygulandığında, girişimden bağımsız olan ISO 26262'nin "ana yönergesini" ihlal ederek diğer yazılım işlevleriyle etkileşime neden olabilir (Joshi & Heimdahl, 2005).

Yazılım girişime neden olduğunda hataları bulmak için statik analiz kullanılabilir. Statik analiz kullanmanın ana avantajlarından birisi, tamamlanmış modüller hazır olur olmaz analize başlayabilmektir. Analiz, tüm ürün kodu seti tamamlanana kadar devam edebilir. Statik analiz, izinsiz olarak ASIL fonksiyonları tarafından korunan belleğe erişime yönelik yasa dışı girişimlerden kaynaklanan girişimi ortaya çıkarır. Otonom olarak sürülen bir araçta veya hatta mevcut aracınızda korunan belleğinin bozulmasının sonuçlarını hayal edebilirmisiniz? Hız sabitleyici ayarını değiştirmek yerine DVD oynat düğmesine basmak kötü sonuçlara yol açabilir (Palin et al., 2011).

Sonuç

Son on yılda fonksiyonel güvenlik, esasen her üretici için bir gereklilik haline geldiğinden, giderek daha önemli hale geldi. Yazılım ve donanım sistemlerinin daha da uyumlu entegrasyonuyla, bu tür sistemleri kapsamak için bu standartlara artan bir bağımlılık görüyoruz. Tüm gelişmelere rağmen, işlevsel güvenlik söz konusu olduğunda hâlâ emekleme aşamasındayız. Otonom bir arabada veya bir refakatçi robotta yer alan yazılımların ne kadarının işlevsel güvenlik standartlarını karşılayacak düzeyde yazıldığını düşünün. İşlevsel güvenlik,

yakın gelecekte birlikte büyüdüğümüz bilim kurgu hikayeleri gibi hayatımızın bir parçası olacaktır.

Kaynakça

1. Annable, N., Bayzat, A., Diskin, Z., Lawford, M., Paige, R., & Wassyng, A. (2022). Model-Driven Safety of Autonomous Vehicles. *Recent Trends and Advances in Model Based Systems Engineering*, 407–417. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82083-1_34
2. Avižienis, A., Laprie, J. C., Randell, B., & Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, *1*(1), 11–33. https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2
3. Bagnara, R., Bagnara, A., & Hill, P. M. (2018). The MISRA C Coding Standard and its Role in the Development and Analysis of Safety- and Security-Critical Embedded Software. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *11002 LNCS*, 5–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99725-4_2/COVER
4. Bellairs, R. (2019, January 31). *IEC 61508 Overview*. https://www.perforce.com/blog/qac/what-iec-61508-how-determine-safety-integrity-levels#iec
5. Bellairs, R. (2019, January 31). *What Is IEC 61508? Overview + Safety Integrity Levels | Perforce*. https://www.perforce.com/blog/qac/what-iec-61508-how-determine-safety-integrity-levels#iec
6. Bennett, R., Callahan, C., Jones, S., Levine, M., Miller, M., & Ozment, A. (2018). How to live in a post-meltdown and -spectre world. *Communications of the ACM*, *61*(12), 40–44. https://doi.org/10.1145/3267116
7. Brusan, A., Durmaz, A., & Ozturk, C. (2021). A Workflow for Ensuring DICOM Compatibility During Radiography Device Software Development. *Journal of Digital Imaging*, *34*(3), 717–730. https://doi.org/10.1007/S10278-021-00458-X/FIGURES/7
8. Furst, S., & Bechter, M. (2016). AUTOSAR for Connected and Autonomous Vehicles: The AUTOSAR Adaptive Platform. *Proceedings - 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, DSN-W 2016*, 215–217. https://doi.org/10.1109/DSN-W.2016.24
9. Gall, H. (2008). Functional Safety IEC 61508 / IEC 61511 the impact to certification and the user. *AICCSA 08 - 6th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, 1027–1031. https://doi.org/10.1109/AICCSA.2008.4493673

10. Granlund, T., Vedenpaa, J., Stirbu, V., & Mikkonen, T. (2021). On Medical Device Cybersecurity Compliance in EU. *Proceedings - 2021 IEEE/ACM 3rd International Workshop on Software Engineering for Healthcare, SEH 2021*, 20–23. https://doi.org/10.1109/SEH52539.2021.00011
11. Joshi, A., & Heimdahl, M. P. E. (2005). Model-based safety analysis of simulink models using SCADE design verifier. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *3688 LNCS*, 122–135. https://doi.org/10.1007/11563228_10
12. Kahraman, H. (2022, January 14). *Endüstri 4.0 ve Fonksiyonel Emniyet*. https://www.endustri40.com/endustri-4-0-ve-fonksiyonel-emniyet/
13. Karthick, R., Ramkumar, R., Akram, M., & Kumar, M. V. (2021). Overcome the challenges in bio-medical instruments using IOT – A review. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 1614–1619. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.420
14. Kathiresh, M., & Neelaveni, R. (Eds.). (2021a). *Automotive Embedded Systems*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59897-6
15. Kathiresh, M., & Neelaveni, R. (2021b). *Automotive Embedded Systems Key Technologies, Innovations, and Applications*.
16. Lukas, T., Sohrabi, K., Gross, V., & Scholtes, M. (2021). Health Software Product or Software as Medical Device An Orientation Guide for Young Entrepreneurs. *Current Directions in Biomedical Engineering*, *7*(2), 644–647. https://doi.org/10.1515/CDBME-2021-2164/MACHINEREADABLECITATION/RIS
17. Mishra, M., & Kumar, A. (2021). ADAS technology: A review on challenges, legal risk mitigation and solutions. *Autonomous Driving and Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS): Applications, Development, Legal Issues, and Testing*, 401–408. https://doi.org/10.1201/9781003048381-21/ADAS-TECHNOLOGY-MADHUSMITA-MISHRA-ABHISHEK-KUMAR
18. Myklebust, T., & Stålhane, T. (2021). Functional Safety and Proof of Compliance. *Functional Safety and Proof of Compliance*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86152-0
19. Palin, R., Ward, D., Habli, I., & Rivett, R. (2011). ISO 26262 safety cases: Compliance and assurance. *IET Conference Publications*, *2011*(578 CP). https://doi.org/10.1049/CP.2011.0251/CITE/REFWORKS
20. Royuela, S., Duran, A., Serrano, M. A., Quiñones, E., & Martorell, X. (2017). A functional safety OpenMP* for critical real-time embedded

systems. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *10468 LNCS*, 231–245. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65578-9_16/COVER

21. Sini, J., Violante, M., Dodde, V., Gnaniah, R., & Pecorella, L. (2019). A Novel Simulation-Based Approach for ISO 26262 Hazard Analysis and Risk Assessment. *2019 IEEE 25th International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design, IOLTS 2019*, 253–254. https://doi.org/10.1109/IOLTS.2019.8854385
22. Toivakka, H., Granlund, T., Poranen, T., & Zhang, Z. (2021). Towards RegOps: A DevOps Pipeline for Medical Device Software. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *13126 LNCS*, 290–306. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91452-3_20/COVER
23. Trippel, C., Lustig, D., & Martonosi, M. (2018). *MeltdownPrime and SpectrePrime: Automatically-Synthesized Attacks Exploiting Invalidation-Based Coherence Protocols*. http://arxiv.org/abs/1802.03802
24. Xie, G., Ma, W., Peng, H., Li, R., & Li, K. (2021). Price Performance-Driven Hardware Cost Optimization under Functional Safety Requirement in Large-Scale Heterogeneous Distributed Embedded Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *68*(5), 4485–4497. https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2905815
25. Yamili, Y. C., & Kathiresh, M. (2021). AUTOSAR and MISRA Coding Standards. *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*, 37–70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59897-6_3/COVER
26. Zhang, H., Li, W., & Qin, J. (2010). Model-based functional safety analysis method for automotive embedded system application. *Proceedings of 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing, ICICIP 2010*, *PART 1*, 761–765. https://doi.org/10.1109/ICICIP.2010.5565316

OLAY GÜDÜMLÜ MOLEKÜLER DİNAMİK SİMÜLASYONUNUN GELİŞİMİ VE MODELLENEN SEYREK GAS DİNAMİĞİ SİMÜLASYONLARINA GENEL BAKIŞ

Dr.Öğr.Üyesi Mustafa KOÇ

Beykent Üniversitesi MYO Makine Programı,
Orcid Id: 0000-0002-5417-2604

Olay Güdümlü Moleküler Dinamik (OGMD) metodu, modelin ayrıntı düzeyi ve hesaplama yükü açısından doğrudan simülasyon Monte-Carlo yöntemi (DSMC) ile klasik (zamana dayalı) Moleküler Dinamik (MD) arasında bir yerdedir. OGMD'nin en önemli avantajı, DSMC'ye kıyasla ağsız (meshless) ve stokastik olmayan çarpışma mekanizması ve klasik MD'ye kıyasla hesaplama yükünde önemli bir azalmadır. OGMD'nin ilk fikirleri Alder ve Wainwright tarafından 1959'da ortaya atılmıştır (Alder & Wainwright, 1959). Miller ve Luding, OGMD'nin paralel bir versiyonunu önermişlerdir (Miller & Luding, 2004). Bir çözücü içinde polimer zincirlerinin simülasyonu için OGMD algoritmasının stokastik modifikasyonu, Donev ve diğerleri tarafından geliştirilmiştir (Donev, Garcia, & Alder, 2008). Valentini ve Schwartzentruber hibrit OGMD/MD algoritmasını (Valentini & Schwartzentruber, 2009) önermişler ve seyreltilmiş argondaki güçlü normal şok dalgasının simülasyonu için uygulamışlardır. Ücretsiz OGMD simülatörü zaten mevcut olup Bannerman ve diğerleri (M. N. Bannerman, Sargant, & Lue, 2011) tarafından geliştirilmiş ve GNU Genel Kamu lisansı altında dağıtılmaktadır. Akkaya ve Kandemir (Akkaya & Kandemir, 2015), Couette ve Poiseuille akışları için sert küre gazının özelliklerini incelemek için OGMD simülasyonunu kullanmışlardır.

OGMD yaklaşımına olan ilgi, salınım elemanları olan cihazlarda çok bileşenli gaz karışımlarının ayrıştırılması problemlerine uygulanma olanağından kaynaklanmaktadır, çünkü OGMD, mevcut parçacık ve ağ(mesh) yöntemlerinin çoğundan farklı olarak algoritmanın önemli komplikasyonları olmadan doğal olarak hareketli sınırlar durumuna genelleştirilebilir. OGMD yaklaşımının geçiş akış rejimindeki bu tür sorunları çözmeyi mümkün kılacağını varsayılmaktadır. Ancak bundan önce, bu yaklaşımı, sabit sınırlı seyrek gaz dinamiğinin iyi bilinen problemleri üzerinde çalışmak gereklidir.

OGMD yaklaşımının seyrek gaz dinamiği için önemi, OGMD'nin, stokastik çarpışma çifti seçimi (Doğrudan Simülasyon Monte-Carlo yönteminin aksine) veya çarpışma integralinin basitleştirilmesi (Model Denklem yöntemlerinin aksine) olmadan seçilen çarpışma modelinin tamamen deterministik ağsız(meshless) uygulaması olmasıdır. Bu nedenle, algoritmanın özelliklerine bakılmaksızın mekanik modelin kendisinin analizi için ek bilgi verir ve diğer sayısal yöntemlerin doğrulanması için kullanılabilir.

1. OLAY GÜDÜMLÜ MOLEKÜLER DİNAMİK YÖNTEMİ

1.1. Temel Prensipler

Sistemin bir sert parçacık topluluğu olarak modellenmesi, sürekli etkileşim potansiyeli yaklaşımına bir alternatiftir. Sert parçacıklar arasındaki etkileşim potansiyeli ayrıktır; yani, çarpışmalar dışında moleküllere hiçbir kuvvet uygulanmaz. Herhangi bir dış kuvvet alanı olmadığı varsayıldığında, ortaya çıkan yörüngeler doğrusaldır. Moleküller arası çarpışmalar anlık ve ikilidir. Bir çarpışma meydana geldiğinde çarpışma sonrası hızlar, enerji ve momentumun korunumu yoluyla analitik olarak belirlenir. Analitik olarak tahmin edilen çarpışma süreleri, simülasyonun bir dizi eşzamansız olaya ayrışmasını sağlar. Simülasyon süresi doğrudan bir olaydan diğerine ilerlediğinden, bu süreç olay odaklıdır. Doğası gereği, olaya dayalı yaklaşım, zamana dayalı olana kıyasla daha büyük sistemlerin simülasyonunu daha uzun süre kolaylaştırır. Olay güdümlü moleküler dinamik (OGMD) simülasyonlarının (Alder & Wainwright, 1957) ilk tanıtılmasından bu yana, daha etkili algoritmalardaki gelişmeler (Akkaya & Kandemir, 2015; Donev et al., 2008; Kandemir, 1999; Marfn & Cordero, 1995; Rapaport, 1980; Tang, Goh, & Thng, 2005) OGMD'nin performansını daha da artırmıştır.

Simülasyon sistemindeki moleküller arası çarpışmalar, katı yüzeyle çarpışmalar ve diğer etkileşimler “olaylar” olarak adlandırılacaktır. Simülasyon sistemindeki zaman, olayların zamanları aracılığıyla ayrı ayrı değiştirilir. Birkaç olay türü vardır: (1) moleküller arası çarpışmalar, (2) katı yüzeyle çarpışma, (3) simetri düzleminin kesişmesi, (4) periyodik sınırın geçilmesi, (5) molekülün açık sınırlardan hesaplama alanına girişi veya çıkışıdır. Bu olaylar sıralı listeye göre sırayla yürütülür ve aynı zamanda yaklaşan olayların listesi kısmen yeniden oluşturulur. Örneğin, çarpışmadan sonra molekül hızı değişir, bu nedenle (önceki hız için) olası çarpışmaların bir kısmı iptal edilerek yaklaşan olaylar listesinden silinmeli ve yeni molekül hızı için yeni olası çarpışmalar eklenmelidir. Belirli bir olay gerçekleştiğinde, simülasyon sistemindeki tüm moleküllerin konumlarının yeni bir zamanda yeniden hesaplanmasına gerek yoktur, çünkü hareketleri tamamen koordinatlar, hız, bu molekül için son olay zamanı ve yaklaşan olaylar listesi tarafından belirlenir. Bu nedenle asıl sorun, belirli bir molekülün diğer moleküllerle çapışma, katı yüzeylerle etkileşimi, açık sınırları aşması vb olayların olma zamanının belirlenmesidir.

1.2. Moleküller Arası Çarpışma Hesaplaması

Moleküller arası etkileşimleri tanımlamak için genel en basit sert küre modeli (HS) kullanılmaktadır. Ancak, OGMD yaklaşımının daha karmaşık çarpışma modellerinin (VHS, VSS, vb.) veya isteğe bağlı moleküller arası potansiyellerin kullanılmasına izin verdiği belirtilmelidir (M. N. Bannerman et al., 2011).

Koordinatları ve hızı elde ettiğinde her molekülün kendi (1) türü, (2) koordinatları, (3) hızı ve (4) zamanı vardır. HS modeline göre çarpışmalar arasında molekül $\vec{x}(t) = \vec{x}' + \vec{v}'(t - t')$ düz çizgisi boyunca hareket eder, burada $\vec{x}'$ son çarpışmadan sonra molekülün koordinatları, $\vec{v}'$ son çarpışmadan sonra molekülün hızı, t' son çarpışmanın zamanı. i-th ve j-th moleküllerinin çarpışma zamanı bu ikinci dereceden denklemden bulunabilir:

$$\left(\overrightarrow{x_i}(f) - \overrightarrow{x_j}(t)\right)^2 = \left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_j}{2}\right)^2 \tag{1}$$

burada d_i, i-inci molekülün etkin çapıdır. Aşağıdaki koşullarla daha küçük kök seçilmelidir: $t > t_i'$, $t > t_j'$. Böyle bir t yoksa bu moleküller çarpışmaz.

Çarpışma çiftlerinin aranmasının hesaplama karmaşıklığını $O(N^2)$'dan (tipik bir çok-cisim problemidir) $O(N)$'ye azaltmak için, burada N molekül sayısı, hesaplama alanı kübik hücrelere bölünür ve verilen molekül için çarpışma çiftlerinin aranması aynı hücreden veya 26 komşu hücreden moleküller arasında gerçekleştirilir. Hücre boyutu parçacık çapından daha büyük olmalıdır. MD'deki hesaplama karmaşıklığını azaltmak için standart bir algoritmadır. Bu karmaşıklığı azaltmak için yapılan çalışmalar mevcuttur (Akkaya & Kandemir, 2015). Bu durumda, yukarıda açıklanan olay türleri listesine yeni bir olay türü eklenmelidir (6) hücre sınırının aşılması. OGMD algoritmasında bu hücrelerin boyutunun sonuçları etkilememesi (tam olarak aynı çarpışmalar simüle edilecektir), sadece hesaplama hızını etkilemesi önemlidir.

Sayısal algoritmada, bir moleküller arası çarpışma olayı, her iki çarpışan moleküle bağlantılar içermektedir. Her iki molekülün koordinatları çarpışma anında yeniden hesaplanır. Her iki molekülün zamanları çarpışma zamanına kaydırılır. Daha sonra korunum yasalarından moleküllerin yeni hızları hesaplanır. Çarpışan moleküller için olay listesinde var olan tüm olaylar buradan silinir. Son olarak, bu moleküller için yeni olaylar, yeni hızlar için hesaplanır ve olay listesine eklenir. Bir molekül hücre sınırını geçtiğinde hızı değişmez. Molekülün koordinatları ve zamanı, hücre sınırlarının geçildiği zamana kadar kaydırılır. Bundan sonra molekülün ayrıldığı hücrenin hücre listesinden silinmesi ve yeni hücre listesine eklenmesi gereklidir.

1.3. Katı Yüzeyle Çarpışma

Duvar sınırında, duvar ile moleküler merkez arasındaki mesafe yarı moleküler çap olduğunda, bir molekül duvara çarpar. Molekül, duvar modeline göre belirlenen yeni bir hızla geri yansıtılır. Speküler yansıma modelinde, yüzeyin moleküler düzeyde tamamen pürüzsüz olduğu en temel duvar modelidir. Bir molekül speküler yansımaya maruz kaldığında, teğetsel momentum korunarak teğetsel bileşenler değişmeden kalırken normal hız bileşeni ters çevrilir. Ancak gerçekte duvar yüzeyi pürüzlüdür ve moleküller duvardan rastgele açılarla yansıtılır. Molekülün yeni hızı, seçilen saçılma çekirdeğine göre hesaplanır. Bu madde kesinlikle DSMC'ye eşittir. Maxwell (J.C. Maxwell, 1879), Epstein (Epstein, 1967), Cercignani-Lampis (Cercignani & Lampis, 1971) saçılma çekirdeği, bunların kombinasyonları veya incelenen probleme uygun herhangi bir çekirdek olabilir.

Dağınık yansıma, bu tür yüzeyleri temsil eden en yaygın modeldir. Dağınık modelde, molekülün yansıma sonrası hızı, gelen hızdan önemli ölçüde bağımsızdır ve duvar sıcaklığı ve hıza dayalı bir dağılımdan stokastik olarak belirlenir.

Tam enerji uyumuna sahip Maxwell çekirdeğinde çarpışmadan sonraki hız için bir olasılık yoğunluğu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\rho(\vec{u}) = \frac{2\beta_w^4 u_n}{\pi} \exp(-\beta_w^2 u^2) \qquad (2)$$

Burada $\beta_w = \sqrt{m/2kT_\omega}$, T_ω- duvar sıcaklığı, k- Boltzmann sabiti, m-molekül kütlesidir.

1.4. Açık Sınır Koşulları

Bir molekül hesaplama alanını açık bir sınırdan terk ettiğinde, kütlesi, momentumu ve enerjisi karşılık gelen değişkenlerde toplanır. Bu veriler daha sonra açık sınırlar boyunca kütle, momentum ve enerji akışlarını hesaplamak için kullanılır. Son olarak, bu molekülün olayları olay listesinden silinir ve molekül hesaplamadan silinir.

MD simülasyonlarının performansı, simüle edilen moleküllerin sayısından büyük ölçüde etkilendiğinden, hesaplama alanını mümkün olan en küçük örnekle temsil etmek istenmektedir. Periyodiklik, bu tür temsiller için en yaygın sınır modelidir. Ayrıca sonsuz sistemlerin simülasyonlarında yüzey etkilerini ortadan kaldırır. Periyodik sınırların varlığında, sonsuz bir kafes oluşturmak için hesaplama alanı periyodiklik yönünde tekrarlanır. Bir molekül periyodik bir

sınıra ulaştığında, tam olarak aynı hız vektörü ile karşı yüzünde yoluna devam eder.

2. OLAY GÜDÜMLÜ MOLEKÜLER DİNAMİK VE HİBRİT YÖNTEMLERLE YAPILAN ÇALIŞMALARA GENEL BAKIŞ

(Donev, Torquato, & Stillinger, 2005) çalışmasında hem periyodik hem de sert duvar sınır koşulları altında, paralel yüzlü bir simülasyon alanı içinde, küresel olmayan parçacıklardan oluşan bir sistem için Çarpışma Güdümlü bir moleküler dinamik algoritmasını oldukça ayrıntılı bir şekilde sunmuşlardır. Algoritma, küreler için önceki Olay Güdümlü moleküler dinamik algoritmalarını genişletmiş ve nispeten küçük en boy oranlarına ve boyut olarak küçük farklılıklara sahip parçacık sistemlerine uygulandığında en etkili olduğu gösterilmiştir. Algoritmanın doğruluğundan ödün vermeden yüksek yoğunluklarda önceki algoritmalardan üstün olan yeni bir kısmi güncelleme yakın komşu listesi (NNL) algoritması sunmuşlardır. Bu teknikler, Monte Carlo ve Zamana Dayalı moleküler dinamik dahil olmak üzere herhangi bir parçacık tabanlı simülasyonda faydalı olacağı belirtilmiştir. İlave olarak, algoritmayı elips ve elipsoid sistemlerine göre özelleştirmişler ve uygulama için performans sonuçlarını sunarak algoritmanın pratik faydasını göstermişlerdir.

(Hernández De La Peña, Van Zon, Schofield, & Opps, 2007) çalışmalarında Olay Güdümlü veya Süreksiz Moleküler Dinamik (SMD) yaklaşımını pratik ilgi alanına giren iki moleküler sisteme, metan ve benzene uygulamışlardır. İlk olarak, katı moleküler metanın süreksiz bir potansiyel modeli, Lennard-Jones etkileşimlerine dayanan standart bir sürekli potansiyel modeliyle analoji yoluyla oluşturulmuştur. Gaz ve sıvı benzeri yoğunluklarda elde edilen DMD simülasyonlarının yapısal ve dinamik özellikleri daha sonra sürekli potansiyel sistemdeki analogları ile karşılaştırılmış ve DMD yaklaşımının hesaplama verimliliği, standart moleküler dinamik (SMD) simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. İkincisi, katı benzen moleküllerinden oluşan bir sıvının süreksiz bir modeli, sürekli potansiyellerle etkileşime giren katı moleküllerin birleşik atom modeliyle karşılaştırmak için tasarlanmıştır. Her iki modelin denge ve dinamik özellikleri, benzer yoğunluk ve sıcaklık koşulları altında karşılaştırılmıştır. Oryantasyon serbestlik derecelerinin dinamikleri incelenmiş ve açısal hareketin ayrıntılarında gözlemlenen birkaç tutarsızlık açıklanarak raporlanmıştır.

(Donev et al., 2008) çalışmasında bir çözücü içinde asılı duran polimer zincirlerinin simülasyonu için yeni bir Stokastik Olay Güdümlü Moleküler Dinamik (SOGMD) algoritması geliştirmişlerdir. SOGMD, Olay Güdümlü Moleküler dinamik (OGMD) Doğrudan Simülasyon Monte Carlo (DSMC)

yöntemiyle birleştirmiştir. Polimerler, kare oyuklarla bağlanmış sert küre zincirleri olarak temsil edilir ve çözücü parçacıkları ile sert potansiyellerle etkileşime girerler. Geliştirilen algoritma, polimer zincirinin simülasyonu ve zincir boncukları ile çevredeki solvent parçacıkları arasındaki etkileşimler için OGMD'yi kullanmıştır. Çözücü parçacıkları arasındaki etkileşimler, OGMD'deki gibi deterministik olarak ele alınmaz, bunun yerine çözücüdeki momentum ve enerji değişimi, DSMC kullanılarak stokastik olarak belirlenmiştir. Çözücü ve çözünen madde arasındaki bağlantı, sürekli olarak hidrodinamik etkileşimleri ve termodinamik dalgalanmaları koruyan parçacık seviyesinde temsil edilmiştir. Bununla birlikte, hem çözücünün hem de çözünenin tam MD simülasyonlarından farklı olarak, SOGMD'de çözücünün uzamsal yapısı göz ardı edilmiştir. SOGMD algoritması ayrıntılı olarak açıklanmış ve düzgün kesmeye maruz kalan bir sert duvara bağlı bir polimer zincirinin dinamiklerinin incelenmesine uygulanmıştır. SOGMD, geleneksel OGMD simülasyonları kullanılarak elde edilen sonuçları iki kat daha yüksek verimlilikle yakından üretmiştir. Sonuçlar, polimer zincirinin periyodik (döngüsel) hareketinin varlığını sorgular nitelikte olduğu vurgulanmıştır.

(Valentini & Schwartzentruber, 2009) çalışmasında gerçekçi küresel simetrik yumuşak potansiyeller kullanarak nadir gazların Moleküler Dinamik simülasyonunu hızlandırmak için yeni birleştirilmiş Olay Güdümlü/Zamana Dayalı (OG/ZD) algoritması sunmuşlardır. Düşük yoğunluklu rejim nedeniyle, önerilen yöntem, Olay Güdümlü Moleküler Dinamik'e benzer şekilde, bir sonraki etkileşimin gerçekleşmesinden önce geçmesi gereken süreyi doğru bir şekilde tanımlamıştır. Bununla birlikte, her etkileşim Zamana Dayalı Moleküler Dinamik kullanılarak işlenmiş, böylece atomik hareketi doğru bir şekilde çözmek için gereken yeterince küçük zaman adımını kullanarak Newton'un İkinci Yasası entegre edilmiştir. Nadir olmasına rağmen, çok cisim etkileşimleri de küçük bir yaklaşımla açıklanmıştır. Birleşik OG/ZD yönteminin, Lennard-Jones potansiyeli kullanılarak açıklanan argonda translasyonel gevşemeyi doğru bir şekilde yeniden ürettiği gösterilmiştir. $\delta = 10^{-4} kg\ /\ m^3$ ve $\delta = 10^{-1} kg\ /\ m^3$ arasındaki yoğunluklar için, kinetik teori, Doğrudan Simülasyon Monte Carlo ve saf Zamana Dayalı Moleküler Dinamik, OG/ZD algoritmasının uygun çarpışma oranlarını ve termal dengeye doğru evrimi doğru bir şekilde yeniden ürettiğini göstermiştir. Son olarak, birleştirilmiş OG/ZD algoritması, seyreltilmiş argonda bir Mach 9 şok dalgasının simülasyonuna uygulanmıştır. Yoğunluk ve sıcaklık profillerinin yanı sıra moleküler hız dağılımları, DSMC sonuçlarıyla tam olarak eşleşmiş ve şok kalınlığının deneysel belirsizlik içerisinde olduğu raporlanmıştır. Ele alınan problemler için, OG/ZD algoritmasının, geleneksel Zaman Odaklı MD'den birkaç yüz ila birkaç bin kat daha hızlı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca,

moleküler yörüngeleri entegre etmek için kuvvet hesaplamasının genel OG/ZD simülasyon süresine ihmal edilebilir bir miktarda katkıda bulunduğu bulunmuştur. Bu nedenle, bu yöntem, titreşimsel dengesizliği ve kimyasal reaktiviteyi içeren, seyrek gazlardaki şok dalgalarının Moleküler Dinamik simülasyonlarına klasik veya birinci prensipler gibi çok daha rafine ve pahalı atomlar arası potansiyellerin uygulanmasının yolunu açabileceği vurgulanmıştır.

(Marcus N. Bannerman, Green, Grassia, & Lue, 2009) çalışmasında Lees-Edwards sınır koşulları ile birleştirilmiş SLLOD algoritması ile denge dışı Olay Güdümlü moleküler dinamik simülasyonları kullanarak kaymalı elastik olmayan sert küre sistemlerinin özelliklerini incelemişlerdir. Parçacık düzeyinde, elastik olmayan ve elastik (denge) sert küre sistemlerinin davranışları arasındaki farklar araştırılmıştır.

(Donev, 2009) çalışmasında etkileşen parçacıkların fiziksel sistemlerini simüle etmek için üç eşzamansız olay güdümlü algoritmanın ana bileşenlerini birleştirerek sunmuştur. Eşzamansız olay güdümlü ile klasik zaman güdümlü veya eşzamanlı olay güdümlü işlemeyi etkin bir şekilde nasıl birleştirileceği açıklanmıştır. Son olarak, gerçekçi fiziksel sistemlerin olay güdümlü simülasyonu için bazı zorlukları ifade etmiştir.

(Chikkadi & Alam, 2009) çalışmalarında iki sürtünme duvarı ile sınırlanan iki boyutlu bir kanalda akan tanecikli parçacıkları modellemek için elastik olmayan düz sabit disklerin Olay Güdümlü simülasyonlarını kullanmışlardır. İlk bölümde, GPF(yerçekimi güdümlü taneli Poiseuille akışı)'deki kayma hızını yoğunluğun, elastiksizliğin ve duvar pürüzlülüğünün bir fonksiyonu olarak incelemişler ve kayma hızı ve Knudsen sayısı ile gradyanı için kuvvet yasası ilişkilerini belirlemişlerdir. İkinci bölümde, çeşitli reolojik miktarları araştırmış ve kinetik teori oluşturan modellerle sistematik bir karşılaştırma yapmışlardır.

(De Michele, 2010) çalışmasında sert katı cisimlerin Olay Güdümlü moleküler dinamik simülasyonları için genel bir tarif geliştirmek amacıyla, iki dışbükey sert cisim arasındaki mesafeyi ve doğrusal olmayan bir denklem setini çözen çarpışan iki sert katı cismin temas süresini hesaplamak için iki algoritma geliştirmişlerdir. Bu iki yönteme dayanarak, dışbükey sert katı cisimlerin sistemlerini simüle etmek için Olay Güdümlü bir moleküler dinamik algoritması geliştirmişler ve ayrıntılı olarak göstermişlerdir. Çok uzun sert katı cisimler arasındaki çarpışma tespitini optimize etmek için, yönlendirilmiş sınırlayıcı kutuya dayalı yeni bir en yakın komşu listesi yöntemi tanıtmışlar ve tam olarak açıklamışlardır. Önerilen yeni algoritmanın verimliliği ve performansını, tek eksenli sert elipsoidler ve süperkuadrikler için kapsamlı bir şekilde test etmişlerdir.

(Roeller, Herminghaus, & Hager-Fingerle, 2012) düz olduğu varsayılan, sonsuz kütleli hareketli duvarları verimli bir şekilde simüle etmek için bir

tablolama şeması üzerinde çalışmışlardır. Yörüngeleri matematiksel olarak pürüzsüz, periyodik ve sonludur. Duvarın hareketi tek boyutludur, ancak herhangi bir boyuttaki bir sisteme bağlanabilirdir. Dairesel (iki boyutlu) veya küresel (üç boyutlu) parçacıklarla bir sistemi sınırlayan sinüzoidal olarak hareket eden bir duvarla gösterilmiştir. Yöntemleri birden büyük boyutlardaki sistemler için önemli bir hızlanma sağlamıştır. Sinüzoidal hareketli bir duvarın yüksek uygulama çabası ve hesaplama etkinliğinin kaybı nedeniyle, bir duvarın hareketi genellikle iki veya daha az mertebeden polinomlarla yaklaşık olarak tahmin edilmiştir.

(Lerner, Düring, & Wyart, 2013) çalışmalarında hidrodinamik etkileşimleri ihmal ederek dış kuvvetlere maruz kalan sürtünmesiz sert kürelerin aşırı sönümlü dinamikleri için Olay Güdümlü bir simülasyon şeması sunmuşlardır. Olay Güdümlü bu yaklaşım, sert küreler arasındaki temel temas ağını karakterize eden geometrik bilgi aracılığıyla itici gücü sonuçtaki hızlarla ilişkilendiren kesin bir hareket denklemine dayanmaktadır. Yöntemin, kesme akışı ve sıkıştırmaya ek olarak seçilen herhangi bir itici güç altında parçacıkların anlık koordinasyonunun yanı sıra temas kuvveti istatistikleri ve dinamiklerinin sağlam bir şekilde çıkarılmasına izin verdiği belirtilmiştir. Aynı zamanda kesme, sıkıştırma veya her ikisi altında yüksek hassasiyette sıkışan salmastralar oluşturmak için de kullanılabileceği vurgulanmıştır.

(Müller & Pöschel, 2013) çalışmalarında parçacıklar arasındaki etkileşim kuvvetinden elde edilen doğrultma katsayısı kavramını genelleştirmişler ve seyreltik sistemler ve sürtünmesiz etkileşim durumunda anlık olmayan çarpışmalar için bile oldukça verimli Olaya Güdümlü MD simülasyonları gerçekleştirilmesine izin veren sayısal bir şema türetmişlerdir. Şema tarafından tahmin edilen parçacık yörüngelerinin (süresi, temasın süresine karşılık gelen kısa bir geçiş dönemi periyodu hariç) ilgili kuvvet-güdümlü MD ile mükemmel bir şekilde uyuştuğu gösterilmiştir. Böylece bu yeni algoritmanın, Olay Güdümlü simülasyonların avantajlarını korurken Newton'un hareket denklemlerini ise kuvvet güdümlü MD gibi çözdüğü belirtilmiştir.

(Akkaya & Kandemir, 2015) çalışmasında sert küre gaz akışlarının özelliklerini tahmin etmek için Olay Güdümlü bir moleküler dinamik (OGMD) simülasyonu önerilmiştir. Moleküller sert küreler olarak ele alınmış, moleküllerin yörüngeleri, çarpışma ortakları, karşılık gelen etkileşim süreleri ve çarpışma sonrası hızlar, ayrık etkileşim potansiyelleri kullanılarak deterministik olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, sınır etkileşimleri stokastik olarak ele alınmıştır. Buna ek olarak, kanal boyunca bir basınç gradyanı oluşturmak için, OGMD simülasyonları için akış sınırları için örtük bir işlem uyarlanmıştır. Önerilen işlemin geçerliliğini göstermek için çeşitli kanal konfigürasyonları için Kesme Tahrikli (Couette) ve Basınç Tahrikli akışlar simüle edilmiştir. Sonuçların DSMC

yöntemi ve lineerleştirilmiş Boltzmann denkleminin çözümü ile uyumlu olduğu görülmüştür. Düşük Kn'de OGMD'nin, Navier-Stokes (N-S) denklemleri ve kayma sınır koşulları ile benzer hız profilleri ürettiği, ancak Kn arttıkça, N-S kayma modellerinin kayma hızlarını daha yüksek tahmin ettiği rapor edilmiştir.

(Yakunchikov & Kosyanchuk, 2018) OGMD algoritmasına dayalı bir sayısal yöntem, keyfi sınırlara sahip bölgelerde serbest moleküler ve geçiş bölgesi gaz akışlarının araştırılması için geliştirilmiştir. Yöntem, seyreltilmiş gaz dinamiğinin iki klasik problemine uygulanmıştır: (1) küçük basınç farkı olan iki rezervuar arasındaki sonlu uzunluktaki düzlem kanalı boyunca geçiş gaz akışı, (2) silindiri geçen süpersonik akış. Bu çok farklı problemler, seyreltilmiş gaz dinamiği için OGMD yönteminin etkinliğini ve uygulanabilirlik sınırlarını incelemek amacıyla seçilmiştir.

(Koc, Kandemir, & Akkaya, 2020) çalışmalarında geçiş rejiminde Olay-Güdümlü Moleküler Dinamik (OGMD) simülasyonunu kullanarak gözenekli ortam boyunca mono-atomik gaz akışının özelliklerini araştırmışlardır. Gözenekli yapıyı oluşturan moleküller ve katı parçacıklar sert küreler olarak modellenmiş ve böylece molekül yörüngeleri, çarpışma ikilileri, etkileşim süreleri ve çarpışma sonrası hızları deterministik olarak hesaplamışlardır. Gözenekli ortamı, kanalın ortasında asılı duran küresel parçacıklardan oluşturmuş ve bu parçacıklar düzenli bir kübik dizide kanala dağıltılmıştır. Gaz moleküllerinin gözenekli ortam ile çarpışması speküler yansıma sınır şartı ile sağlanmıştır. Gaz akışını sağlamak için gözenekli ortamın giriş ve çıkışına negatif basınç sınır koşulu uygulanmıştır. Gözeneklilik, katı küre çapı ve Knudsen sayısı (Kn), başlangıçta farklı Durumlar (Case) için simülasyona girilmiştir. Böylece, bu parametrelerin kütle akış hızı, dinamik viskozite, porozite ve geçirgenlik üzerindeki etkilerini OGMD simülasyonu ile hesaplanmışlardır. Sonuçları literatür ile karşılaştırmış ve tutarlı olduğu görmüşlerdir.

(Koç, Kandemir, & Akkaya, 2022) çalışmalarında iki paralel plaka arasına yerleştirilmiş çeşitli uzunluklarda (L) ve yüksekliklerde (H) bulunan yarık tipi bir engel boyunca Basınçla Güdümlü akışı, Olay Güdümlü Moleküler Dinamik (OGMD) simülasyonu ile incelemişlerdir. Geçiş rejiminde kanal boyunca Mach sayısı, sıcaklık ve basınç dağılımları elde etmişlerdir. Akışın Knudsen sayısı (Kn), yarığın geometrisi ve akışın çıkış/giriş basınç oranını değiştirilerek oluşturulan farklı durumlar için bu makroskobik özellikler ve akış hızındaki değişimleri incelemişlerdir. Gaz moleküllerinin plakalar ve engel ile çarpışmasını, dağınık yansıma sınır koşulu ile modellenmişlerdir. Akış hızı, geçiş rejiminde ani bir değişiklik ve basınç oranına bağlı olarak moleküler rejimde önemli farklılıklar göstermiştir. Kn, H ve L boyutlarının Mach diski oluşumunda etkili olduğunu görmüşlerdir. Normalize edilmiş basınç profillerinde yarık çıkışındaki basınç kayıpları Kn, H ve L boyutlarına bağlı olarak farklı şekillendiği

görülmüştür. Ayrıca yarığın giriş ve çıkışında oluşan girdapların yapısının Kn'ye bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçların bir kısmının literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlı olduğunu doğrulamışlardır.

REFERANSLAR

1. Akkaya, V. R., & Kandemir, I. (2015). Event-driven molecular dynamics simulation of hard-sphere gas flows in microchannels. *Mathematical Problems in Engineering*, *2015*. doi:10.1155/2015/842837
2. Alder, B. J., & Wainwright, T. E. (1957). Phase transition for a hard sphere system. *The Journal of Chemical Physics*. doi:10.1063/1.1743957
3. Alder, B. J., & Wainwright, T. E. (1959). Studies in molecular dynamics. I. General method. *The Journal of Chemical Physics*, *31*(2), 459–466. doi:10.1063/1.1730376
4. Bannerman, M. N., Sargant, R., & Lue, L. (2011). DynamO: A free O(N) general event-driven molecular dynamics simulator. *Journal of Computational Chemistry*, *32*(15), 3329–3338. doi:10.1002/jcc.21915
5. Bannerman, Marcus N., Green, T. E., Grassia, P., & Lue, L. (2009). Collision statistics in sheared inelastic hard spheres. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *79*(4). doi:10.1103/PhysRevE.79.041308
6. Cercignani, C., & Lampis, M. (1971). Kinetic models for gas—surface interactions. *Transport Theory and Statistical Physics*, *1*(2), 101–114. doi:10.1080/00411457108231440
7. Chikkadi, V., & Alam, M. (2009). Slip velocity and stresses in granular Poiseuille flow via event-driven simulation. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *80*(2). doi:10.1103/PhysRevE.80.021303
8. De Michele, C. (2010). Simulating hard rigid bodies. *Journal of Computational Physics*, *229*(9), 3276–3294. doi:10.1016/j.jcp.2010.01.002
9. Donev, A. (2009). Asynchronous Event-Driven Particle Algorithms. *SIMULATION*, *85*(4), 229–242. doi:10.1177/0037549708097881
10. Donev, A., Garcia, A. L., & Alder, B. J. (2008). Stochastic Event-Driven Molecular Dynamics. *Journal of Computational Physics*, *227*(4), 2644–2665. doi:10.1016/j.jcp.2007.11.010
11. Donev, A., Torquato, S., & Stillinger, F. H. (2005). Neighbor list collision-driven molecular dynamics simulation for nonspherical hard particles. I. Algorithmic details. *Journal of Computational Physics*, *202*(2), 737–764. doi:10.1016/j.jcp.2004.08.014
12. Epstein, M. (1967). A model of the wall boundary condition in kinetic theory. *AIAA Journal*, *5*(10), 1797–1800. doi:10.2514/3.4307
13. Hernández De La Peña, L., Van Zon, R., Schofield, J., & Opps, S. B.

(2007). Discontinuous molecular dynamics for rigid bodies: Applications. *Journal of Chemical Physics*, *126*(7). doi:10.1063/1.2434959

14. J.C. Maxwell. (1879). On Stresses in Rarified Gases Arising from Inequalities of Temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society.*, *170*(1879), 231–256. doi:10.1098/rstl.1879.0067
15. Kandemir, I. (1999). *A multicell molecular dynamics method [Ph.D. thesis]*. Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, USA.
16. Koc, M., Kandemir, I., & Akkaya, V. R. (2020). An Investigation of Transition Flow in Porous Media by Event Driven Molecular Dynamics Simulation. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *14*(1), 23–36. doi:10.47176/jafm.14.01.31475
17. KOÇ, M., KANDEMİR, İ., & AKKAYA, V. R. (2022). Transition Gas Flow Between Two Parallel Plates with A Slit-Type Obstacle of Various Geometry by Event Driven Molecular Dynamics Simulation. *Sakarya University Journal of Science*. doi:10.16984/saufenbilder.1081717
18. Lerner, E., Düring, G., & Wyart, M. (2013). Simulations of driven overdamped frictionless hard spheres. *Computer Physics Communications*, *184*(3), 628–637. doi:10.1016/j.cpc.2012.10.020
19. Marfn, M., & Cordero, P. (1995). *An empirical assessment of priority queues in event-driven molecular dynamics simulation*. *Computer Physics Communications* (Vol. 92).
20. Miller, S., & Luding, S. (2004). Event-driven molecular dynamics in parallel. *Journal of Computational Physics*, *193*(1), 306–316. doi:10.1016/j.jcp.2003.08.009
21. Müller, P., & Pöschel, T. (2013). Event-driven molecular dynamics of soft particles. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *87*(3). doi:10.1103/PhysRevE.87.033301
22. Rapaport, D. C. (1980). *The Event Scheduling Problem in Molecular Dynamic Simulation*. *JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS* (Vol. 34).
23. Roeller, K., Herminghaus, S., & Hager-Fingerle, A. (2012). Sinusoidal shaking in event-driven simulations. *Computer Physics Communications*, *183*(2), 251–260. doi:10.1016/j.cpc.2011.09.005
24. Tang, W. T., Goh, R. S. M., & Thng, I. L. J. (2005). Ladder queue: An O(1) priority queue structure for large-scale discrete event simulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, *15*(3), 175–204. doi:10.1145/1103323.1103324
25. Valentini, P., & Schwartzentruber, T. E. (2009). A combined Event-Driven/Time-Driven molecular dynamics algorithm for the simulation of

shock waves in rarefied gases. *Journal of Computational Physics*, *228*(23), 8766–8778. doi:10.1016/j.jcp.2009.08.026

26. Yakunchikov, A., & Kosyanchuk, V. (2018). Application of event-driven molecular dynamics approach to rarefied gas dynamics problems. *Computers and Fluids*, *170*, 121–127. doi:10.1016/j.compfluid.2018.05.002

JET GROUT VE TAŞ KOLON YÖNTEMLERİ İLE SIVILAŞMA ANALİZİ: TERME (SAMSUN) ÖRNEĞİ

Onur Cafer KURT[1]
Doç. Dr. Mustafa VEKLİ[2]

[1]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-6180-3953
[1]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-5850-731X

1. Giriş

Proje öncesinde yapılan zemin etüdü ile zemin; yapının kendi yükünü ve diğer ek yükleri taşıyamıyorsa, yapının bu yükleri taşıyabilmesi için derin temeller veya zemin iyileştirme ile (bazı durumlarda her ikisi) zeminin taşıma kapasitesi artırılır. İyileştirme yöntemi olarak teknolojinin gelişmesiyle birlikte yeni yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerden son yıllarda sıklıkla uygulamalarda kullanılan en önemli ikisi Jet grout ve taş kolon yöntemleridir. Jet grout ve taş kolon yöntemleri ile farklı fiziksel ve dayanım özelliklerine sahip farklı zemin türlerinde farklı çap ve uzunlukta ve istenilen mukavemette kolon imal ederek zemini iyileştirmek mümkündür.

Jet Grout yöntemi, zeminde rijit kolonlar oluşturmak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Jet grout patenti sayılabilecek uygulamalar 1950'li yıllarda İngiltere'de geliştirilmiştir. Bu teknolojinin ilk uygulamalarında, bir su jeti etkisi ile kimyasal enjeksiyon ile iyileştirilmemiş veya kısmen iyileştirilmiş zeminlerin kesilmesi amaçlanmıştır. Bu noktada zeminin bölünmüş boşluklarına beton esaslı sentetik bileşikler gönderilerek geçirimsiz bölgeler oluşturulmuştur. Daha sonra, ince sabitleyici gölgeler yapmak için dere enjeksiyon stratejisi ek olarak kullanılmıştır [1]. 1970'lerin ortalarına kadar çalışılan levha akış şerbeti iskeletinin yeterince kalın olmaması ve kopma mukavemetinin çok düşük olması nedeniyle Japonya'da bir döner düzlem şerbet iskeleti yapılmıştır [1]. 1970'lerde Japonya'da bir diyafram duvarı oluşturmak için başka bir jet grout tekniği geliştirilmiştir. Bu yöntemin en önemli özelliği; zemini kesip, ezip ve sıkıştırmak için üç farklı sıvının (su, hava, çimento şerbeti) kullanıldığı üçlü jet sisteminin bir uygulamasıdır. Yahiro ve Yoshida (1974), [2] daha sonra jet grout işletim sistemine hava sargılı bir su jeti sistemi eklemiştir. Bozulan zemin hava akımı ile parçalanır ve oluşan boşluklar enjeksiyonla doldurulur ve karıştırılır. Son yıllarda Jet Grout teknolojisi mühim ölçüde geliştirilmiştir. Yüksek enjeksiyon basıncı ve akış oranları ile sonuçlanan çok yüksek basınçlı pompalar üretilmiştir. Su-çimento karıştırıcıları modernize edilmiştir. Bu çözümler sayesinde yetersiz bölge ve hava koşulları sorununun aşılması, makinelerin güvenlik koşullarının iyileştirilmesi, süreç, hazırlık çalışmaları ve diğer işlemler için gereken sürenin kısaltılması mümkün olmuştur. Günümüzde yaratılan yeniliklerle birlikte, bu yöntem; infüzyon gerilimi ve infüzyon hızı genişlemiş, işçilik gereksinimi azalmış, hazır olma işi ve geliştirme süresi kısıtlanmış, dere grout uygulamaları çok daha sağlam donanımlarla sınırsız hale gelmiş ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Zemin iyileştirmek için kullanılan diğer bir yöntem taş kolon yöntemidir. Taş kolon yöntemi kısaca zeminde bir delik oluşturulup, ardından bu deliğe kademeler halinde doldurulan taş vb. malzemenin vibrasyon veya darbe etkisi ile

düşey ve radyal yönde sıkıştırılması olarak tarif edilebilir. Yöntem Avrupa'da 1950'den sonra, Amerika'da ise 1972'den sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3]. Taş kolon yöntemi ile zeminlerin taşıma gücü artmakta [4,5,6], oturmalar azalmakta [7,8] ve şev stabilitesi [9,10,11] artmaktadır. Yapılan bir çok çalışmada sıvılaşmanın, depremler sonucu meydana gelen hasarların önemli bir kısmını oluşturduğunu belirtmişler ve sıvılaşma riskinin azaltılması için taş kolon yöntemi ile zemin iyileştirmenin etkisi incelenmişlerdir [12,13,14]. Ülkemizde ilk olarak 1999 depremi sonrasında Sakarya bölgesinde sıvılaşma riskinin azaltılmasını amaçlayan uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

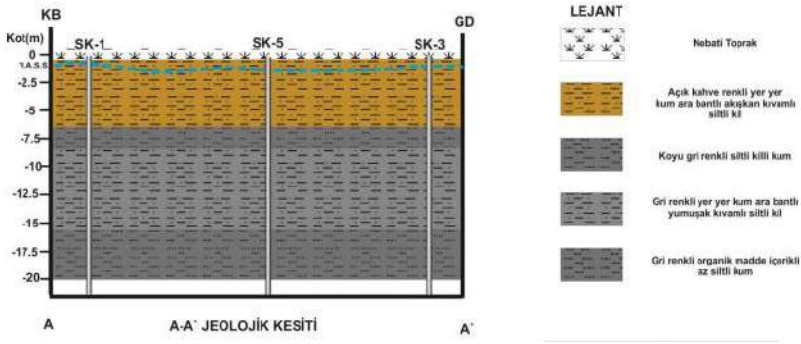
Bu çalışmada Samsun ili, Terme ilçesinde yaklaşık 7500 m^2'lik alanda yapılaması düşünülen Bodrum+Zemin+1 katlı yapı için zemin etüdü raporu sonucu ile olası sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Analizler sonucu sıvılaşma riski olan alanda Jet Grout yöntemi ve taş kolon yöntemi ile zemin iyileştirilerek sıvılaşma analizleri yeniden yapılmış ve sonuçlar incelenerek ortaya konmuştur.

2. İnceleme Alanı

Bu çalışmada öncelikle Samsun ili, Terme ilçesi, Gündoğdu Mahallesinde bulunan parselde inceleme alanını oluşturan zeminin özelliklerinin ortaya konması amacıyla derinlikleri 5 adet 20 şer m. toplam 100 m. araştırma sondajı yapılmıştır (Şekil 1).

Şekil 1. Sondaj kuyuları görünümü

Yapılan sondaj çalışmaları sonucu zeminin Profili Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Zemin Profili

Zemin profili incelendiğinde zemin, zaman zaman içinde organik madde de içeren az siltli kum (SM) olarak bulunmuştur.

Yapılan Standart Penetrasyon deney (SPT) sonuçlarından SK-1ve SK-2'ye ait SPT N değerleri Şekil 3'de verilmiştir. Bu değerlere göre zemin gevşek ve çok gevşek olarak tanımlanabilir.

DERİNLİK			Ort.	SPT ort	A	N_{60}	$(N_1)_{60}$-$C_N.N_{60}$			N'
Metre			Der. m.	N ort		N(Er/60) A	σ'_v Kg/cm2	C_N	$(N_1)_{60}$	$15+[(N_1)_{60}-15]/2$
1,50	-	1,95	1,73	7	0,75	4	0,30	1,54	6	6
3,00	-	3,45	3,23	UD	0,75	5	0,42	1,42	6	6
4,50	-	4,95	4,73	0	0,75	0	0,54	1,33	0	0
6,00	-	6,45	6,23	UD	0,85	6	0,65	1,26	7	7
7,50	-	7,95	7,73	29	0,85	18	0,76	1,20	22	19
9,00	-	9,45	9,23	0	0,95	0	0,88	1,15	0	0
10,50	-	10,95	10,73	2	0,95	1	0,99	1,10	2	2
12,00	-	12,45	12,23	3	1,00	2	1,11	1,06	2	2
13,50	-	13,95	13,73	8	1,00	6	1,22	1,03	6	6
15,00	-	15,45	15,23	8	1,00	6	1,34	0,99	6	6
16,50	-	16,95	16,73	3	1,00	2	1,45	0,96	2	2
18,00	-	18,45	18,23	30	1,00	23	1,56	0,94	21	18
19,50	-	19,95	19,73	24	1,00	18	1,68	0,91	16	16

DERİNLİK			Ort.	SPT ort	A	N_{60}	$(N_1)_{60}=C_N.N_{60}$			N'
Metre			Der. m.	N Ort		N(Er/60) A	σ'_v Kg/cm2	C_N	$(N_1)_{60}$	$15+[(N_1)_{60}-15]/2$
1,50	-	1,95	1,73	5	0,75	3	0,30	1,55	4	4
3,00	-	3,45	3,23	UD	0,75	5	0,41	1,43	7	7
4,50	-	4,95	4,73	2	0,75	1	0,52	1,34	2	2
6,00	-	6,45	6,23	UD	0,85	5	0,62	1,27	7	7
7,50	-	7,95	7,73	26	0,85	17	0,73	1,22	20	18
9,00	-	9,45	9,23	0	0,95	0	0,84	1,17	0	0
10,50	-	10,95	10,73	3	0,95	2	0,95	1,12	2	2
12,00	-	12,45	12,23	5	1,00	4	1,06	1,08	4	4
13,50	-	13,95	13,73	8	1,00	6	1,16	1,05	6	6
15,00	-	15,45	15,23	7	1,00	59	1,27	1,01	60	38
16,50	-	16,95	16,73	5	1,00	4	1,38	0,98	4	4
18,00	-	18,45	18,23	29	1,00	22	1,49	0,96	21	18
19,50	-	19,95	19,73	24	1,00	18	1,60	0,93	17	16

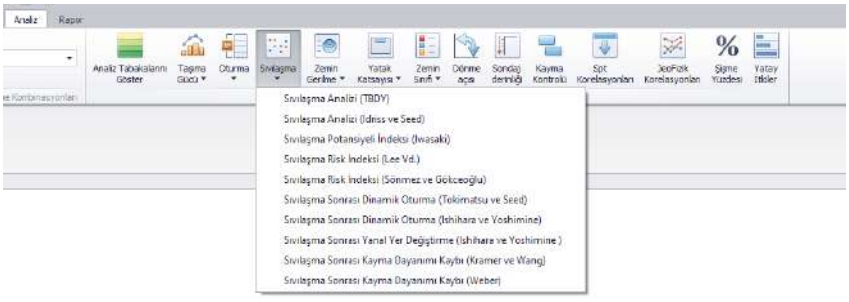
Şekil 3. SK-1 ve SK3 SPT N değerleri

Sıvılaşma analizleri ve diğer analizler için yapılan laboratuvar ve arazi çalışmaları sonucunda elde edilen zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. Analizlerde kullanılan Zemin parametreleri

	(kN/m^3)		**c (kN/m^2)**	**E (kN/m^2)**	
Kum	16	23	2,2	1100	0,49

Analizlerde Jeo Jet Grout uygulaması kullanılmıştır. Kullanılan analiz programı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY -2018) yer alan sınır değerlerle otomatik olarak karşılaştırabilmektedir. TBDY(2018)'e göre sıvılaşma sınır değeri 1.1 olarak verilmiş ve altında bir değer söz konusu ise zemin iyileştirmenin sağlanarak, analiz raporlarının yeniden yapılması gerekmektedir. Jeo Jet Grout uygulamasının sıvılaşma menüsüne Şekil 4'te yer verilmektedir.



Şekil 4. Jeo Jet Grout Sıvılaşma Analizi Menüsü

Sıvılaşma analizleri iki hat boyunca jeofizik yöntemlerle de yapılmış ve analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo2. 1. ve 2. Hatlar Jeofizik sıvılaşma analiz sonuçları

1.hat

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1*	CRR (z)	Gk	PL (Vs1'den)	PL Grubu	SıvılaşmaDüzeyi
1,8	148	1,35	199,95	215	0,2600	2,00	0,0	CL	SY
3,3	148	1,23	181,97	215	0,1422	0,43	17,2	AL	SV
4,8	218	1,16	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
6,3	218	1,10	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
7,8	218	1,06	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
9,3	218	1,02	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
10,8	218	0,99	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
12,3	218	0,97	210,80	215	0,5000	1,20	0,0	CL	SY
13,8	218	0,94	205,70	215	0,3805	0,95	4,3	CL	SO
15,3	218	0,92	201,16	215	0,2774	0,73	25,5	AL	SV
16,8	218	0,90	197,08	215	0,2275	0,63	35,8	AL	SV
18,3	218	0,89	193,39	215	0,1974	0,58	41,8	AL	SV
19,8	218	0,87	190,02	215	0,1768	0,54	45,6	AL	SV
21,3	218	0,86	186,92	215	0,1616	0,52	48,0	AL	SV

2.hat

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1*	CRR (z)	Gk	PL (Vs1'den)	PL Grubu	SıvılaşmaDüzeyi
1,8	146	1,35	197,24	215	0,2291	2,00	0,0	CL	SY
3,3	146	1,23	179,52	215	0,1342	0,41	17,9	AL	SV
4,8	208	1,16	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
6,3	208	1,10	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
7,8	208	1,06	214,00	215	0,5000	SY	0,0	CL	SY
9,3	208	1,02	213,06	215	0,5000	1,17	0,0	CL	SO
10,8	208	0,99	206,66	215	0,4163	0,98	1,6	CL	SO
12,3	208	0,97	201,13	215	0,2769	0,67	28,4	AL	SV
13,8	208	0,94	196,26	215	0,2199	0,55	40,6	AL	SV
15,3	208	0,92	191,93	215	0,1878	0,49	47,8	AL	SV
16,8	208	0,90	188,04	215	0,1668	0,46	52,3	AL	SV
18,3	208	0,89	184,52	215	0,1516	0,44	55,1	AL	SV
19,8	208	0,87	181,30	215	0,1400	0,43	56,9	AL	SV
21,3	208	0,86	178,34	215	0,1307	0,42	57,8	AL	SV

Tablo 2'de görüldüğü üzere zeminde birçok noktada 1. ve 2. hat boyunca sıvılaşma riski bulunmaktadır. Sıvılaşma risklerini ortadan kaldırmak için Taş kolon ve Jet grout yöntemleri ile zeminde iyileştirme yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3. Taş Kolon Yöntemi ile İyileştirme

Türkiye deprem haritasına gidip ilgili bölge seçildiğinde ki burada Samsun ili Terme ilçesi için seçim yapıldığında Samsun bölgesi değerleri ile karşılaşılmaktadır. Seçim sonunda Sds analizinin değerini TBDY gereği 0.98 olduğunu görebiliriz. İyileştirme öncesi yapılan analiz sonucunda sıvılaşma için değer 0,33 olarak bulunmuş ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

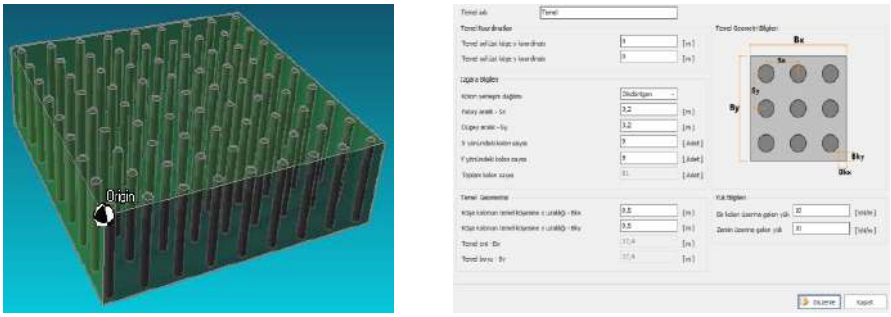
Tablo3. İyileştirme öncesi Sıvılaşma analiz sonuçları

No	z	σvo	σ'vo	SptN	Cn	N160	Alfa	Beta	N160f	Cm	CRR M7.5	τ_R [kPa]	r_d	τ_{deprem} [kPa]
1	8	144	64	10	1,222	9	4,289	1,115	14	1,193	0,15	11,463	0,939	34,446

Sıvılaşma Analizi Sonuç Kontrolü

Tabaka	Değer	Sonuç
Tabaka 1	0,333 < 1,1	Yetersiz

İyileştirme Jet grout kolonları 0.8 m çapında ve 8 metre uzunlukta olacak şekilde hesap yapılmaktadır. Taş kolonların ve jet grout kolonlarının planda yerleşimi aynı seçilmiş ve yerleşim planı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Taş kolon ve Jet grout Kolon yerleşim Planı

Şekil 5'de de görüldüğü gibi taş kolon ve jet grout kolonlar kare yerleşimli olarak seçilmiş ve merkezden merkeze mesafesi 3.2 m olarak tanımlanmıştır. İyileştirme sonrası analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

ANALİZ SONUÇLARI

No	no	Δ(A/Ac)	n1	m1	Φ1	c1	fd	n2	m2	Φ2	c2
1	1,19	0,52	1,19	0,16	8,11	0,19	1,05	1,25	0,2	10,05	0,18

Şekil 6. Taş kolon yöntemi ile iyileştirme sonrası analiz sonuçları

4. Jet Grout Yöntemi ile İyileştirme

TBDY(2018)'e göre sıvılaşma güvenlik katsayısı olan 1.1'den küçük bir değere zeminde diğer yöntem olarak jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi yapılarak uygulama sonrasında sıvılaşma riskinin ortadan kalkması amaçlanmaktadır. Taş kolon yöntemi ile aynı yerleşim düzeni ve kolon uzunluğuna sahip uygulama sağlanmış ve jet enjeksiyonu sonrası sıvılaşma değerlerini gösterir geoteknik rapor çıktısına Şekil 7'de verilmiştir.

No	Ejg [MPa]	Gjg [MPa]	Vs [m/s]	Gs [MPa]	Gr	ar	Sr	rd [m]
1	8192,6	2749,195	170,804	47,582	57,778	0,049	0,264	0,868

Temel için jet grout sonrası sıvılaşma kontrolü

No	Tmax	TmaxOrt	Vtotal	Vzemin	Vkolon	Vjg	Sonuç
1	44,414	28,869	295,617	78,06	217,558	261,187	Yeterli (261,19 > 217,56)

Şekil 7. Jet Grout yöntemi ile iyileştirme sonrası analiz sonuçları

5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve sanayinin gelişmesiyle birlikte, yaşam alanları ve sanayi tesisleri için uygun inşaat alanları da tükenmeye başlamıştır. Bu nedenle yapılaşmaya uygun olmayan bazı alanlarda, yapılaşma zorunlulukları ortaya çıkmaktadır. Zemin taşıma gücü yada deformasyon özellikleri uygun olmayan bu tür alanlarda zemin iyileştirme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda ülkemizde de sıklıkla kullanılan jet grout yöntemi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında ekonomik olması, kısa sürede imal edilebilmesi, her türlü zeminde kullanılabilmesi gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Taş kolon yönteminin ise benzer şekilde gerekli ekipmanın sağlanması ile imalatının oldukça kolay olması, diğer yöntemlere göre daha ekonomik olarak tanımladığımız ekonomik olarak karşımıza çıkan Jet Grout yöntemine göre kullanılan malzeme açısından daha ekonomik olması ve aynı zamanda düşey diren vazifesi de görebilmesi nedeniyle zemin iyileştirme yöntemi olarak karşılaştırılabileceği düşünülüp iki yöntem kıyaslanmıştır.

Yapılan analizlerde sıvılaşma analizinin 0,333 iken jet Grout yöntemi ile iyileştirme yapıldıktan sonra jet grout kolonun kayma kapasitesi 261,87 olarak hesaplanmıştır. Buna karşın jet grout kolonuna etkiyen kayma gerilmesinin 217,56 olduğu görülmektedir. Taş kolon kolon yöntemi seçilerek ZD yerel zemin sınıfına ait analizlerde taşıma gücünün 1.19 oranında arttığı görülmüştür. Her iki iyileştirme türünde, jet grout (jet1) ve taş kolon yöntemi kullanılmış ve iki zemin türünde de iyileşmenin sağlandığı sonucunda ulaşılmıştır.

KAYNAKÇA

1. Moseley, M.P. & Kirsch, K. (2004). *Ground improvement*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2004.
2. Yahiro, T. & Yoshida, H. (1974). On the characteristics of high speed water jet in the liquid and its utilization on induction grouting method. Proc. 2nd Int. Symp. on Jet Cutting Technol., Cambridge, UK 4, 41–63
3. Vekli M, Aytekin M, İkizler SB & Çalık Ü (2012) Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns. Nat Hazards 64(1):797–820.
4. Murugesan S & Rajagopal K (2006) Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation. *Geotext Geomembr*, 24:349–358
5. Ambily AP & Gandhi SR (2007). Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *J Geotech Geoenviron Eng*, 133(4), 405–415
6. Şahinkaya, F., Vekli, M. & Çadır, C. C. (2017). Numerical analysis under seismic loads of soils improvement with floating stone columns. *Natural Hazards*, 88(2), 891–917.
7. Tan SA & Khine KO (2005) Finite element modeling of stone columns—a case history. In: 16th International conference of soil mechanics and geotechnical engineering, Osaka, pp 1425–1428
8. Patel BR & Shroff AV (2005) Study on composite stone column in Soft Kaolinitic Clay. In: 16th International conference of soil mechanics and geotechnical engineering, Osaka, pp 1413–1417
9. Connor SS & Gorski AG (2000) A timely solution for the Nojoqi Grade landslide. Repair US 101 South of Buellton. In: 51 st Annual highway geology symposium, Seattle, pp 1–11
10. Kirsch F & Sondermann W (2003) Field measurements and numerical analysis of the stress distribution below stone column supported embankments and their stability. In: International workshop on geotechnics of soft soil theory and practice, Essen, pp 595–600.
11. Çadır, C.C., Vekli, M. & Şahinkaya, F. (2021). Numerical analysis of a finite slope improved with stone columns under the effect of earthquake force. Nat Hazards 106, 173–211 (2021). https://doi.org/10.1007/s11069-020-04456-0
12. Baez JI (1995). *A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns*. PhD Thesis. University of Southern California.
13. Adalier K, Elgamal A, Meneses J & Baez JI (2003). Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils. *Soil Dyn Earthq Eng*, 23, 571–584.

14. Han J & Ye SL (2002) A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundation accounting for smear and well resistance effects. Int J Geomech 2(2):135–151.

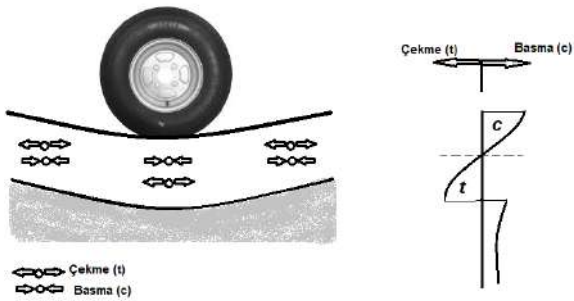
ASFALT BETON MALZEMELERİN KARMA MOD I-II KIRILMA ÖZELLİKLERİNİN VE TOKLUK DEĞERİNİN BELİRLENMESİNDE BİR ASTM STANDARDININ FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI

Nazife Erarslan

İzmir Demokrasi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
Eposta: nazife.dogan@idu.edu.tr ORCID ID: 0000-0002-5202-9644
Adres: İzmir Demokrasi üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Üçkuyular, Gürsel Aksel Blv No:14, 35140 Karabağlar/İzmir

1. Giriş

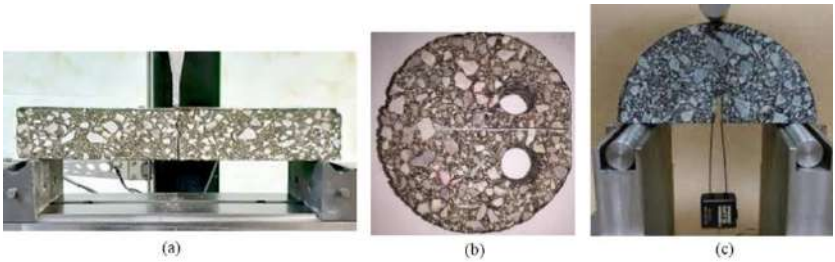
Asfalt yol kaplamaları, trafik yükünden kaynaklanan gerilmeleri alt temel malzemelerini deforme etmeyecek şekilde alt katmanlara dağıtan kompozit bir malzemedir. Aynı zamanda, üst tabaks, yol alt tabakalarından gelen deformasyon ve çatlakların yüzeye yansımasını engellemelidir. Tekerlek yükü altında meydana gelen eksenel gerilmeler, yüzeye yakın alanlarda basma gerilmesine neden olur (Şekil 1). Tekerleğin hemen altındaki bölgedeki düşey gerilme (σz) çapsal sıkıştırma gerilmeleridir ve bu gerilmeler yatay yönde indüklenen dolaylı çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar (Şekil 1). Oluşan bu basma gerilmeleri, yüzey kaplamasında tekerlek izi şeklinde deformasyonlara neden olurken, kaplama altında oluşan dolaylı çekme gerilmeleri ise çekme, yorulma çatlaklarına ve deformasyona neden olur. Bu noktada, kırılma mekaniği ilkeleri dahil edilerek yapılan analizlerin, asphalt kaplama ve asphalt bitümlü temel (ACB) araştırmalarında oldukça faydalı olacağına inanılmaktadır (Li ve Maresteamu, 2004; Ling vd., 2019. Özellikle, kırılma mekaniğinde yer alan mod I (çekme) ve karma mod I-II (çekme-kesme) çatlakları/yenilmeleri, bu tür hem basma hem de indirek çekme ve makaslama gerilmelerinin oluştuğu asphalt kaplama ve Asphalt Beton (AC) araştırmalarında oldukça fayda sağladığı literatürde pek çok araştırmada belirtilmiştir (Li ve Maresteamu 2004; Ling vd. 2020; Kuruppu vd., 2014; Wang vd. 2014; Zang vd., 2014).



Şekil 1. Teker yükü altında esnek yol kaplamalarda gerilme dağılımı

ACB farklı fazları olan bir kompozit malzeme olup çoğunlukla bir kaplamanın temel tabakası olarak kullanılan büyük boyutlu agregaların kullanıldığı bir malzemedir. Çeşitli bağlayıcı veya bitüm türleri ve farklı boyutlardaki agregaların karıştırılmasıyla farklı hava boşluğu oranlarında oluşturulabilen bu partiküllü kompozitler, sıcak bölgelerde farklı deformasyonlar gösterirler, örneğin düktil deformasyonlar, fakat soğuk iklimlerde kırılgan malzeme deformasyonları gösterirler (Zang vd., 2014; Si vd., 2002; Li ve Maresteamu,

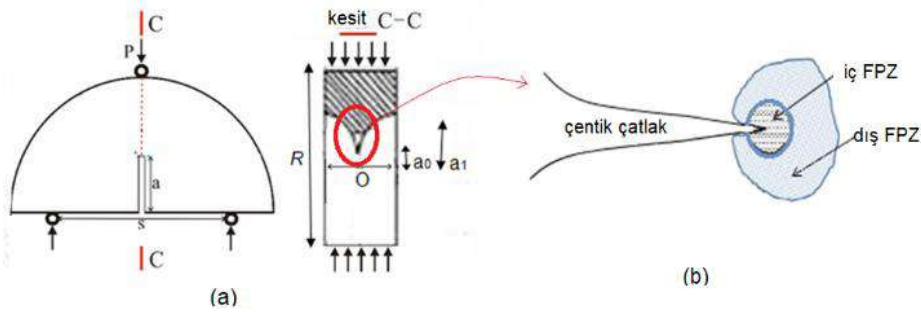
2004; Ling vd., 2020; Aliha vd., 2015-2020; Mirsayar, 2017). AC gibi kompozitler heterojen malzemelerdir ve asfalt kompozit üretiminde sırasında özellikle agregalar ve bitüm bağlayıcı arasında birçok yapısal mikro çatlak oluşur. Bu mikro çatlaklar özellikle mekanik yükleme ve sıcaklık değişimlerinden dolayı büyümeye ve yayılmaya başlarlar. Bu nedenle, asfalt kompozitlerin mekanik özelliklerini anlamak için kırılma mekaniği uygulamalarının kullanılması oldukça fayda sağlamaktadır. AC topluluğu, literatürde yer alan araştırmaları doğru bir şekilde değerlendirmek için son yıllarda kırılma mekaniği testlerini kullanmaya başlamış ve dahası bu alanda yeni uluslararası standart testler sunulmuştur (ASTM D8044; AASHTO, 1993). AC araştırmalarında kullanılan test yöntemleri arasında özellikle çentik çatlaklı kiriş (SEB) testi, direkt çekme disk (DCT) testi ve yarım daire disk (SCB) testleri tercih edilmektedir (Maresteanu vd., 2002; Wagnoner vd., 2005) (Şekil 2). Literatürdeki son araştırmalarda, kırılma mekaniği prensipleri özellikle yorulma ve viskoz deformasyon araştırmalarında, örn. AC'deki deformasyonları daha ayrıntılı olarak tanımlamak için kohezif çatlak modelleri, kullanıldığı görülmektedir. (Li ve Guo, 2019; Song vd., 2008, Wang vd., 2014, Yin vd., 2015).



Şekil 2. AC malzemelerde kırılma testleri(a) SEB test (b) DCT test and (c) SCB test

AC kompozitlerde kırılma kaynaklı deformasyonu tanımlamak ve AC'nin mekanik performansını artırmak için yapılan testlerin çoğunda, yeni oluşacak çatlağın başlama yerini kontrol edebilmek için numuneye bir çentik yerleştirilir (Im vd. 2014; Kuruppu vd., 2014; Ling vd., 2020). Kırılma mekaniği prensiplerinden Gerilme Yoğunluk Faktörü (SIF) yaklaşımının, çatlak önündeki plastik bölgenin büyüklüğünün ilk çatlak uzunluğuna kıyasla küçük olması durumunda, sıcak karışımlı asfalt (HMA) gibi viskoelastik malzemeler için oldukça uygun olduğu kabul edilir (Aliha vd., 2020; Im vd.,2014). Son yıllarda asfalt kompozitlerin mod I kırılma tokluğunu belirlemek için çentik çatlağı içeren SCB geometrisini uluslararası standart testler önerildi (ASTM D8044; AASHTO, 1993; Ayetollahi ve Pirmohammad, 2013; Ling vd., 2020; NRC,

2004). Ayrıca SCB numune geometrisi ile, çentik çatlağı ucunda oluşan elastoplastik deformasyonların incelenmesi için 'çatlak ilerleme alanı (FPZ)' nın incelenmesi de mümkün olmaktadır (Şekil 3). FPZ genel olarak iki bölgede incelenir: 1) İç bölge: ilk gerilme kaynaklı çatlak gelişimi; ve (ii) Dış bölge: kararsız/duraysız çatlak gelişimi. İç bölgede, çentik çatlak ucunda indüklenen gerilmeler, çatlak yayılımındaki gerilme artışlarından daha hızlı artar ve bu alanda ezik bölge oluşur. Bu bölgede ayrıca gerinim sertleşmesine yol açan pek çok mikro ve nano ölçekli çatlak oluştuğunu belirtmek önemlidir. Bu bölge, gerilme konsantrasyonu SIF kritik bir değere, KIC, ulaşana kadar büyümeye devam eder devam eder. Dış bölgede ise, numune içindeki indüklenen gerilme, kararsız çatlakların gelişmesi ve daha büyük deplasmanların oluşması nedeniyle daha azalmaya başlar. (Sualiman ve Stock, 1995; Shenoy, 2002).



Şekil 3. SCB numune geometri parametreleri ve çentik çatlağı önünde FPZ bölgeleri

Çatlak ucunun etrafındaki alanın herhangi bir noktasındaki gerilim durumu şu şekilde hesaplanır:

$$\frac{K_I}{\sigma_o\sqrt{\pi c}} = Y_I \qquad Eş.1$$

Burada, maksimum asal gerilme (çekme) yönünde ilerleyen çentik çatlağı çevresindeki gerilim koşulu, KI ($N/mm^{3/2}$); kırılma yükü P, çentik çatlak uzunluğu, c ve numune boyutları ile orantılı olarak tanımlanır. σ_o , F/2rt formülü kullanılarak hesaplanır. F, kırılma meydana geldiği andaki maksimum yüktür (MN). Numunenin boyutları, t, r ve c, sırasıyla metre cinsinden kritik çatlak boyutunun kalınlığı, yarıçapı ve uzunluğudur. YI, boyutsuz mod I SIF değeridir. Böylece, KI'in kritik değere ulaşması ile, malzemelerin kırılma tokluğu, KIC parametresi elde edilir.

2. Deneysel Materyal ve Araştırma Yöntemleri

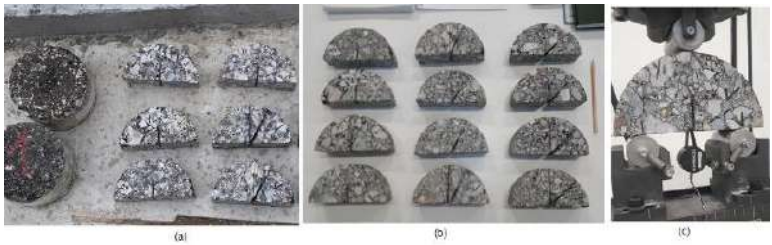
2.1 Deneysel Materyaller

ACB karışım dizaynında, Aydın Köşk Başçayır Taşocağından üretilen (19–38) mm, (13-19)mm., (5-13)mm ve (0–5) mm tane boyu agregalar ve 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Karışım gradasyonunun hazırlanmasında, elek analizi sonuçlarının ortalamaları esas alınmıştır. Dizayn gradasyonuna uygun olarak hazırlanan agregalara şartnamelere uygun standard deneyler yapılmıştır (örn. Hacim özgül ağırlığı, Zahiri özgül ağırlığı, absobsiyon değeri vb.). Kullanılan bitüme ait deneylerin sonuçları ise aşağıda Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bitüm deney sonuçları

Bitüm Özgül Ağırlığı	**1,029**	TS 1087
Bitüm Penetrasyonu, dmm	**57**	TS EN 1426
Yumuşama Noktası, ^oC	***51,0***	TS EN 1427
İmalatta kullanılacak bitümlü bağlayıcı	**Rafinerisi tipi**	**Aliağa Bitüm**

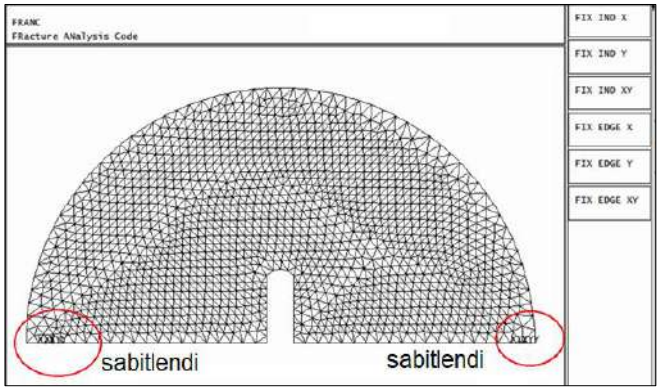
Karışım gradasyonu ve optimum bitüm içeriği belirlendikten sonra, ACB karışımları oluşturulmuş ve kırılma tokluğu testleri için ASTM D8044 standardı takip edilerek silindirik numuneler sahadan alınmıştır. Silindirik karot numunelerden yirmi adet yarım daire SCB numunesi kırılma tokluğu testleri için hazırlandı (Şekil 4). Üç farklı çentik çatlak açısına (β) sahip numunelerin kırılma tokluğu değerlerini belirlemek için her deney setinden dört tekrarlı deney olmak üzere on iki SCB numunesi test edildi (Şekil 4-b). Numune kalınlığı B, 50 mm, numune çapı D, 150 mm, çatlak kalınlığı t, 2 mm ve dış çentik çatlak uzunluğu a_1, 38 mm olarak belirlenmiştir. Çatlak açılma deplasmanı (COD) mesafesi doğrudan ölçülmüştür. COD ölçümü için SHIMADZU P701805 model transdüser kullanıldı (Şekil 4-c). Kullanılan transdüser, Amerikan standardı ASTM 399 70T ve ASTM D8044-16'da belirtilen özellikleri karşılamaktadır.



Şekil 4. Hazırlanan SCB numuneleri ve CMOD transdüseri

2.2 Sayısal Analizler

Çalışmada sayısal analizler, kırılma mekaniği prensiplerine göre geliştirilen FRANC2D (Fracture Analyses Code) programı kullanılmıştır. FRANC2D ayrık çatlak yayılımı analizi yapabilen iki boyutlu lineer ve plastik analiz programıdır. FRANC2D ile yapılan gerilme ve çatlak analizlerinde, kırılma mekaniğinde var olan üç çatlak yayılım teorisinden Maximum Teğetsel Gerilme Konsantrasyon Teorisi kullanılır (Erdogan ve Sih, 1963). Sayısal modellemede FRANC2D ile analizlere başlamadan önce modellenecek uç şekli ve kaya örneği CASCA adı verilen ağ üreticisi (mesh generator) ile ağ modellenmesi yapılmıştır (Şekil 5). Hem gerilme dağılımları analizleri hem de çatlaklanma analizleri yüksek doğrulukla yapılıp, programın sonuçlarının geçerliliği yapılan deneyler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Kısım 3). Sayısal modellemelerde FRANC2D ile analizlere başlamadan önce modellenecek SCB numunesi ve çentik çatlak açıları CASCA ağ yaratıcısı (mesh generator) ile ağ modellenmesi yapılmıştır. Modellenen SCB numune modelinde, üç noktalı eğilme deney düzeneğinde yer alan destek noktaları hem yatay hem düşeyde (x, horizontal direction ve y, vertical direction) sabitlenmiştir.



Şekil 5. SCB numunesinin CASCA ile modellenmesi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Deneysel Sonuçlar

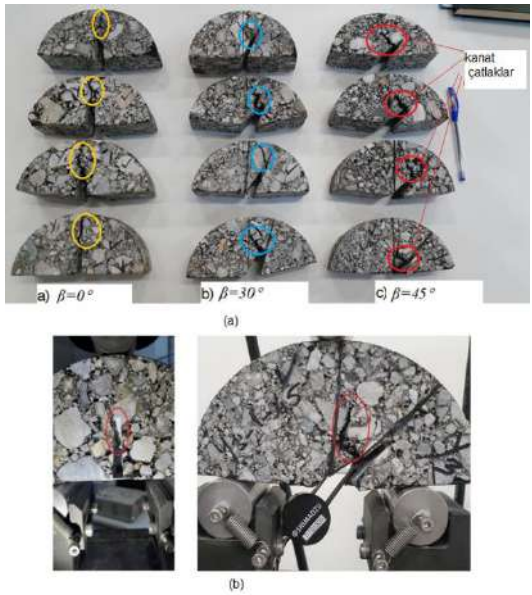
Dolaylı olarak indüklenen çekme yüklemesi ile oluşan çekme-kesme (karma mod I-II) gerilme koşulları, doğrudan çekme yüklemesi ile oluşan karma mod koşullarından oldukça farklıdır. Çapsal basma yükü ile oluşan dolaylı çekme çatlakları, çapsal basınç gerilme ekseni yönünde başlar ve bu yöne bağlı olarak 'kanat' çatlaklarının oluşması yönünde ilerler (Al-Sheayea, 2005; Li ve

Maresteanu, 2004; Ling vd., 2019). Mod I (çekme) ve karma mod I-II yükleme koşulları, çatlak eğim açısının (β) indüklenmiş çekme yükleme eksenine göre 0° ile 90° arasında açılarla SCB numunesi konumlandırılarak elde edilir. Bir SCB numunesi farklı β açılarıyla yüklenirse, mod I-II gerilme bölgesi çatlak eksenine etrafında yer değiştirir ve yeni çatlaklar bu bölgede başlarlar. Kırılma tokluğu test sonuçları ve SCB geometri detayları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. SCB tokluk deney sonuçları ve SCB geometri özellikleri

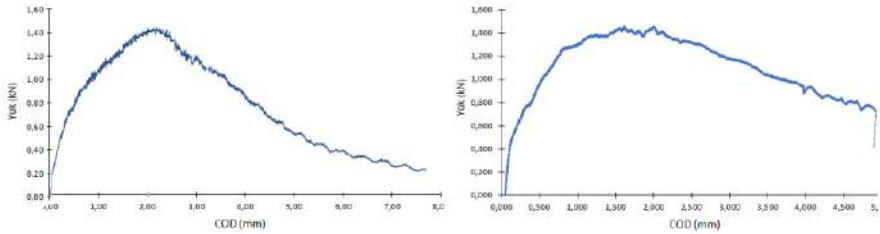
Çatlak eğim açısı, β (dört test ort.)	D (mm)	B (mm)	a (mm)	(P) (kN)	K_{IC} $MPa\sqrt{m}$	K_{IIC} $MPa\sqrt{m}$
	ACB					
0°	150	51	36	1.45	0.45	-
30°	151	50	37	1.57	0.43	0.17
45°	150	50	37	1.63	0.35	0.19

Test edilen SCB numuneleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Test edilen numuneler incelendiğinde, çatlak başlama açısının (θ), β açısına bağlı olduğu gözlenmiştir. Mod I ve karma mod I-II kırılma testlerinin deneysel bulguları, β=0° ve β=30° açıları arasında eğimli çentik çatlaklarda yeni çatlakların çatlak ucu etrafında başladığını göstermiştir. Çünkü çentik çatlak ucu, çekme gerilmesi konsantrasyonunun en yüksek olduğu bölgedir. Mod I yüklemesinin gerçekleştiği β=0° eğim açısına sahip numunelerde ise, yeni oluşan çatlakların dolaylı çekme gerilmesine dik yönde yayılma eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 6). En önemli diğer bulgulardan biri ise, indüklenen gerilme kaynaklı yeni çatlak başlama yerinin, β= 45° eğimli çentik çatlağın merkezine doğru kaydığı saptanmıştır (Şekil 6). Elde edilen bu sonuç, kırılma mekaniği prensipleri ve 'kanat' çatlak oluşumu konseptiyle oldukça uyumludur. Çünkü, β=30° ve β=45° eğimli çentik çatlakları ile yapılan deneylerde, çatak yayılma yönü çatlak ekseninden uzaklaşır ve çapsal basma yükleme eksenine doğru ilerlemek için kavisli bir yol boyunca büyür. Bu gerilme kaynaklı oluşan kavisli çatlaklara, kırılma mekaniğinde "kanat çatlakları" denir (Evans ve Hesp 2011; Saha ve Biligiri, 2015) (Şekil 6). Bu araştırmada yapılan deneylerde gözlemlenen kanat çatlağı prensipi, kırılma mekaniğinde en tipik çatlak yayılma biçimidir. Böylece, kırılma mekaniği ilkelerinin AC örnekleri kullanılarak yapılan araştırmalarda kullanılabilirliği ve doğruluğu bir bakıma bu çalışma ile gösterilmiştir.



Şekil 6. (a) Test edilmiş numunelerden bazıları (b) CMOD ve deney düzeneği

Yük-COD eğrilerinden bazıları Şekil 7'de verilmiştir. Test edilen tüm numunelerde düktil davranış gösteren benzer yük-COD grafikleri elde edilmiştir. Yük-COD eğrilerinde görüldüğü gibi ACB numunelerinde, literatürde görülen tipik elastoplastik deformasyon davranışı tespit edilmiştir. Bu grafiklerde, yenilme öncesi gerinim sertleşmesi/güçlenmesi (strain hardening) ve yenilme sonrası gerinim yumuşaması (strain softenin) davranışları görülmektedir. Bunun nedenleri ileriki bölümlerde tartışılmıştır.



Şekil 7. Yük-COD eğrileri

Kırılma mekaniği ilkelerinde, çatlak ucunun önünde depolanan enerji, kırılma için gereken yüzey enerjisini aştığında, yeni çatlak oluşumu ve ardından kararlı çatlak büyümesi meydana gelir (Romero vd., 1999, Song vd., 2008). Yenilmeye

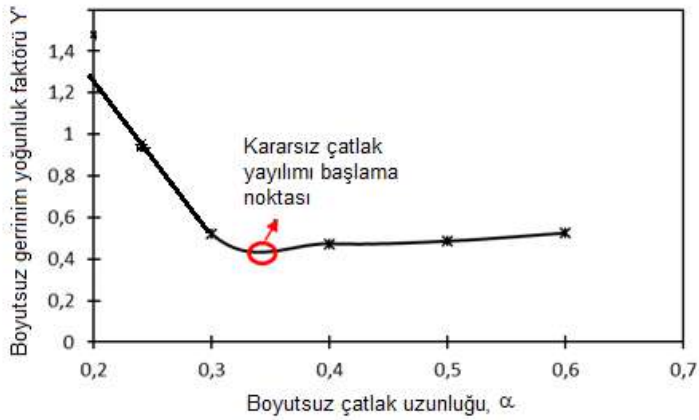
neden olan bu makro çatlakların başladığı nokta, kırılmaya karşı malzeme direnç değeri olarak tanımlanan kırılma tokluğunu (KIC) ve FPZ çevresinde kararsız çatlak yayılımının başladığını gösterir. Bununla birlikte, bir çatlağın FPZ'de kararsız olarak yayılmaya başladığı çatlak uzunluğunu belirlemek kolay değildir. Bu özellikle AC gibi elastoplastik malzemelerde oldukça zordur. Çapsal basma gerilmesi ile yüklenen SCB numunesindeki 2a uzunluğunda bir chevron çatlak için, boyutsuz gerilme-yoğunluk faktörü (NI) hesaplanabilir bir parametredir (Atkinson vd.,1982, Li ve Guo 20019, Si vd., 2002). NI, boyutsuz çatlak uzunluğunun (α=a/R) bir fonksiyonudur. 'Düz çatlak varsayımı kriteri (STCA)' kullanılarak, çapsal basma altında SCB numunesi içindeki çentik çatlağı için gerilme yoğunluk faktörünü (KI), Eş.2 ile hesaplanır. Atkinson v.d., (1982) tarafından α=0.1-0.6 aralığındaki çatlaklar için boyutsuz gerinim yoğunluk faktörünün (YI') sayısal değerlerinin bulunması için Eş. 3 ve Eş. 4'te verilen eşitlikler önerilmiştir:

$$K_{I=} = \frac{P}{(\pi R)^{1/2} B} \alpha^{1/2} N_I(\alpha) \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0}\right)^{1/2} \qquad \text{Eş. 2}$$

$$N_I = 0.991 + 0.141\alpha + 0.863\alpha^2 + 0.886\alpha^3 \qquad \text{Eş. 3}$$

$$Y = \alpha^{1/2} N_{1(\alpha)} \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0}\right)^{1/2} \qquad \text{Eş. 4}$$

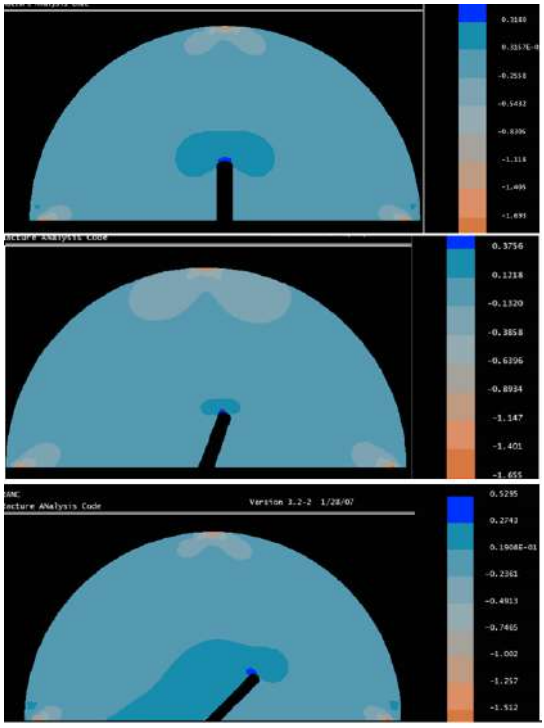
P, R ve B sırasıyla; kırılma yükü, numune yarıçapı ve numune kalınlığı iken; α_1=a_1/R ve α_0=a_0/R. a_0 ve a_1 parametreleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Eş.2'nin uygulanabilmesi için kritik çatlak uzunluğu a'nın, a_0<a<a_1 değerleri arasında olması gerekmektedir. Bu çalışmada, kararsız çatlak yayılımının başlangıç noktası anlamına gelen kritik çatlak uzunluğu a'nın, a_0 ile a_1 arasında olup olmadığı analitik ve sayısal analizler ile araştırılmıştır. Gerilme yoğunluğu katsayısı (Y') grafiği ve boyutsuz çatlak uzunluğu grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Kararsız/kritik çatlak yayılımı, boyutsuz gerilim yoğunluğu faktörünün minimum olduğu yerdir ve analitik analizlerde Y_{min}*= 0,47'ye eşit olduğunda, ACB'nin ilgili kırılma tokluğu değerinin 0,45 MPa√m olduğunu gösterir. Bu noktada, α=0.34 olup çatlak uzunluğu ise α=a/R bağıntısıyla 2,5 mm olarak bulunur. Böylece, kararsız çatlak yayılmasının başladığı nokta, a_0 ile a_1 arasında olduğu ve kritik çatlak uzunluğu belirlenmiştir. Bu durum, iç çentik çatlağının önünde gelişen FPZ nedeniyle SCB numunesindeki iç çentik çatlağının ucunda kararsız çatlak yayılımının başladığı anlamına gelir.



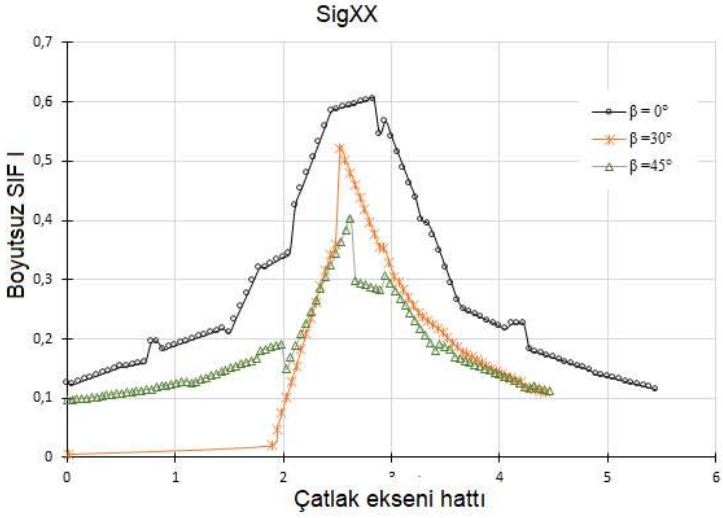
Şekil 8. SCB numunelerinde boyutsuz gerilim yoğunluğu katsayısı ve çatlak uzunluğu ilişkisi

3.2 Sayısal Analiz Sonuçları

İlk sayısal analizler, çatlak analizlerinden önce SCB numunesindeki çentik çatlakları etrafındaki gerilme dağılımının incelenmesi için yapıldı (Şekil 9). Genel olarak, yüksek çekme gerilimi konsantrasyonu bölgesinin, artan β ile çentik çatlağının merkezine doğru yer değiştirdiği bulundu. FRANC2D ileri işlem menüsü seçeneklerinden 'çizgisel sonuç' seçeneği ile grafiksel bir karşılaştırma olanağı yaratılarak elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Hem Şekil 9'daki renkli kontur gösteriminde hem de Şekil 10'daki grafik gösterimde görüldüğü gibi, maksimum çekme gerilimi β = 0° simülasyonları ile elde edilmiştir. Modellenen çatlağın mod I durumunda elde edilen maksimum SIF değerine benzer şekilde, maksimum SIF değerine yakın değerler karma mod I-II durumunda da (β = 30° ve β = 45°) elde edildi (Şek.9, Şek.10). Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarına göre, β = 30° olduğunda hem çekme hem de kesme gerilmelerinin en yüksek değere sahip olup karma modlu kırılmanın elde edildiği sonucuna varılır. Elde edilen bulgularla, mod I için önerilen ASTM standardının AC malzemelerinin mod II kesme ve karma mod I-II mukavemetinin hesaplanmasında da kullanılabilirliği gösterilmiştir.

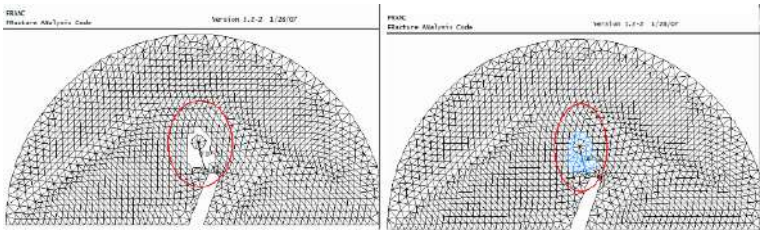


Şekil 9. SCB numunelerinde gelişen gerilme dağılımlarının FRANC2D sayısal analiz programı ile modellenmesi

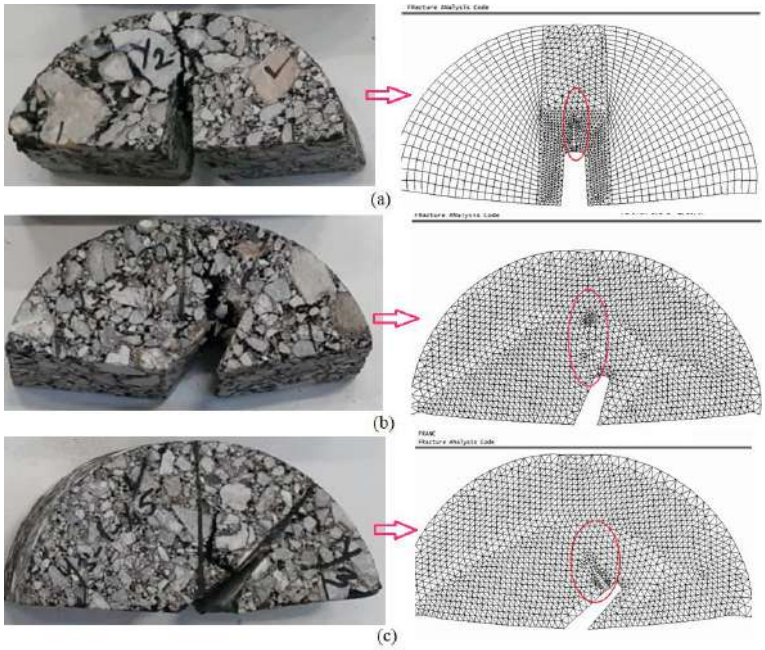


Şekil 10. Çentik çatlak ekseni boyunca boyutsuz SIF değerleri

FRANC2D ile yapılan gerilme analizlerinden sonra çentik çatlak eğim açılarına bağlı olarak ACB numunelerinin kırılma davranışını analiz etmek için çatlak analizleri yapıldı. FRANC2D programını diğer sayısal analiz programlarından ayıran en önemli özellik, her çatlak ilerleme adımında, çatlak ucunu çevreleyen ağ elemanlarının silinmesi ve oluşturulan çatlağı mevcut ağa bağlamak için ağın otomatik olarak yeniden oluşturulmasıdır (Şekil 11). SCB numunelerinde çentik çatlağının ucundaki FPZ'nin etkisi, heterojen ve elasto-plastik olan kompozit malzemeler için çok daha belirgindir. Bu nedenle, Kritik Çatlak Eşiği (CCT) analitik analizlerinde kritik SIF değerlerini bulmak için gerilme analizlerinde lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) modellemesi kullanılırken, kohezif çatlak analizi için elastik olmayan LEFM (NEFM) modellemesi yapılmıştır. Bu tip çatlak ilerleme davranışı 'kohezyonlu kırılma modeli' olarak tanımlanır (Dugdale, 1960; Barenblatt, 1962). Kırılma mekaniği alanında kohesif çatlak yaklaşımlarından biri olan Genelleştirilmiş Dugdale Modeli (GDM) (kohezif çatlak modeli olarak adlandırılır), sayısal analizlerde kohezif kırılmayı modellemek için kullanılır (Dugdale, 1960; Hillaborg vd., 1976, Petersson, 1981). FRANC2D'de var olan NEFM dinamik gevşeme analitik çözümü, GDM analizlerinde kullanılabilir olma özelliği ile programı kullanışlı ve sonuçların doğruluğunu yüksek düzeyde verir. FRANC2D ile yapılan NEFM sayısal modellemelerinde FPZ bölgesinin etkisini, doğrusal olmayan arayüz elemanlarına sahip kohezif çatlak analizleri kullanılmıştır. FRANC2D ile yapılan sayısal çatlak modelleme sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. Daha önceki bölümde deneysel sonuçlarda verildiği gibi, başlangıç çatlak açısı, θ'nın çatlak eğim açısı β'ya oldukça bağlı olduğu sayısal analiz sonuçlarıyla da elde edilmiştir. Ayrıca, çatlak ilerleme yönü, yükleme yönüne paralel bulunmuş ve deneysel bulgular ile sayısal analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 12'de verilen deneysel ve sayısal çatlak analizleri karşılaştırıldığında, çekme gerilmesi yoğunlaşma bölgesinin artan β açıları ile çatlak merkezine doğru yer değiştirmesinden dolayı çatlak başlama yeri çevron çatlağın merkezine doğru kaydığı gözlenmiştir. Bu çalışma ile, AC gibi elastoplastik malzemelerle elde edilen kırılma deneylerinin sonuçları ile sayısal çatlak analiz sonuçları arasında literatürde ilk kez bu kadar uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 12).



Şekil 11. FRANC2D ile çatlak ucundaki ağ elemanlarının silinmesi ve yeniden ağ örülmesi



Şekil 12. FRANC2D ile çatlak modellenmesi ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

4. Sonuçlar ve Tartışma

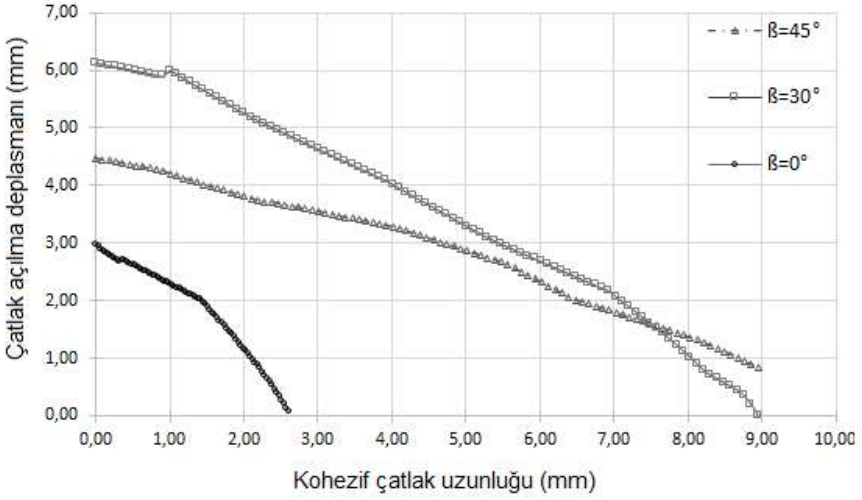
Asfalt kaplamalarda meydana gelen kusurlar; deformasyonlar, matris-mineral ayrışmaları ve çatlaklar olmak üzere üç grupta özetlenmektedir. Literatürde deformasyonlar ve ayrışmalar ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır (Zang vd., 2014; Si vd. 2002; Li ve Maresteamu 2004; Ling vd., 2020; Aliha vd., 2015; Aliha vd.,2020; Mirsayar 2017). Bununla birlikte, literatürde asfalt kompozitlerde çatlaklanma ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır ve genellikle düşük sıcaklıklardaki gevrek asfalt kırılma koşulları içindir (Zang vd., 2014; Li ve Maresteamu 2004; Ling vd., 2020. Ancak kırılma mekaniği prensiplerine göre, elastik ve elasto-plastik malzemelerde mikro çatlaklar ve önceden var olan

yapısal kusurlar nedeniyle makro kırıklar ve deformasyonlar meydana gelir (Kim ve Hussein, 1997; Saha ve Biligiri, 2015). Bu çatlaklar gerilme yoğunlaştırıcı gibi etkileri olduğundan ve malzemenin kırılma direnci üzerinde temel bir etkiye sahip olduğundan dolayı makro ölçekli deformasyonlara sebep olurlar. Asfalt kompozitler tük taşıma kapasitesi ve yüzey dayanımları açısından tanımlanan ve sınıflanan üstyapı malzemelerinin işlevselliği, bu çatlak/kırılma özelliklerine oldukça bağlı olduğu açıktır. Asfalt, agregalar ve asfalt beton karışımları için özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası, gradasyon, özgül ağırlık, birim ağırlık, boşluk yüzdesi ve Los Angeles aşınma testi, su emme, yoğunluk, boşluk yüzdesi gibi birçok rutin testler vardır. Tüm bu testlerin yürütülmesinde ve yorumlanmasında birçok belirsizlik olmasına rağmen, bu testler ve yolların servis ömrü bir mühendisin sahip olabileceği en iyi rehberdir. Bu araştırma, ile özellikle bu testlerin amacı olan durabilite ve duraylılık mekanizmalarının temelinde yatan çatlak mekaniği prensiplerini ve bu alanda en önemli konulardan biri olan kırılma tokluğu parametresi ile asfalt araştırmalarındaki kritik çatlak oluşumları ve gerinim sertleşmesi konusu arasındaki ilişkinin araştırılması amaçlanmıştır. Fakat, sadece mod I (çekme) kırılma tokluğunun belirlenmesi için önerilen ASTM ve AASTO standartları dışında, karma mod I-II ve kesme mod II kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi için şu an var olan bir test yöntemi yoktur. Bu nedenle bu araştırmada ASTM tarafından önerilen ASTM D8044 standart testinin karma mod ve mod II kırılma dayanımı değerlerinin belirlenmesi için kullanılabilirliği hem deneysel hem de analitik ve sayısal analizlerle incelenmiştir.

Kararsız çatlak başlama (SCI) noktası ve kritik çatlak uzunluğu kırılma mekaniği Kritik Çatlak Eşiği (CCT) analitik çözümlemesine dayalı olarak 2,5 mm olarak bulunduğu daha önceki kısımlarda Şekil 8'de verildi. Analitik analizle elde edilen 2.5 mm kritik çatlak uzunluğ değeri, deneysel olarak elde edilen ve Şekil 7'de verilen yük-COD eğrilerinde yenilmenin gerçekleştiği 2-2.5mm COD değeri ile oldukça uyumlu sonuçlardır. Dolaysıyla elde edilen bu kritik çatlak uzunluğu değeri, literatürde *'Alt-kritik'* (sub-critical) çatlaklar olarak adlandırılan kararlı çatlakların, 2-2.5mm COD değerine kadar duraylı olarak ilerleyecekleri ve kararsız çatlak ilerlemesini yani yenilmeyi başlatmak için bir araya gelecekleri anlamına gelir. Yük-COD grafiklerinin ve CCT analiz sonuçlarının uyumluluğu, AC araştırmalarında kırılma mekaniği alanının ne kadar gerekli olduğunu açıkça göstermektedir.

İleri kohezif çatlak analizleri ile her bir β açısı için, çatlak açıklığı ve kohezif çatlak uzunluğu arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 13'te verilmiştir. Sayısal analiz sonuçları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Kohezif çatlak ilerlemesi aynı zamanda oluşan FPZ bölgesinin boyutları

hakkında bilgi verir ve en uzun kohezif çatlak uzunluğu 8-9 mm arasında β=30° ve 45° eğimli çatlaklarla elde edilmiştir (Şekil 13). 30° ve 45° eğim açılarıyla modellenen çatlaklar beklendiği gibi karma mod I-II kırılmasına yol açtığı ve bu açılarla yapılan deneylerde malzemenin kırılmasında hem çekme hem de kesme gerilmelerinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, mod I kırılma modu (β=0°) sonuçlarına göre kohezif çatlak uzunluğu 2-3mm olarak bulunmuş ve bu sonuca göre FPZ bölgesi beklendiği gibi açılma modunda bir kırılmada en küçük boyutta olacaktır (Şekil 13).



Şekil 13. Farklı β değerleri ile yapılan FRANC2D kohezif çatlak analizi

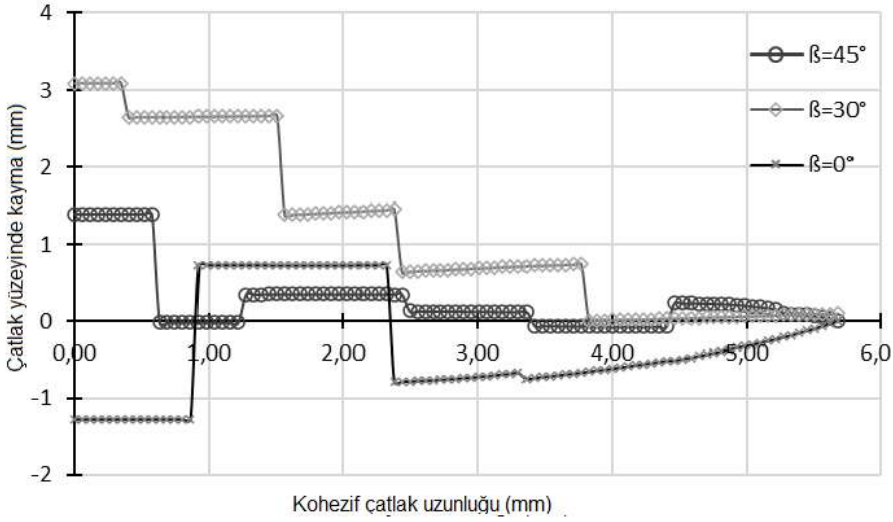
Bu çalışmanın ana amaçlarından biri ACB malzemelerin kırılma özelliklerinin belirlenmesi ve ACB araştırmaları için kırılma mekaniği ilkelerinden yararlanarak mod I için önerilen ASTM D8044 standardının karma mod I-II testleri için kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. SCB numuneleri üzerinde yapılan statik çapsal basma (indirekt/dolaylı çekme) testleri sonucunda elde edilen deneysel bulgulara göre, çentikli çatlakların 45° çatlak eğim açısına (β) kadar açıldığı tespit edilmiştir. ACB numunelerinin mod I kırılma tokluğu (KIC) değeri 0.45 MPa√m bulunmuştur. Öte yandan, β= 30° için mod II kırılma tokluğu (KIIC) değeri 0.18 MPa√m ve β=45° için mod II değeri ise 0,19 MPa√m olarak bulunmuştur.

Bu araştırmada, gerilme dağılımı ve çatlak yayılma sayısal analizleri kırılma mekaniği programı FRANC2D kullanılarak yapıldı ve bu çalışma ile programın kırılgan malzemeler yanında elasto-plastik malzemeler için de oldukça uygun

olduğu anlaşılmıştır. Sayısal analizlerde gerilme analizlerinden sonra yapılan çatlak analizleri ile çatlak eğim açısı (β) değerleri ile çatlak yayılma yönünün çapsal yükleme yönüne paralel olduğu ve '*kanat çatlak'* oluşumlarının hem deneysel hem de sayısal analizlerle tespit edilmesi literatürde ilk kez bu çalışma ile elde edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal analizlerde, yüksek çekme gerilmesi bölgesinin, artan β değerleri ile çentikli çatlağın merkezine doğru kaydığı gözlenmiştir. Böylece simülasyonlarda β arttığında çatlak başlangıç bölgesinin, çentikli çatlağın merkezine daha yakın bir bölgede olacağı anlaşılır. Bu bulgu hem deneysel hem de sayısal analizlerle doğrulanmıştır.

Kırılma mekaniğinde kararsız/kritik çatlak yayılımının başlangıcı, boyutsuz gerilim yoğunluğu faktörünün minimum olduğu yerdir ve bu çalışmada analitik analizlerde Y_{min}*= 0,47'ye eşit olduğunda, ACB'nin mod I kırılma tokluğu değerinin 0,45 MPa√m olduğu gösterilmiştir. Y_{min}*= 0,47'ye eşit olduğunda ise kritik çatlak uzunluğunun 2,5 mm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca analizlerde, kararsız çatlak yayılmasının başladığı noktanın, a_0 ile a_1 arasında olduğu da tespit edilmiştir. Bu durum, iç çentik çatlağının önünde gelişen FPZ nedeniyle SCB numunesindeki iç çentik çatlağının ucunda kararsız çatlak yayılımının başladığı anlamına gelir. Elde edilen bu sonuç, LEFM prensiplerine göre kırılma mekaniği hipotezleri ile oldukça uyumludur.

Karma mod I-II kohezif çatlak uzunluğu ve çatlak yüzeylerinde kayma miktarı ilişkisi, farklı β değerleri için tespit edilmiş ve grafiksel olarak Şekil 14'te gösterilmiştir. Şekil 14'te verilen grafiğin adımlı grafik şeklinde olmasının nedeni, her bir çatlak ilerleme adımının sayısal analizlerde otomatik değil ayrı ayrı yapılmasından kaynaklanmaktadır. Her kohezyonlu çatlak ilerlemesi adımında çatlak yüzleri arasındaki kayma büyüklüğü, FRANC2D programının 'post-process' seçeneği ile elde edilmiştir. Bu grafiğe göre, ilerleyen çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. Daha önce gerilme analizlerinde de gösterildiği gibi, en yüksek kesme gerilmesi yine 30° eğimli çatlak ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışma, ASTM tarafından sadece mod I için önerilen ASTM8044 test standardı geliştirilerek, AC malzemelerin karışık mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol gösterici olabilir.



Şekil 14. Farklı β değerleri ile kohezif çatlak uzunluğu ve çatlak yüzeylerinde kayma miktarı ilişkisi

Teşekkür

Yazar, bu araştırmada numune temininde yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Karayolları 2.Bölge Müdürlüğü-İzmir ve Ar-Ge Başmühendisi Kanat Uğur Aydın Bey'e ve deneyler sırasında yardımcı olan İzmir Demokrasi Üniversitesi Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Kartal'a teşekkürlerini sunar.

5. Kaynaklar

1. AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures, 4th ed.; American Association of State Highway and Transportation Officials,Washington, DC, USA, 1993; pp. 1–640.
2. Aliha, M.R.M., Fazaeli, H., Aghajani, S., Nejad, F.M. (2015) Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials, 95,* 545–555
3. Aliha, M.R.M., Pour, P.J.H. (2020). Fracture resistance study for hot mix asphalt mixture under out of plane sliding mode. *Engineering Fracture Mechanics, 238,* 107230.
4. Al-Shayea N.N. (2005) Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I–II fracture. *Engineering Geology, 81(1),* 84-97
5. ASTM D8044 (2016). Standard Test Method For Evaluation Of Asphalt Mixture Cracking Resistance Using The Semi-Circular Bend Test (SCB) At Intermediate Temperatures.
6. Atkinson, C., Smelser, R., Sanchez, J. (1982). Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *International Journal of Fracture*, *18,* 279–291.
7. Ayetollahi, M.R. and Pirmohammad, S. (2013). Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes. *Structural Engineering Mechanics,* **45(1)**:19-32
8. Barenblatt G.I., (1962). The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Advances in Applied Mechanics* 7 55–129.
9. Dugdale D.S., (1960). Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 8 100–104.
10. Erdogan, F., Sih, G.C. (1963). On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, *ASME Journal of Basic Engineering*, *10,* 25–37
11. Evans, M., Hesp, S.A.M. (2011). Physical hardening effects on stress relaxation in asphalt cements and implications for pavement performance. *Transportation Research Records,* **2207,** 34-42.
12. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by m eans of fracture mechanics and finite elements," *Cement and Concrete Research*, 6 ,773-782.
13. Im, S., Ban, H., Kim, Y.R. (2014). Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry. *Construction and Building Materials, 52,* 413-421.

14. Kim M, Hussein H., (1987). Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures. *Construction and Building Materials, 11* (7-8), 403-411.
15. Kuruppu, M., Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P., Funatsu, T. (2014). ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen. *Rock Mechanics Rock Engineering, 47,* 267–274.
16. Li, C., Guo, J., (2019). Cracking simulation of asphalt concrete beam specimen using cohesive zone model. *Construction and Building Materials*, *214,* 49-60.
17. Li, X., Marasteanu, M.O., (2004). Evaluation of the Low Temperature Fracture Resistance of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Test, *Journal of Asphalt Pavement Technology, 73,* 401-426.
18. Ling, M., Zhang, Y., Kaseer, F., Martin, A.E., Lytton, R., (2020). Investigation of fracture behavior of asphalt mixture composite using energy-based approach. *Composites Part B: Engineering,* **181**, 107324
19. Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Hu, S., Lytton, R., 2019. A calibrated mechanics-based model for top-down cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, **48**, 102-112.
20. Marasteanu, M.O., Dai, S., Labuz, J.F., Li, X., (2002). Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Board***,** *1789,* 191–199
21. Mirsayar, M.M., Shi, X., Zollinger, D.G., (2017). Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen. *Engineering Solid Mechanics*, *65,* 293–306
22. NRC, (2004). Guide for mechanistic – empirical design of new and rehabilitated pavement structures. NCHRP 1-37A Final report. *Transportation Research Board.*
23. Petersson, P.E., (1981). Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, Report TVBM -1006/1-174, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden
24. Romero, P., Youtcheff, J., Stuart, K., (1999). Low-temperature physical hardening of hot-mix asphalt. *Transportation Research, 1661,* 22-26.
25. Saha, G., Biligiri, K.P., (2015). Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach. *Engineering Fracture Mechanics, 142,* 154-169.

26. Shenoy, A., (2002). Stress relaxation can perturb and prevent physical hardening in a constrained binder at low temperature. *Road Materials and Pavement Design, 3,* 87-94.
27. Si, Z., Little, D.N., Lytton, R., (2002). Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *14 (6),* 461-470.
28. Song, S.H., Wagnoner, M.P., Pagulino, W., Buttlar, G., (2008). Crack opening displacement parameter in cohesive zone models: experiments and simulations in asphalt concrete
Fatigue. *Fracture of Engineering Materials Structure*, *31 (10),* 850-856.
29. Sulaiman, S.J., Stock, A.F (1995). The use of fracture mechanics for the evaluation of asphalt mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 64,* 500-531
30. Wagnoner, M.P., Buttlar, W., Paulino, G.H., (2005). Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental Mechanics, 45(3),* 270-277.
31. Wang, H., Wang, J., Chen, J.Q., (2014). Micromechanical Analysis of Asphalt Mixture Fracture with Adhesive and Cohesive Failure. *Engineering Fracture Mechanics, 132,* 104–119.
32. Yin, A., Yang, X., Zeng, G., Gao, H., (2015). Experimental and numerical investigation of fracture behavior of asphalt mixture under direct shear loading. *Construction and Building Materials, 86,*21–32.
33. Zhang, Y., Luo, Z., Luo, R., Lytton, R., (2014). Crack initiation in asphalt mixtures under external compressive loads. *Construction and Building Materials, 72,* 94-103.

POLİMERLERİN LAZER İLETİM KAYNAĞI: KAYNAK PARAMETRELERİ, KAYNAK KALİTESİ VE UYGULAMALAR ÜZERİNE ARAŞTIRMA

Dr. Öğretim Üyesi Nilay Küçükdoğan Öztürk

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, H. F. T. Teknoloji Fakültesi,
Mekatronik Mühendisliği Bölümü
https://orcid.org/0000-0003-4375-0752

Polimerlerin lazer kaynakla birleştirilme prosesi gelişmiş teknolojinin bir ürünüdür. Diğer geleneksel kaynak yöntemlerine nazaran hızla artan bir ilgiye sahiptir. Bu ilginin sebebi ise sahip olduğu avantajlardır. Polimer malzemelerin sahip oldukları termal ve mekanik özellikleri düşünüldüğünde diğer malzemelere oranla dayanımları daha düşük olduğu aşikardır. Lazer kaynak yönteminde istenilen ısı değerlerine ulaşılması mekanik dayanımı etkilemeden ve iş parçası geometrisinin korunmasının yanı sıra arzu edilen görsellikte birleştirmeyi gerçekleştirmektedir. Polimer iş parçaları için lazer kaynak ile birleştirme oldukça esnek bir üretim yöntemidir. Küçük ölçekli geometrilere sahip iş parçalarından karmaşık yapıda iş parçalarına kadar seri üretim için uygun aynı zamanda gelişmekte olan bir teknolojiye sahiptir.

Bu bölümde öncelikle polimer malzemelerin yapısı, çeşitleri, lazer kaynak için kritik olan termal ve optik özelliklerinden bahsedilecek, sonrasında önemli kaynak parametreleri ve kaynak kalitesi ele alınıp son yıllarda yapılan uygulamalara yer verilecektir.

1. Polimerlerin karakteristik özellikleri

Lazer kaynak teknolojisinde polimer malzemelerin birleştirilmesinde malzeme karakteristikleri oldukça önemlidir.

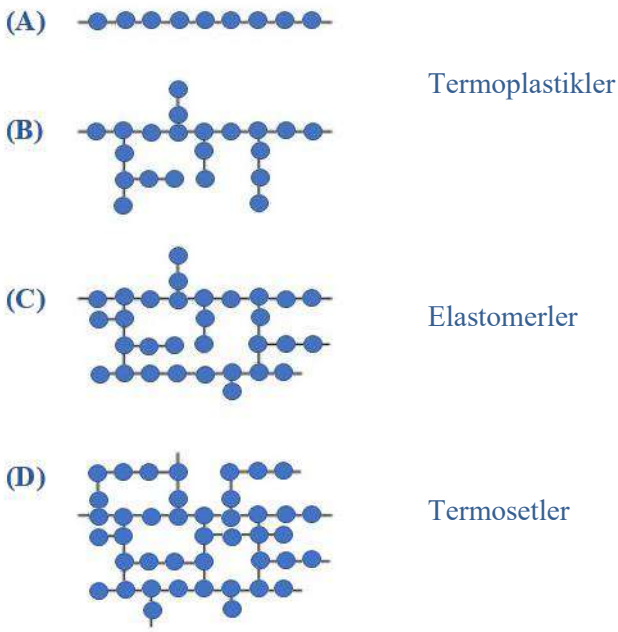
1.1 Polimer yapıları ve çeşitleri

Polimerler (veya plastikler) çok sayıda küçük monomer biriminden oluşan makro-moleküllerdir. Monomer yapıları ise karbon ve hidrojen atomları bazlı yapılardır. Ayrıca bu yapıda kükürt, azot, flor gibi elementlerde yer alabilmektedir. Bu farklı elementlerin molekülde yer alması çeşitli polimer malzemelerin üretilmesine olanak vermektedir. Tablo 1 de yaygın olarak karşımıza çıkan polimerlere ve zincir bağ yapılarına yer verilmiştir (Magomedov, 2011).

Tablo 1 Yaygın kullanımda olan polimerler ve monomerleri (Nicholson, 2017)

Monomer		**Polimer**	
Etilen	$CH_2=CH_2$	Polietilen (PE)	$-[CH_2=CH_2]_n-$
Propilen	$CH=CH_2$ $\vert$ CH_3	Polipropilen (PP)	$-[CH=CH_2]_n-$ $\vert$ CH_3
Tetrafloretilen	$CF_2=CF_2$	Politetrafloretilen (PTFE)	$-[CF_2=CF_2]_n-$

Polimer malzemeler sıklıkla termoplastik, termoset ve elastomer olmak üzere 3 temel grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma zincir yapıları göz önüne alırken aynı zamanda çapraz bağlanma derecesini temel almaktadır. Şekil 1'de lineer yapı (A), yan zincirler (B) ve çapraz bağlı makromoleküller (C-D) ile gösterilmektedir (Klein, 2012).



Şekil 1 (A ve B) zincir yapıları termoplastik çeşitlerini, (C) zayıf çapraz bağlar elastomerleri, (D) güçlü çapraz bağlar termosetleri sınıflandırmakta (Klein, 2012'den adapte edilmiştir.)

Polimer karışımları, kopolimerler ve kompozit malzemeler gibi bileşikler birkaç temel malzemeden oluşur. Bu bileşim, fiziksel bir temelde (örneğin, polimer karışımları veya kompozit malzemeler) veya kimyasal bir temelde (kopolimerler) yapılabilir.

1.2 Termal özellikler

Polimerlerin lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde termal özellikler önemli rol oynamaktadır. Polimerlere ait termal bozunma süreci, camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklık aralığı bu kaynak yönteminde göz önünde bulundurulması gereken önemli etmenlerdendir. Bununla birlikte, ısı iletimine bağlı spesifik ısı kapasitesi, termal iletkenlik gibi özellikler kaynaklanabilirliği etkilemektedir.

Isıl yumuşar olarak tanımlanan termoplastik malzemelerin lazer kaynakla birleştirilmesinde termal malzeme özellikleri göz önüne alınarak proses gerçekleştirilmelidir.

Tablo 2 Çeşitli termoplastik malzemeler için faz geçiş sıcaklıkları

Amorf termoplastikler	**PMMA**	**PS**	**PC**	**PVC**
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	104	97	145	80
Akış sıcaklığı (°C)	180	160	240	175
Dekompozisyon sıcaklığı (°C)	225-257	315-350	325	250
Yarı kristalin termoplastikler	**HDPE**	**PP**	**PA6**	**PTFE**
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	-95	-18	40	-20
Kristalit ergime sıcaklığı (°C)	130-146	160-205	220	325
Dekompozisyon sıcaklığı (°C)	355-400	335-365	325	425-510

Termoplastiklerin termal özelliklerini kristal yapı ve zincir sayısı, dağılımı, yönü ve uzunluğu etkilemektedir. Termoplastik malzemelerde termal bozunma aşaması camsı geçiş sıcaklığından kristalitlerin erime sıcaklığına ulaşarak kendini göstermektedir. Isıl enerji emilimi ve taşınımı ile ilgili malzeme davranışını karakterize eden özgül hacim, ısı kapasitesi, ısı iletimi veya ısı iletimi gibi fiziksel özellikler, kısmen malzeme sıcaklığın üzerine belirgin bir bağımlılık göstermektedir. Termoplastik reçinelerin fiziksel ve kimyasal yapısına bağlı olarak artan malzeme sıcaklığında aşağıdaki faz geçişleri meydana gelecektir. Tablo 2 de çeşitli termoplastikler için camsı geçiş sıcaklığı, akış sıcaklığı, kristalit erime sıcaklığı ve dekompozisyon sıcaklıkları kıyaslama yapılabilmesi için gösterilmektedir (Klein, 2012; Magomedov, 2011; Nicholson, 2017).

1.3 Optik özellikler

Lazer kaynak uygulamalarında termoplastik malzemelerin termal özellikleri kadar önem taşıyan bir diğer özellik optik özellikleridir. Lazer uygulanması sırasında mevcut radyasyonun ham halde bulunan termoplastikler ile etkileşimi malzemenin optik özelliklerinin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Termoplastiklerin elektromanyetik radyasyonla etkileşimi sırasında makromolekül zincir yapısı ve zincirler arasındaki bağlar etkilenmektedir. Lazer kaynak uygulamasında radyasyonun dalga boyuyla da ilişkili olarak bağlı elektronlar (orbitaller) veya molekül plakaları ile yapılması mümkün olabilmektedir. Ancak termoplastiklerin sahip oldukları karmaşık moleküler yapı sebebiyle optik özelliklerinin teorik olarak ortaya konabilmesi yaklaşık olarak mümkündür. Malzemeye ait yansıma, iletim ve saçılma verilerinin elde edilmesi

sonrasında absorpsiyon özelliği hesaplanabilmektedir (Geiger, Frick, & Schmidt, 2009; Grewell, Rooney, & Kagan, 2004; Klein, 2012).

2. Polimerlerin lazer iletim kaynağında önemli kaynak parametreleri

Laser iletim kaynağında lazer yoğunluğuna bağlı olarak polimer malzemeye lazerin etki süresi değişmektedir. Isı ve difüzyon lazer-polimer etkileşimini etkileyen ana parametreleri oluşturmaktadır. Lazer güç yoğunluğu (Y_G), lazer gücünün (G) ve ışın çapının (D) bir fonksiyonudur (Denklem 1).

$$Y_G = \frac{4G}{\pi D^2} \quad (1)$$

Lazer ile polimer arasındaki etkileşim süresi (S) ise kaynak hızının (v) ve kaynak uzunluğunu (l) bir fonksiyonudur (Denklem 2).

$$S = \frac{l}{v} \quad (2)$$

Lazer güç yoğunluğu ve lazer enerji yoğunluğunun (Y_E) lazer-polimer etkileşim süresi ise (Denklem 3) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$Y_E = Y_G \times S \quad (3)$$

Denklem 1-3 tekrar düzenlenirse ise aşağıdaki yeni denklem elde edilmektedir (Denklem 4).

$$Y_E = \frac{4G}{\pi D^2 v} \quad (4)$$

Lazer- polimer etkileşimini yönetmek için sıcaklıktan bağımsız olarak lazer gücü, kaynak hızı ve ışın çapı ayarlanabilen önemli parametrelerdir. Kaynağın birim uzunluk başına enerji girişinin, gücün kaynak hızına oranı ise bir birim lazer nokta alanını tanımlamaktadır (Denklem 5).

$$L_E = \frac{Y_G}{v} \quad (5)$$

L_E burada hat (line) enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Denklemden de anlaşılacağı gibi güç yoğunluğu ve kaynak hızı ile kontrol edilebilir hale gelmektedir.

Tüm kaynak işlemlerinde olduğu gibi lazer iletim kaynağında da birleştirme işlemi yapılacak iş parçalarının doğru konumlandırılması ve kaynak sırasında mevcut konumlarını korumaları oldukça önemlidir. Yukarıda bahsi geçen diğer parametreler gibi sıkıştırma basıncı da kullanılan kaynak parametreleri arasındadır. İş parçalarını olması gereken pozisyonda tutmasılmazı oldukça kritiktir (Acherjee, 2021).

3. Kaynak kalitesini etkileyen faktörler

Polimerlerin lazer kaynağında geleneksel kaynak tiplerinde olduğu gibi malzeme karakteristikleri ön plandadır ve malzemeye göre ısı girdisi önem kazanır. Yukarı da bahsi geçen lazer gücü, kaynak hızı, sıkıştırma basıncı gibi

kaynak parametrelerinin yanı sıra termal iletkenlik, optik özellikler, akış yada kristalit ergime sıcaklıkları, özgül ısı, yansıtma, geçirgenlik gibi polimer malzemelerin karakteristiklerine bağlıdır. Diğer yandan iş parçaları arasında bağlantının istenilen dayanımda olması kaynağın kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir kriterdir. Kaynak işlemi öncesinde hazırlanan iş parçalarının doğru konumlandırılması için farklı bağlantı konfigürasyonları gündeme gelmiştir. Kaynak bağlantısında çentik etkisi yaratmayacak ve gerilme akışında düzensizlik olmayacak biçimde bağlantının yapılması arzu edilmektedir. En çok tercih edilen bağlantı tipi bindirmeli bağlantı konfigürasyonudur. Kaynaklı bağlantının mukavemetini değerlendirmek için kesme testi uygulanabilir. Mevcut testte kopma yükü, kesme veya çekme mukavemetleri değerlendirilir. T-şeklinde konfigürasyonu yapılan iş parçalarını değerlendirmek için çekme testi tercih edilebilir. İnce cidarlı iş parçalarında, gerilme bileşenlerinin arzu edilen şekilde gözlemlenemediği bağlantılar için brust test uygulanabilir (Acherjee, 2021).

Bindirmeli bağlantılarda oluşan hasarlar incelendiğinde arayüzey hasarları ön plandadır. Ara yüzey hasarlarında bağlantı dayanımının kullanılan altlık dayanımından daha düşük olduğu durumlarda görülmektedir. tam tersi bağlantı dayanımının daha yüksek olduğu durumlarda ise kaynaklı bağlantı bölgesi daha mukavim hale gelmesi sonucu malzemenin daha zayıf olduğu bölgelerde hasar meydana gelmektedir. Oluşan bu hasarların yanı sıra kaynaklı bağlantı dayanımı yaklaşık olarak malzemenin karakteristik dayanım özelliklerine eşit bir şekilde oluştuğunda hem ara yüzey hemde malzeme hasarı oluşabilmektedir.

Kaynak dikiş boyutları kaynak kalitesini etkileyen önemli bir kriterdir. Lazer kaynak bir çok avantajının yanı sıra özellikle polimer uygulamalarda daha göze hitap eden estetik görünüme sahip olduğu için tercih edilmektedir. Kaynak dikiş boyutlarını polimer malzeme başta olmak üzere kaynak parametreleri de etki etmektedir. Polimer malzemenin çeşit ve yapısının yanı sıra polimer morfolojisi, sahip olduğu kristallik indeksi ve termal dayanım karakteristikleri de kaynak dikişinin boyutlarını etkilemektedir. Lazer ısı girdisi, kaynak hızı, lazer yoğunluğu parametreleri de kaynak dikişi boyutlarının yönetiminde etkili parametreler olarak ön plana çıkmaktadır. Lazer yoğunluğunun yönetilmesi kayanak hızıyla uyum içinde gerçekleştirilmesi arzu edilir. Yavaş kaynak hızının azaltılması lazer yoğunluğunun uygulanan bölgede polimer malzemenin kristallik indeksinde artışa sebep olur ve bu durumda oluşan kaynak hazuvu çevresinde çatlaklar oluşmaktadır. İş parçalarında kırılganlık oluşması sonucu darbe dayanımı da azaldığı gözlemlenmektedir (Acherjee, 2020, 2021).

4. Polimerlerin lazer kaynaklanabilirliği

Polimer malzemeye sahip iş parçaları arasında yüksek kaliteye sahip kaynak bağlantıları elde etmek için kullanılmaktadır. Termofiziksel özellikleri benzer polimer malzemelerin kaynaklanabilirliği lazer kaynak bağlantısı oluşturmada avantaj sağlamaktadır. Bu malzemelerin lazer kaynak işlemini kolaylaştıran aynı erime noktasına sahip olmaları ve kimyasal yapı karakteristikleri sayesinde ısıtma sırasında daha iyi bir polimer zinciri karışımı sağlamaktadır. Aynı termoplastiklerin lazer kaynağı kaynak kalitesi yüksek ve oluşan kaynaklı bağlantının dayanımı yüksektir.

Benzer olmayan termoplastiklerin lazer kaynaklanabilirliği mümkündür ancak benzer termal özelliklere sahip olmaları tercih edilmelidir. Kaynaklanması planlanan polimer malzemelerin yakın erime sıcaklıklarına veya camsı geçiş sıcaklıklarına sahip olmalarıyla birlikte viskoziteleri de yakın değerlerde olmasına dikkat edilmelidir. Arzu edilen iyi zincir karışımının elde edilmesi polimerlerin kimyasal olarak uyumlu olmasını gerektirir. Polimerlerin bahsi geçen karakteristikleri göz önüne alınmazsa polimer zincirleri birbirine karışmaz ve ayrı fazların ortaya çıkmaktadır. Tablo 3 de benzer ve farklı termoplastiklerin lazer kaynağında termoplastik reçineler arasındaki uyumluluğu özetlenmektedir (Gonçalves, Duarte, Martins, & Paiva, 2021).

Tablo 3 Farklı ve benzer termoplastiklerin lazer kaynakla birleştirilmesinde uyumluluk özeti

	PA6	PA6.6	LDPE	HDPE	PEEK	PET	PMMA	POM	PP	PVC
PA6										
PA6.6										
LDPE										
HDPE										
PEEK										
PET										
PMMA										
POM										
PP										
PVC										

4.1 Polimerlerin metal, seramik ve diğer malzemelerle kaynaklanabilirliği

Lazer kaynak uygulamasının metalik bileşenlere sahip polimerlerin kaynaklanmasında sıklıkla tercih edilmektedir. Hibrit yapıda polimer-metal bileşenli malzemelerin estetik, yüksek hassasiyette, yüksek hızda ve esnek bir şekilde kaynaklanabiliyor olması büyük avantaj sağlamaktadır. Havacılıktan otomotive birçok endüstride bu avantajlarından dolayı tercih sebebidir. Lazer kaynak çelik, alüminyum, titanyum, magnezyum ve alaşımları gibi metaller ve PA6, PA66, PMMA, PET, PTFE ve CFRP (karbon elyaf takviyeli polimer) gibi polimerler dahil olmak üzere geniş bir spektrumda uygulanmaktadır.

Polimer ve seramik malzemeler arasında da lazer kaynakla arzu edilen özelliklerde kaynak mümkündür. Seramik malzeme yüzeyinde bulunan nanometre mertebesindeki çukurcuklara ve çatlaklara polimer malzeme lazer kaynak sırasında nüfuz etmektedir. Bu sayede polimer ve seramik malzemeler birbirlerine güçlü bir şekilde bağlandığı görülmektedir. Borosilikat cam malzemelerle polimer arasında yeterli bağlanma gözlenmektedir. Biyo-implantlar (Quazi et al., 2021), sensörler (Cai et al., 2020), mikroakışkan cihazlar (Kim, Kim, Joung, Choi, & Koo, 2018), optoelektronik cihazlar (Wang et al., 2022) gibi uygulamalarda başarıyla lazer kaynak uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Titanyum birçok uygulamada kaplama malzemesi olarak tercih edildiği görülmektedir. Titanyumun hem biyo uyumluluğunun yüksek olması, lazer emici olması ve termal iletimi arttırması dolayısıyla tercih sebebi olmaktadır (Acherjee, 2020; Gonçalves et al., 2021).

5. Endüstriyel uygulamalar

Öncelikle otomotiv sektöründe kendini gösteren lazer iletim kaynağı sonraki yıllarda birçok endüstriyel uygulamada kendini göstermektedir. Tıbbi cihazlar, elektronik, mikro teknoloji, tekstiller, paketleme vb sektörlerde tekrarlanabilir, yüksek verimli, hızlı, temiz, esneklik istenen sektörlerde lazer iletim kaynağı sıklıkla tercih edilmektedir (Acherjee, 2020, 2021).

6. Referanslar

1. Acherjee, B. (2020). Laser transmission welding of polymers–a review on process fundamentals, material attributes, weldability, and welding techniques. *Journal of Manufacturing Processes, 60*, 227-246.
2. Acherjee, B. (2021). Laser transmission welding of polymers–a review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications. *Journal of Manufacturing Processes, 64*, 421-443.
3. Cai, W., Wang, J., Jiang, P., Cao, L., Mi, G., & Zhou, Q. (2020). Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring: A critical review of recent literature. *Journal of Manufacturing systems, 57*, 1-18.
4. Geiger, M., Frick, T., & Schmidt, M. (2009). Optical properties of plastics and their role for the modelling of the laser transmission welding process. *Production Engineering, 3*(1), 49-55.
5. Gonçalves, L. F., Duarte, F. M., Martins, C. I., & Paiva, M. C. (2021). Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality. *Infrared Physics & Technology, 119*, 103931.
6. Grewell, D., Rooney, P., & Kagan, V. A. (2004). Relationship between optical properties and optimized processing parameters for through-transmission laser welding of thermoplastics. *Journal of Reinforced plastics and Composites, 23*(3), 239-247.
7. Kim, S., Kim, J., Joung, Y.-H., Choi, J., & Koo, C. (2018). Bonding strength of a glass microfluidic device fabricated by femtosecond laser micromachining and direct welding. *Micromachines, 9*(12), 639.
8. Klein, R. (2012). *Laser welding of plastics: materials, processes and industrial applications*: John Wiley & Sons.
9. Magomedov, G. M. (2011). *Structure and properties of crosslinked polymers*: Smithers Rapra.
10. Nicholson, J. (2017). *The chemistry of polymers*: Royal Society of Chemistry.
11. Quazi, M., Ishak, M., Fazal, M., Arslan, A., Rubaiee, S., Aiman, M., . . . Ali, M. (2021). A comprehensive assessment of laser welding of biomedical devices and implant materials: recent research, development and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 46*(2), 109-151.
12. Wang, Z., Zhou, H., Zhou, W., Li, Z., Ju, X., Peng, Y., & Duan, J. a. (2022). Experimental and numerical investigation of residual stress and post-weld-shift of coaxial laser diodes during the optoelectronic packaging process. *Welding in the World*, 1-14.

VERMİKÜLİTLERİN ENDÜSTRİYEL OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ

Dr. Öğr. Üyesi Nükhet ŞAPCI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Isparta, https://orcid.org/0000-0002-8390-9134

1.GİRİŞ

Son yıllarda, dünyada artan enerji maliyetleri ile birlikte, hızlı bir şekilde enerji verimli ürünlerin üretilmesi ve kullanımı konusunda çalışmalar başlatılmıştır. Özellikle en fazla enerji tüketimine neden olan unsurlardan bir tanesi yaşadığımız konutlardır. Bu konutlarda ısıl performans özelliği yüksek yapı malzemelerinin kullanılması da önemli bir konu haline gelmiştir. Ayrıca inşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle beton sektöründe hafif malzemelerin kullanımı yaşanılan elim deprem olayları sonucunda daha da iyi anlaşılmaya başlamış ve çoğu sektörel uygulamalarda hafif ve doğal malzemelerin kullanımına yönelik çalışmalar başlatılmıştır.

Yapılan bilimsel literatür araştırmalarında yapı sektöründe genellikle hafif beton, hafif yapı elemanı, hafif harç ve sıva uygulamaları için hafif doğal agrega malzemelerinin kullanıldığı görülmüştür. Bunlar genellikle pomza, volkanik cüruf, genleşmiş perlit ve diyatomit gibi malzemelerden oluşmaktadır. Ancak son yıllarda ülkemizde rezerv potansiyeli olduğu bilinen, inşaat endüstrisi uygulamalarında kullanılabilecek vermikülit malzemesinin varlığı dikkat çekmiştir. Bu malzeme ülkemizde sadece tarım sektöründe ticari alanda kullanılabilen bir malzemedir. Sadece bazı bilimsel makalelerde inşaat mühendisliği uygulamaları ve bazı endüstriyel alanlarda kullanıldığı tespit edilmiştir. Ancak bu kayaçların teknik özellikleri hakkında fazla detay bilgiye rastlanılmamıştır.

Bu nedenle bu çalışmada Vermikülit kayaç oluşumları ve farklı endüstriyel alanlarda agrega olarak kullanılabilirliğine yönelik bazı özet bilgiler verilmiştir. Özellikle bu madenin inşaat sektörü açısından gelişimi ve yeni nesil malzeme kategorisine dahil edilip enerji verimli ürünlerin üretilmesi ve kullanılabilirliğine katkı sağlamak amaçlanmıştır. Ayrıca laboratuvar ölçekli pilot bir çalışma yapılarak sonuçlar özetle paylaşılmıştır.

2. VERMİKÜLİT TANIMI VE MİNEROLOJİSİ

Genel olarak ortak bir literatür tanımına göre; Mika mineralleri ve kloritin alterasyonu ile oluşan 2:1 tabakalı fillosilikal minerallere Vermikülit denir. Bu malzeme mika mineralinin doğal olarak aşınması ile oluşmuş magnezyum alümina silikat yapıya sahip bir kil mineralidir. Vermikülit, minerolojik olarak incelendiğinde farklı bir grubu temsil eder (Toksoy, 1997). Sektörel açıdan genleşebilme özelliği olan mika grubuna ait mineralleri de (flogopit, biotit ve hidrobiotit) kapsayan genel bir terimdir. Diğer bir tanımlama ise, vermikülit sulu magnezyum alüminyum demir silikat olarak da bilinir. Makroskobik olarak sarımsı kahverengi, yeşilimsi ve siyahımsı renklerde olabilir. Sertliği literatürde

Mohs sertlik skalasına göre 1,2-2,0 arasında değişmektedir. Özgül kütlesi 2,5g/cm^3 civarındadır (Tapik, 2019).

Doğada işlenmemiş halde bulunan vermikülitler; bulunduğu ortamlara ve oluşumlarına göre 4 farklı türde bulunmaktadır. Bunlar; otojenik vermikülit, kil vermikülit, metamorfik vermikülit ve mikroskobik vermikülittir (Toksoy, 1997).

Ülkemizdeki vermikülit cevherleşmesinin en önemlileri Malatya-Darende-Kuluncak, Sivas-Yıldızeli-Karakoç, Elâzığ-Harput-Arduçluk ve Eskişehir-Sarıcakaya bölgeleridir. M.T.A kaynaklarına göre, Malatya-Darende-Kuluncak bölgesinde ultrabazik kütleler içinde vermikülit cevherleşmeleri yer almakta ve oluşumları bu ultrabazik kütleleri kesen alkali intrüziflere bağlanmaktadır (Aras, 1984, Tapik, 2019).

3. VERMİKÜLİTLERİN FİZİKSEL ve KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Vermikülit malzeme ucuz, çevre dostu ve toksik olmayan bir malzemedir. Bu üstün özellikleri sayesinde, özellikle genleştirilmiş vermikülitler enerji verimli ve sürdürülebilir binalar için önemli bir hammaddedir (Shoukry ve ark. 2016, Köksal ve diğ., 2015, Binici ve ark., 2015, Abidi ve ark., 2015, Gencel ve ark., 2014, Chung ve ark., 2015, Demirçivi ve Saygılı, 2014). Açılmış vermikülitlerin bazı fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo: 1. Açılmış Vermikülitlerin fiziksel özellikleri (Gündüz vd., 2018)

Özellik	
Renk	Altın
Şekil	Akordiyon şeklinde granül
Su tutma kapasitesi (ağırlık olarak %)	%160 >
pH (suda)	6-9
Isı iletkenlik (W/mK)	0.035-0.065
Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	90-220

X-ışınları analiz sonuçlarına göre, vermikülit'in mika veya klorit mineralinden farklı olarak kendine has bir yapısının olduğu görülmektedir. Tipik olarak bir vermikülit malzemesinin kimyasal bileşenlerinin büyük bir bölümünü SiO_2, MgO ve Al_2O_3 oluşturmaktadır. Tablo 2'de vermikülit malzemesinin genel bir kimyasal analiz sonucu verilmiştir (Kaya, 2011).

Tablo 2. Vermikülitlerin kimyasal özellikleri (Kaya, 2011)

Bileşen	Ağırlıkça Oranı (%)
SiO_2	38-46
Al_2O_3	10-16
MgO	16-35
CaO	1-5
K_2O	1-6
Fe_2O_3	6-13
TiO_2	1-3
H_2O	8-16
Diğer	0.2-1.2

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Vermikülitlerin Genleştirilmesi Analizi

Vermikülit minerali ani olarak yüksek sıcaklıkta ısıl işleme uğratıldığında akordeona benzer şekilde açılmaktadır. Bu genleşmenin vermikülit mineralinin bünyesindeki kristal suyun ani bir şekilde buharlaşması sonucu meydana gelen buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık ile genleştirme sonucunda mineralin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak, 0.8 g/cm^3 'ten 0.08 g/cm^3'e düşmektedir. Bu azalma trendi, vermikülit'in kalitesine ve genleştirme işleminin yapıldığı ortama bağlıdır (Loughbrough,1991,Tapik, 2019).

Vermikülit'in ısıl işlem sonucunda pul pul açılması işlemine literatürde vermikülit açma işlemi denilmektedir. Vermikülitlerin genleştirilme prosesinde süreyi sabit tutup sıcaklık arttırıldığında veya sıcaklık sabit tutulup fırında kalma süresi arttırıldığında mineralin açılma yani genleşme özelliğinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, genleşmiş vermikülit'in yangına karşı dirençli bir malzeme olduğu birçok araştırmada tespit edilmiştir (Gündüz, 2018).

Bu nedenle bu çalışma kapsamında Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat bölümü laboratuvarında 7 lt kapasiteli yüksek sıcaklık özellikli kül fırınında, piyasadan temin edilen 0-4 mm boyutlu Vermikülit malzemesi ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlem 600^{0}C-1000^{0}C arasında 50'şer ^{0}C artırılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem sırasında süreler sabit tutularak sıcaklık artırıldığında mineralin açılma karakteristiğinin arttığı görülmüştür. Böylece bu sıcaklıklar arasında 2 farklı açılma oranında vermikülit agrega üretilebildiği tespit edilmiştir. Bu açılma oranlarının %60 ve %83 civarında olduğu ölçülmüştür. Vermikülit malzemelere ait görünüm Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 1. Fırınlanma öncesi ve sonrası vermikülitlerin görünümü

Şekil 2. Isıl işlem sonrası vermikülitlerin akordeon şeklinde açılması

4.2. Genleşmiş Vermikülitli Hafif Harçların Yangına Direnç Analizi

Bu bölümde ısıl işlem sonrası %83 oranında açılma gösteren vermikülit agregalar ile hafif harç çalışması yapılmıştır. Harç malzeme TS EN 998-1 standardında belirtilen kriterlere göre oluşturulmuştur. Genleşmiş vermikülit malzeme ana hammadde olarak kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak çimento, yapışma mukavemeti için kireç, dolgu yapması amacıyla 1mm boyut altı pomza agrega ve bazı polimer katkılar kullanılmıştır. Bu polimer katkılar, hava sürükleyici, su itici, kıvamlaştırıcı özellikte katkılardır. Üretilen harç malzeme 4x4x6 cm boyutlu prizma kalıplara dökülmüş ve 28 günlük kür süresine bırakılmıştır. Kür süresi sonunda sertleşen numuneler için TS EN 13820 ve TS EN 13501-1 standardına göre kül fırınında yangına direnç deneyleri yapılmış ve teknik sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Vermikülit agregalı hafif harçların organik madde içeriği analizi

Numune No	**Organik Madde İçeriği (ağırlıkça %)**
1	0,901
2	0,966
3	0,884
Ortalama	**0,917**

TS EN 13820 standardına göre sıva harcı örneği için yapılan organik madde içeriği miktarı **%0,917** olarak tespit edilmiştir. Vermikülitli sıva numunesinde organik madde içeriği ağırlıkça %1'den daha düşük olduğu için standarda göre *"Organik malzeme içermeyen ve Yanmaz Malzeme"* olarak nitelendirilebilir.

4.3. Genleşmiş Vermikülitli Hafif Harçların Isı İletkenlik Analizi

Yapı malzemelerinde, malzemenin ısısal konfor özelliğini gösteren en önemli parametrelerden birisi ısı iletkenlik katsayısıdır. Deneysel çalışma sırasında, vermikülit mineralinin genleşme miktarının artması ile birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik değerinin azaldığı saptanmıştır. Bunun nedeni ısıl işlem neticesinde açılma oranı artan vermikülit agregaların gözeneklilik değerinin artmasıdır. %83 oranında açılma gösteren vermikülit agrega ile üretilen hafif harçların ısı iletkenlik analizi yapılmıştır. Analiz için 5x40x20 cm boyutlu plaka numune oluşturulmuştur. *Mahfazalı Sıcak Kutu"* yöntemi kullanılarak hafif harcın ısı iletkenlik katsayısı 0,060 W/mK olarak saptanmıştır (TS EN ISO 8990, TS EN, 1745). Deneysel çalışma sonucunda, genleştirilmiş vermikülitin ısı yalıtım amaçlı harçların üretiminde değerlendirilebilecek ideal bir agrega olduğu belirlenmiştir.

5. VERMİKÜLİTLERİN DİĞER ENDÜSTRİYEL ALANLARDA KULLANIMLARI

Vermikülit malzemenin endüstriyel kullanımları ile ilgili geniş çaplı literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda, vermikülit malzemenin yoğunluğunun düşük olması, yüksek sıcaklığa karşı direnci ve genleşme özelliği, ph özelliği ve iyon değiştirme özelliği gibi üstün teknolojik özellikleri bu malzemeye avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle en fazla kullanıldığı bazı endüstriyel alanlar ile ilgili bilgiler aşağıda özetle paylaşılmıştır.

Zirai alanda vermikülit'in iki şekilde kullanıldığı görülmüştür. Tarım toprağını elverişli hale getirmek için gerekli olan su ve bitki için gerekli olan ve gübrede bulunan (potasyum, azot, fosfor) besin maddelerini toprağın içinde barındırarak uzaklaşmasını engeller (Tapik, 2019).

İnşaat endüstrisinde ses ve ısı yalıtımı özelliği nedeni kullanılmaktadır. Ayrıca vermikülit katkılı çimento, tuğla ve yalıtım levhaları birim hacim ağırlıklarının düşük olması sebebiyle bu alanda kullanılmaktadır (Tapik, 2019).

Atık sulardan ağır metallerin giderilmesinde kullanımı: Vermikülit tabii yapısı nedeni ile zararlı iyonları (anyon ve katyon) tutabilmektedir. Dolayısıyla atık malzemelerin ayrıştırılmasında adsorpsiyon veya iyon değiştirme metodu ile yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu özelliğine ek olarak yüksek yüzey alanı

ile birleşince vermikülitler adsorpsiyon çalışmalarında sıkça kullanılmaya başlamıştır (Malandrino, 2006).

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ülkemizde rezerv potansiyeli olduğu bilinen bir hammaddenin teknik özellikleri ve endüstriyel kullanım alanları ile ilgili ayrıntılı bir literatür araştırması yapılarak sonuçlar özet bilgi olarak paylaşılmıştır. Ayrıca ülkemizde genellikle tarım sektöründe tüketildiği bilinen bu malzemenin özellikle inşaat endüstrisi uygulamalarında kullanılabilirliği için laboratuvar ölçekte deneysel bir çalışma yapılmıştır. Vermikülit hammaddesi laboratuvarda ısıl işlemle genleştirilmiş ve 1000 ^{0}C sıcaklıkta yaklaşık olarak %83 oranında açılma gösteren vermikülit agregaları üretilmiştir. Bu agregaların ham agregalara oranla birim hacim ağırlıkları oldukça düşük değerlerde tespit edilmiştir. Daha sonra genleştirilmiş vermikülit agregalarla kompozit yapıda harç oluşturulmuş ilgili standartlar kapsamında yangına direnç analizi ve ısı iletkenlik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre vermikülit agregası ile hafif harç ve hafif yapı elemanı üretmek mümkün görülmektedir. Bu çalışma detaylandırılarak daha farklı yapı malzemelerinin üretilebileceği tespit edilmiştir. Böylece enerji verimli binaların yapımında yeni nesil alternatif bir hammadde olarak vermikülitlerin değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Abidi, S., Nait-Ali, B., Joliff, Y., Favotto, C., 2015, Impact of Perlite, Vermiculite and Cement on The Thermal Conductivity of a Plaster Composite Material, Experimental and numerical approaches. Composites: Part B, vol: 68, pp. 392-400.
2. Aras, 1984, Malatya-Darende-Kuluncak-Darılı vermikülit zuhuru jeoloji raporu. MTA Rapor, (1725).
3. Binici, H., Sevinç, A.H., Efe, V.,2015, The Production of Insulation Materials Made with Waste Newsprint, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, vol: 30(2), pp.13-23.
4. Chung, O., Jeong, S.G., Kim, S., 2015, Preparation of Energy Efficient Paraffinic Pcms/Expanded Vermiculite and Perlite Composites for Energy Saving in Buildings, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol: 137, pp. 107-112.
5. Demirçivi, P., Saygılı, G.N., 2014, Sorption Isotherms and Modeling Studies of Hdtma for Adsorption onto Vermiculite, Perlite and Zeolite Clays, Journal of Engineering and Natural Sciences, vol:32, pp. 311-320.
6. Gencel, O., Diaz, J.J.D.C.D., Sutcu, M., Koksal, F., Rabanal F.P.A., Martinez-Barrera, G., Brostow, W.,2014, Properties of Gypsum Composites Containing Vermiculite and Polypropylene Fibers: Numerical and Experimental Results, Energy and Buildings, vol: 70, pp. 135-144.
7. Gündüz, L., Kalkan, Ş. O., İsker, A.M., 2018, A Technıcal Analysıs on The Effect of Exfolıated Vermıculıte Aggregate on Thermal Comfort Parameters of Composıte Mortars for Insulatıon Purposes in Proc. 3rd Internatıonal Energy & Engıneerıng Congress, Gaziantep University, pp.706-722.
8. Kalkan, Ş.O., Gündüz, L., 2018, Açılmış Vermikülit Agregaların Kompozit Yapılı Sıva Harçlarında Harcın Termal Özelliklerine Etkisi", 3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi Bildiriler Kitabı, pp.225-226.
9. Kaya, M., 2011, Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Silis Dumanı Katkılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Dirençleri", Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
10. Köksal, F., Gencel, O., Kaya, M., 2015, Combined Effect of Silica Fume and Expanded Vermiculite on Properties of Lightweight Mortars at Ambient and Elevated Tempretures, Construction and Building Materials, vol: 88, pp. 175-187.

11. Loughbrough, R.,1991, Minerals In Lightweight Insulation. Filling The Market. J Industrial Minerals, 289, 21-35.
12. Malandrino, M., 2006, Adsorption of heavy metals on vermiculite: influence of pH and organic ligands. Journal of colloid and interface science, 299(2), 537-546.
13. Shoukry, H., Kotkata, F., Abo-El-Enein, S.A, Morsy, M.S., Shebl, S.S, 2016, Enhanced Physical, Mechanical and Microstructural Properties of Lightweight Vermiculite Cement Composites Modified with Nano Metakaolin , Construction and Building Materials, vol:112, pp.276-283.
14. Tapik, Ş., 2019, Sivas-Yıldızeli Yöresi Vermikülit Hammaddesinin Seramik Sektöründe Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
15. Toksoy, F., 1997. Vermikülit: Mineraloji, jeolojik oluşum, endüstriyel kullanım ve Türkiye'deki durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
16. TS EN ISO 8990, 2002. Kararlı durum ısı iletim özelliklerinin tayini, kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
17. TS EN 1745, 2004. Kagir ve kagir mamulleri tasarım ısı değerlerinin tayini metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
18. TS EN 998-1, 2006. Kagir harcı, özellikler, kaba ve ince sıva harcı. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
19. TS EN 13820, 2014. Isı yalıtım malzemeleri-Binalar için-Organik içeriğin belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
20. TS EN 13501-1, 2019. Yapı mamulleri ve yapı elemanları, yangın sınıflandırması bölüm 1: Yangın karşısındaki davranış deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

DOĞAL GÖZENEKLİ AGREGALARIN ÇİMENTO ESASLI HAFİF HARÇ ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi Nükhet ŞAPCI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Isparta, https://orcid.org/0000-0002-8390-9134

1.GİRİŞ

Günümüzde toplumun karşılaştığı en büyük sorunlardan bir tanesi küresel ısınmadır. Küresel ısınma iklim değişikliğini de beraberinde getirmektedir. İklim değişikliğine sebep olan en büyük faktör ise atmosfere salınan sera gazlarıdır. Sera gazı salınım seviyesi ise enerji tüketim seviyesini azaltarak kontrol altına alınabilir. Yaşanılan konutlarda enerji tüketiminin minimuma indirilmesi iyi bir ısı yalıtım uygulaması ile gerçekleştirilebilir. Bu nedenle inşaat endüstrisinde ısısal performans özelliği yüksek yapı malzemelerinin üretilmesi ve kullanılması gerekmektedir.

Özellikle son yıllarda doğal gözenekli hafif agregaların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bunlar arasında özellikle pomza, volkanik cüruf, genleşmiş cam, perlit ve diyatomit agregalarının hafif harç üretiminde değerlendirilmesi yeni bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Kompozit yapıda yeni nesil harçlar olarak da isimlendirilen çimento esaslı polimer katkılı hafif harçlar teknik özellikleri itibariyle, geleneksel harçlardan farklılık göstermektedirler. Mesela birim hacim ağırlıkları normal harçlara göre daha düşük olmakta ve daha hafif harç karışım kompozisyonları oluşturulabilmektedir. Dolayısıyla ısısal performans özelliği yüksek, ses yutuculuk kabiliyeti, suya karşı direnci, yangına karşı dayanıklı olması gibi birçok teknik özelliği geleneksel harçlara göre yüksek katma değer sağlayan özelliklerdir (Gündüz ve Kalkan, 2016).

Bu çalışmada, Nevşehir yöresi pomza taşı ana materyal olarak kullanılmıştır. Bu pomza oluşumlarının mikronize edilerek, çimento esaslı kompozit yapıda TS EN 998-1 standardında tanımlanan T Grubu ısı yalıtımlı harç kategorisinde yer alması tasarlanmıştır. Dolayısıyla ısı yalıtımı sağlayan bir hafif harç ürünü geliştirilmesi için yoğun bir ArGe çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, farklı kimyasal toz formdaki polimerler katkılar ile, pomza kayacının çimento ile birlikte polimerik kompozit bir yapıda harç olarak değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar TS EN 998-1 ve ilgili diğer standartlara göre yapılmıştır. Her bir analizde farklı oranlarda mikronize pomza kullanılmış olup, çalışmanın başlangıcında oluşturulan kontrol karışımı ile mukayeseleri yapılmıştır.

2. ANALİZLERDE KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada geleneksel harcı temsil etmesi amacıyla öncelikle bir kontrol karışımı hazırlanmıştır. Bu karışım için 2 mm boyut altı kırma kum malzeme, polimerik bileşenli kompozit yapıdaki harçlar için ana malzeme olarak Nevşehir yöresinden pomza agregaları ve dolgu malzemesi olarak ise Ankara bölgesinden Diyatomit agregaları temin edilmiştir. Karışımlarda pomza agregaları 2 mm boyut altı, Diyatomit agregaları 1 mm boyut altı kullanılmıştır. Ayrıca tüm

karışımların işlenebilirlik özelliğini ve yapışma mukavemetini artırmak için söndürülmüş toz kireç, bağlayıcı malzeme olarak Çimsa Çimento San. ve Tic. A.Ş. üretimi BPÇ 52,5 R/85 kodlu süper beyaz çimentosu ana bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kompozit formda harç serileri elde etmek, karışımı kıvamlaştırmak ve polimerizasyon sürecini dengelemek için, kıvamlaştırıcı, hava sürükleyici ve aderans artırıcı toz polimerler katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

2.1. Pomza agregaları ve özellikleri

Pomza taşı, birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm^3'ten küçük, boşlukları birbirine bağlantısız, sünger görünümlü, silikat esaslı, sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 6 olan volkanik bir madde olarak tanımlanmıştır (Gündüz, 2005). Pomza taşı üstün teknolojik özelliklerinden dolayı bir çok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe, birim hacim ağırlığının düşük olması, yüksek ısı ve ses izolasyonu, iklimlendirme özelliği, kolay sıva tutması, mükemmel akustik özelliği, deprem yük ve davranışları karşısındaki elastikiyeti ve diğer malzemelere göre daha ekonomik oluşu gibi üstün özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Şapcı ve Gündüz, 2021).

Bu çalışma kapsamında Nevşehir bölgesi pomza oluşumlarından elde edilen agrega örnekleri kullanılmıştır. Bu bölgeye ait pomza agregaları kimyasal, fiziksel ve yapısal özellikleri itibariyle inşaat endüstrisinde doğal hafif agrega sınıfına girmektedir. Çalışmada pomza agregaları ana hammadde olarak kullanıldığı için bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle bu agregaların fiziksel özellikleri Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu inşaat laboratuvarlarında TS EN 1097-6 standardına göre deneysel olarak tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca pomza agregalarının kimyasal bileşen özellikleri de Tablo 2'de verilmiştir (Gündüz, 2005).

Pomza agrega örnekleri, ince taneli boyutlara indirgenmek amacıyla birincil kırıcılarda kırılmış ve daha sonra boyutlandırılmıştır. 0-2 mm boyutlu pomza malzemesi çalışma kapsamında kontrol karışımları hariç tüm karışım kombinasyonlarında ana hammadde olarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan pomzaların fiziksel özellikleri

	ρ (gr/cm^3)	**ρ_{rd} (gr/cm^3)**	**η_0 (%)**	**WA_{24h} (%)**
Pomza	2,323	0,992	23,08	21,98
ρ: Özkütle **ρ_{rd}:** Etüv kurusu tane yoğunluğu **WA_{24h} :** Ağırlıkça su emme (24 saatlik) **η_0:** Görünür porozite				

Tablo 2. Pomzaların kimyasal özellikleri (Gündüz, 2005)

Kimyasal Bileşenler	Pomza (%)
SiO_2	74,10
Al_2O_3	13,45
Fe_2O_3	1,40
CaO	1,17
MgO	0,35
Na_2O+K_2O	7,80
MnO	0,07
MgO	0,35
TiO_2	0,07
P_2O_5	0,05
A.K.	1,54

2.2. Diyatomit agregaları ve özellikleri

Diyatomit malzeme, su yosunları sınıflarından mikroskobik diatome olarak adlandırılan alglerinin fosilleşmiş olan silisli kavkılarından meydana gelmiştir.

Doğada bulunabilen, beyaz ve tebeşirimsi bir çökeldir. Öğütüldüğünde ince, beyazdan bej rengine kadar bir toza dönüşür. Bu tozun aşındırıcı bir etkisi vardır ve boşluklu yapısından dolayı oldukça hafiftir (Crangle, 2009).

Ağırlıklı olarak silisten oluşan Diyatomit kayacı, sertlikleri Mohs skalasına göre yaklaşık 1,5 ile 2 civarında, tane sertliği ise 4 ile 6,5 civarındadır. Kuru birim ağırlık değerleri 150-750 kg/m^3 aralığında değişmektedir (Gündüz ve Kalkan, 2016).

Diyatomit kayacının genel olarak kimyasal özellikleri aşağıda Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Diyatomitlerin genel kimyasal özellikleri (Aruntaş, 1996,DPT-2001)

Kimyasal Bileşenler	Diyatomit (%)
SiO_2	89 - 94
Al_2O_3	2 - 3
Fe_2O_3	Eser miktarda
CaO	%2,5 - 4
MgO	0,20 – 0,60
SO_3	1 – 4,5
A.K.	2 - 5

Bu çalışma için Diyatomit malzeme Ankara'dan temin edilmiştir. Kayaç olarak temin edilen diyatomitler laboratuvarda birincil kırıcılardan geçirildikten sonra 0-1 mm olarak boyutlandırılmıştır. Diyatomit malzeme harç karışımlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Genellikle piyasadaki ısı yalıtım sıvalarında dolgu yapması ve birim hacim ağırlığı düşürmesi için 1 mm boyut altı

genleşmiş perlit kullanılmaktadır. Bu çalışmada gözenekli özelliği ve hafifliği nedeniyle diğer yalıtım sıvalarından farklı olarak karışımlarda dolgu yapması için Diyatomit malzeme tercih edilmiştir.

3. HAFİF HARÇ TASARIMLARI İLE NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Pomza malzemesinin hafif harç üretiminde etkisini incelemek ve teknik mukayesenin yapılabilmesi amaçlanarak, özellikle başlangıç çalışması olarak pomza agrega içermeyen bir seri harç örnekleri 2 mm boyut altı kırma kum malzeme ile hazırlanmış olup, çalışmada kontrol harç örnekleri olarak isimlendirilmiştir (K_0). Kırma kum malzeme karışım kombinasyonunda ağırlıkça %42 olarak kullanılmıştır. Bu harç örneklerinde birim hacim ağırlığı en düşük seviyeye çekmek için dolgu malzemesi olarak ağırlıkça %20 oranında 1 mm boyut altı diyatomit agrega kullanılmıştır. Ayrıca yapışma mukavemetini artırmak için ağırlıkça %8 oranında söndürülmüş toz kireç ve bağlayıcı malzeme olarak %30 oranında beyaz çimento kullanılmıştır. Kontrol harç örneklerinde geleneksel harcı temsil etmesi amacıyla ve mukayesenin yapılabilmesi için polimer katkı kullanılmamıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm karışımlar Tablo 4'de sunulmuştur. Kontrol harç numunelerinin hazırlanmasında uygulanabilir su/katı oranını belirlemek için yayılma tablası metoduyla kıvam analizi yapılarak kontrol harcında 0,65 su/katı oranının en uygun olduğu belirlenmiştir. Kontrol numunesi taze harç karışımları TS EN 998-1'e göre 4x4x16 cm boyutundaki prizma şeklindeki kalıplara, 5x5x5 cm boyutlu küp şeklindeki kalıplara ve 20x40x5 cm boyutundaki plaka şeklindeki kalıplara dökülmüştür. Bu örnekler, bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak TS EN 998-1 standardına göre kürlenmiş, 28 günlük kür sonrasında numunelerin birim hacim ağırlığı, dayanımı, kapiler olarak su emme ve ısıl iletkenlik gibi özellikleri deneysel olarak analiz edilmiştir.

Tablo 4. Hafif harç karışım tasarımları

Bileşenler	**Karışım Oranları (Ağırlıkça, %)**					
	Kontrol Harcı	**Pomza Agregalı Polimer Bileşenli Hafif Harçlar**				
	K_0	**PM_1**	**PM_2**	**PM_3**	**PM_4**	**PM_5**
0-2 mm K.kum	42,0	-	-	-	-	-
0-2 mm Pomza	-	41,0	39,0	37,0	35,0	33,0
Beyaz Çimento	30,0	26,0	28,0	30,0	32,0	34,0
Dolgu Malzemesi	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Sönmüş Toz Kireç	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Polimer Katkılar	-	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Pomza agregalarının kompozit yapıda hafif harç kombinasyonlarında etkisini irdelemek amacıyla ağırlıkça farklı çimento dozajlarında (%26-%34 arasında) 5 farklı karışım kombinasyonu oluşturulmuştur (PM_1-PM_5). Değişen çimento oranında pomza agrega kullanım oranları da değişmektedir (%33-%41 arasında).

Karışımların kıvamını dengelemek, su yalıtım özelliği kazandırmak ve işlenebilirliği artırmak amacıyla tüm karışımlarda toplamda ağırlıkça %5 oranında polimer katkılar kullanılmıştır (Tablo 4). Bu karışımlarda kontrol karışımlarında olduğu gibi dolgu malzemesi ve sönmüş toz kireç ağırlıkça kullanım oranları sabit tutulmuştur. Polimerik bileşenli (PM_1-PM_5) kompozit harçların hazırlanmasında kontrol harçlarında olduğu gibi kıvam analizi yapılarak 0,85 su/katı oranının en uygun karışım kıvamını sağladığı görülmüştür. Tüm karışımlarda aynı oran kullanılmıştır.

Hazırlanan tüm karışımlar, kontrol harcında olduğu gibi uygun numune kalıplarına dökülerek, kürleme işlemleri sağlanmıştır. Kontrol harcı örnekleri ile polimerik kompozit harç örneklerinin karşılaştırmalı bir dizi deneysel analizi yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

ASTM-C 230 ve TS EN 1015-3 standartlarına uygun yayılma tablası metodu ile taze harcın kıvam analiz ölçümü yapılmıştır. Bu metotta taze harç karışımlarının uygun su oranı, ilk yayılma çapının ortalama 165±5 mm olması dikkate alınarak oluşturulmuştur (Gündüz vd., 2007). Kontrol harç karışımlar için yapılan yayılma tablası deneyinde uygun olan su/katı oranı 0,65 olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Pomza agregalı polimer bileşenli harç karışımlarında ise 0,85 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen taze harçların bu çalışmada tanımlanan ilk yayılma çap değer aralığında kaldığı gözlenmiştir.

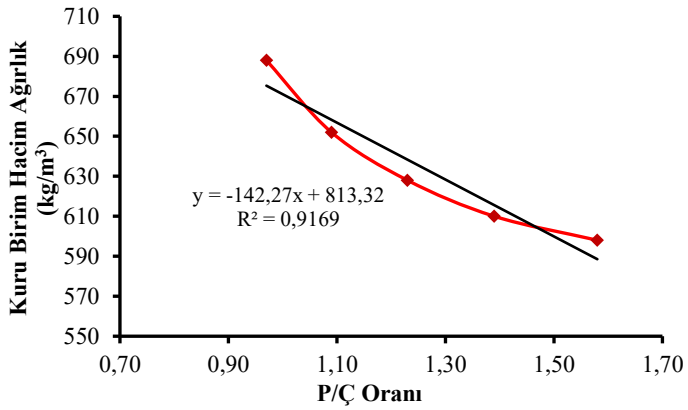
Pomza agregaları kullanılarak hazırlanan polimer katkılı kompozit yapıdaki sıva harcı numunelerinin fiziko-mekanik özellikleri irdelenmiştir. Bu amaçla çalışmada değerlendirmeler karışım kombinasyonunda yer alan Pomza/Çimento (P/Ç) oran değişimi bağlamında yapılmıştır. Karışım tasarımlarında görüldüğü gibi çimento oranı arttıkça azalan pomza miktarı nedeniyle P/Ç oranı düşmektedir. Karışım kombinasyonlarında bu oran değişimi 0,97 – 1,58 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca priz süresini tamamlamış harç örneklerine ait görünüm Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Analizlerde kullanılan numunelerden görünüm

Tablo 5. Hafif harç karışımlarının analiz bulguları

Teknik Özellikler	Kontrol Harcı	Polimer Bileşenli Pomza Agregalı Hafif Harçlar				
	K0	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5
Pomza/Çimento (P/Ç) Oranı	-	1,58	1,39	1,23	1,09	0,97
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	937	598	610	628	652	688
Basınç Dayanımı (N/mm^2)	4,58	2,40	2,52	2,70	2,94	3,12
Kılcal Su Emme (kg/m^2 dak$^{0.5}$)	2,118	0,374	0,302	0,281	0,252	0,210
Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)	0,372	0,094	0,099	0,122	0,140	0,162

Pomza agregaların ana hammadde olarak kullanıldığı kompozit harç örneklerinin priz sonrası kuru birim hacim ağırlık değerleri TS EN 1015-10 standardına göre analiz edilerek sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. P/Ç oran değişimine bağlı olarak yapılan grafiksel analiz ise Şekil 2'de verilmiştir.



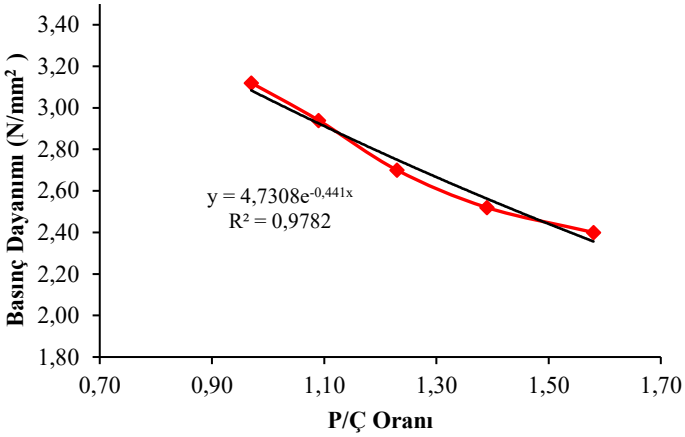
Şekil 2. Harç örneklerinin P/Ç oranına göre kuru birim hacim ağırlık analizi

Sertleşmiş hafif harçların birçok teknik özelliği birim hacim ağırlık değerlerine bağlıdır. Birim ağırlıklarının düşük seviyede olması o malzemenin ısı yalıtım özelliğini artırmaktadır (Gündüz ve Kalkan, 2016). Genellikle yapılan birçok deneysel çalışmalarda kuru birim hacim ağırlığı 800 kg/m^3 ve daha düşük değerde olan hafif harç malzemelerin ısı iletkenlik değerlerinin TS EN 998-1 standardında belirtilen T grubu "Isı Yalıtımı Sağlayan Harç" grubunda yer alabildiği tecrübe edinilmiştir. Bu açıdan irdelendiğinde, 2 mm boyut altı pomzalı ve polimer bileşenli kompozit harç örneklerinin priz sonrası kuru birim ağırlık değerlerinin 800 kg/m^3 değerinden daha düşük değerlerde olduğu ve P/Ç oranına bağımlı olarak 598 kg/m^3- 688 kg/m^3 aralığında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. 2 mm boyut altı kırma kum malzemenin kontrol harcı olarak polimer katkısız olarak oluşturulduğu örneklerde ise birim ağırlık değerinin 937 kg/m^3 seviyelerinde olduğu ve grubun dışında yer aldığı görülmüştür. Diğer taraftan, pomzalı harç örneklerinde P/Ç oran değerinin artmasıyla, birim hacim ağırlık değerinin doğrusal bir trendle düştüğü görülmektedir (Şekil 1).

Çalışmada sertleşmiş harç numuneleri için yapılan diğer bir analiz ise basınç dayanım analizidir. Harç gruplarının 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanım değerleri için TS EN 998-1'de 4 ayrı sınıf olarak belirtilmiştir (CS I–CS IV). Bu sınıflarda dayanım sınırları şu şekilde verilmiştir:

CS I dayanım sınıfı için : 0.4 – 2.5 N/mm2
CS II dayanım sınıfı için : 1.5 – 5.0 N/ mm2
CS III dayanım sınıfı için : 3.5 – 7.5 N/ mm2
CS IV dayanım sınıfı için : ≥ 6 N/ mm2

TS EN 1015-11'e göre, kontrol numuneleri ile pomza agregalı hafif harç serilerinin 28 günlük kür süresi sonrasında basınç dayanımları analiz edilmiştir ve sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. P/Ç oran değişimine bağlı olarak yapılan grafiksel analiz ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Harç örneklerinin P/Ç oranına bağlı olarak basınç dayanım analizi

Pomza agreganın ana hammadde olarak kullanıldığı hafif harç örneklerinin basınç dayanım bulgularında, P/Ç oran değişimi önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 3'de verilen grafik incelendiğinde artan P/Ç oranında, hafif harç örneklerinin basınç dayanım değerinin düştüğü gözlenmiştir. Standartta öngörülen sınır değerler açısından irdelendiğinde ise, karışım kombinasyonunda ağırlıkça %34 çimento oranına kadar polimerik katkılı hafif harç örneklerinin (PM_1-PM_5 serisi) CS I ve CS II sınıfı basınç dayanım kategorisinde kaldığı görülmüştür.

Deneysel bulgular, P/Ç oranına bağlı dayanım değerinin üstel lineer bir ilişkinin olduğunu da göstermiştir. Bu istatistiksel ilişkinin matematiksel olarak yaklaşımı Şekil 3'de verilmiştir. Bu çalışmada, 2 mm boyut altı pomzanın yalıtım amaçlı kompozit harç üretiminde değerlendirilebilmesi için TS EN 998-1'e göre T grubu harçların 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanım sınıfı açısından CS I – CS II sınıfında yer alması öngörülmüştür. Buna göre, analiz sonuçları incelendiğinde %34 çimento kullanım oranına kadar pomza ile elde edilen tüm kompozit yapıdaki hafif harç karışımlarının basınç dayanım değerleri açısından bu değerlendirmenin içerisinde yer aldığı görülmüştür. Diğer taraftan, 2 mm boyut altı kırma kumun ana agrega olarak kullanıldığı kontrol harcı örneklerinin basınç dayanım değeri ise ortalama 4,58 N/mm^2 olarak belirlenmiş olup, bu sonuç kırma kum ile hazırlanan kontrol harç örneklerinin birim ağırlık değerinin yüksek olmasının da bir sonucudur. Kontrol örneklerinin dayanım sınıfı açısından CS III kategorisinde yer aldığı görülmektedir. Bu olgu ise, kontrol harcının T grubunda yer almadığını kısmen işaret etmektedir. Diğer bir değişle, 2 mm boyut altı pomza agrega ile, polimer bileşenli kompozit harç elde edildiğinde basınç

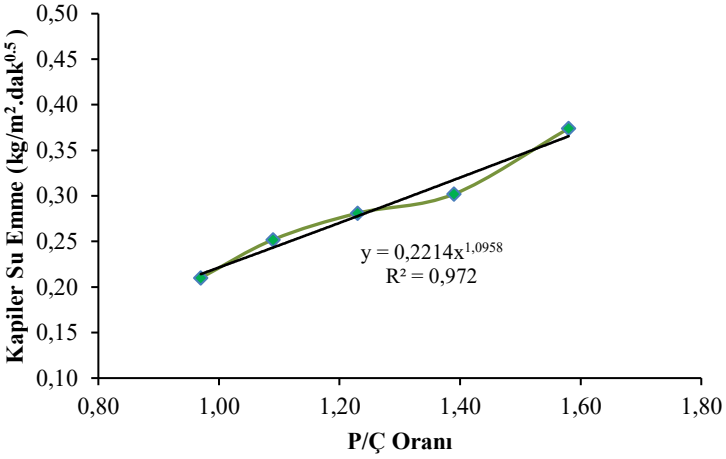
dayanımı açısından T grubu ısı yalıtım amaçlı bir harç üretilebileceği gözlenmiştir.

Çalışma kapsamında yürütülen diğer bir analiz ise kılcal (kapiler) su emme analizidir. Polimer katkılar içerisinde kullanılan su itici katkının kompozit yapıya olan etkisi gözlemlenmiştir. Özellikle inşaat endüstrisi uygulamalarında yapı malzemelerinin dış ortam koşullarına karşı dayanıklığı ve malzemenin bünyesine emilen suya karşı gösterdiği direnç son derece önemlidir.

Harç gruplarının kılcal (kapiler) su emme (c) değerleri için TS EN 998-1 standardında 3 farklı sınıf öngörülmüştür (W0–W2). Bu sınıflarda kılcal su emme sınır değerleri şu şekilde verilmiştir:

W0 Kılcal (Kapiler) Su Emme Sınıfı: Belirlenmiş değer yoktur
W1 Kılcal (Kapiler) Su Emme Sınıfı: c≤0.40 kg/m2.dak0.5
W2 Kılcal (Kapiler) Su Emme Sınıfı: c≤0.20 kg/m2.dak0.5

Dış cephe kagir yapılarda kullanılmak için tasarlanan ısı yalıtım amaçlı harçların TS EN 998-1 standardında kılcal (kapiler) su emme özelliklerinin genellikle W1 sınıfında yer alması öngörülmüştür. Bu çalışmada elde edilen hafif harç örneklerinin TS EN-1015-18 standardına göre Kılcal (kapiler) su emme analizleri yapılarak irdelemesi yapıldığında, ağırlıkça %34 çimento kullanım oranına kadar hazırlanan pomza agregalı polimerik katkılı hafif harçların (PM_1-PM_5 kodlu harç serisi) kılcal su emme değerleri, 0,374-0,210 kg/m^2 $dak^{0.5}$ arasında ölçülmüş olup, W1 sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Ayrıca çimento miktarının artışına bağlı olarak kompozit harç daha fazla su geçirimsiz yani hidrofob bir karakter sergilemektedir (Şekil 4). Benzer değerlendirmeyle, TS EN 998-1 standardına göre, 2 mm boyut altı pomzalı polimer bileşenli hafif sıva harcı örneklerinin kapilarite açısından T grubu yalıtım harcı kategorisinde yer alabileceği görülmektedir. Diğer taraftan, kontrol harcının kılcal su emme değeri ise 2,118 kg/m^2.$dak^{0.5}$ olarak ölçülmüş olup, polimer bileşenli kompozit matris yapıdaki örneklere göre çok yüksek bir su geçirimliliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değerlendirme ışığında, kontrol harcı örneklerinin W0 sınıfında yer alabileceği tanımlanabilir. Ayrıca kontrol harç karışım tasarımlarında hiçbir polimer katkı kullanılmamıştır. Dolayısıyla özellikle su itici katkının ne kadar etken olduğu sayısal olarak da belirlenmiştir.



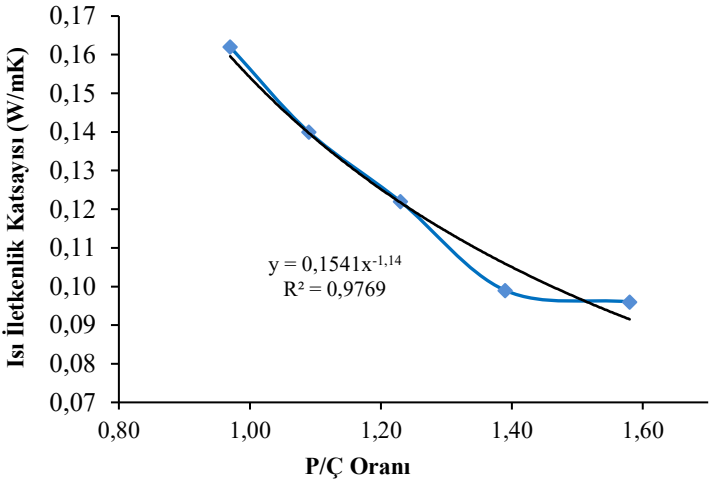
Şekil 4. Harç örneklerinin P/Ç oranına göre kılcal (kapiler) su emme analizi

Çalışmadaki diğer bir irdeleme konusu da sertleşmiş harç örneklerinin ısı iletkenlik analizidir.

Yalıtım amaçlı hafif harç uygulamalarında pomza agregasının kullanılabilirliği, harç örneklerinin ısı iletkenlik katsayısı ve ısısal konfor açısından sağladığı avantajları detay olarak incelenebilmektedir. Isı yalıtımı sağlayan harç grupları için TS EN 998-1 standardına göre, 2 ayrı sınıf (T1 – T2) öngörülmüştür. Bu değerlendirme, harç malzemelerinin ısıl iletkenlik değeri bağlamında yapılmış olup, sınır değerler şu şekilde öngörülmüştür:

T1 Sınıfı - Isıl İletkenlik Değeri : ≤ 0.10 W/mK
T2 Sınıfı - Isıl İletkenlik Değeri : ≤ 0.20 W/mK

Bilindiği gibi, bir malzemenin ısısal konfor özelliklerinin iyileşmesi o malzemenin ısı iletkenlik katsayısının düşük olmasıyla ilişkilidir. Yukarıda da değinildiği gibi, bir harç malzemesinin ısıl iletkenlik değerinin ≤ 0.20 W/mK olması, bu malzemenin ısı yalıtımı sağlayan bir harç grubunda yer alabildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada elde edilen tüm harç örneklerinin ısıl iletkenlik değerleri TS EN ISO 8990 standardında öngörülen Mahfazalı Sıcak Kutu yöntemine göre ölçülmüştür ve sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. Ayrıca, P/Ç oran değişimine bağlı olarak yapılan grafiksel analiz ise Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Harç örneklerinin P/Ç oranına göre ısı iletkenlik analizi

Deneysel bulgular irdelendiğinde görüldüğü gibi artan P/Ç oranında pomza agregalı hafif harç örneklerinin ısıl iletkenlik değerleri düşmektedir. Başka bir ifadeyle, karışımdaki çimento kullanım oranı arttıkça, kompozit harcın ısıl iletkenlik değeri büyümekte olup, ısı yalıtım performansının azaldığı görülmektedir. Bu çalışmada, pomza agregalı polimer bileşenli kompozit harç serilerinde PM_1 ve PM_2 kodlu harç örnekleri TS EN 998-1 standardına göre T1 grubunda yer alırken, PM_3, PM_4 ve PM_5 kodlu seriler T2 grubunda yer almaktadır. Kontrol harç örneğinin ısı iletkenlik değeri, 0,372 W/mK olup, T2 grubu dışında kalmaktadır. Bunun iki nedeninin olabileceği öngörülmüştür. Birincisi kırma kum agrega, yoğunluğu yüksek bir agregadır. Dolayısıyla sertleşmiş harç örneklerinin birim hacim ağırlıklarını yükseltmiştir. İkincisi ise kontrol harç karışım kombinasyonunda dolgu malzemesi olarak kullanılan diyatomit harç içerisinde oturma yapmış ve harç numunesinin prizini tamamlamasından sonra birim hacim ağırlık değerinin yükselmesine neden olmuştur. Ayrıca grafiksel analiz irdelendiğinde, P/Ç oran değişimi ile örneklerin ısıl iletkenlik değerleri arasında yüksek korelasyon değerinde üssel bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bu matematiksel yaklaşımla harç karışım kombinasyonlarının tasarlanmasında optimize edilebilecek uygun karışım parametrelerinin, kestirim yaparak tasarlanabilme olanağını sunmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Nevşehir yöresinden temin edilen 2 mm boyut altı pomza malzemesinin, polimer bileşenli kompozit yapıda oluşturulan hafif harç

numuneleri üzerinde bir seri teknik analiz yapılmıştır. Öncelikle polimer bileşen içermeyen 2 mm boyut altı kırma kum malzeme ile bir kontrol harcı geliştirilmiş ve bu harç örnekleri üzerinde elde edilen sonuçlar, teknik mukayese kriteri olarak değerlendirilmiştir. Farklı çimento kullanım oranlarında pomza agregalı polimer katkılı 5 ayrı hafif harç karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlardan elde edilen numunelerin TS EN 998-1 standardına göre bir dizi deneysel çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde, kontrol harcı örneklerinin, ısı iletkenlik değerinin ortalama 0,372 W/mK olması nedeniyle T sınıfı harç kategorisi dışında kaldığı görülürken, polimer bileşenli diğer harç sınıfları T1 ve T2 sınıfı harç kategorisi içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla pomza malzemesinin uygun bir karışım tasarımı ile polimer bileşenli yalıtımlı sıva harcı üretiminde değerlendirilebileceği görülmüştür. Ayrıca basınç dayanım sınıfı açısından CS I ve CS II sınıfında yer alabileceği ve kapiler su emme karakteristiği açısından da W1 sınıfında yer aldığı gözlenmiştir.

Hafif harç tasarımlarında ana agrega olarak kullanılan pomza agregaları yoğun gözenek yapısı sayesinde düşük birim hacim ağırlık ve yüksek bir ısısal performans özelliği gösterse de bu gözenek yapısı nedeniyle yüksek su emme kapasitesine sahip olması da önemli bir dezavantaj olarak görülmektedir. Ancak çalışma kapsamında hafif harç tasarımlarında su itici katkı kullanılarak pomzanın bu özelliğinin harç içerisinde bertaraf edildiği de gözlenmiştir. Öyle ki ağırlıkça %2,9 oranında en yüksek su itici katkının kullanıldığı PM_5 serisinin kılcal su geçirimsizlik özelliği, herhangi bir polimer katkının kullanılmadığı K_0 kodlu kontrol harçlarına göre %90,08 oranında iyileşme göstermiştir.

Bu çalışma bulguları, polimer bileşenlerin ve karışımlarda kullanılan dolgu malzemesi diyatomitlerin sabit miktarda kullanımı sonucu elde edilmiştir. Bu çalışmanın daha ayrıntılı bir irdelemesi olarak, değişen diyatomit agrega ve polimer bileşenleri oranlarında da benzer çalışmaların yapılması önerilebilir. Ayrıca farlı yörelere ait gözenekli hafif agregalar temin edilerek ve 0-2 mm pomza agrega boyut aralığı daha fazla genişletilerek farklı karışım kombinasyonları hazırlanabilir. Böylece tane boyut etkisi de ayrıca incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Aruntaş, H. Y., 1996, Diatomit, özellikleri, kullanım alanları ve inşaat sektöründeki yeri, Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, s27-32.
2. ASTM C230 / C230M-08. "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005.
3. Crangle, R. D., Jr., 2009, Diatomite: US Geological Survey Mineral Comodity Summaries, 54-55.
4. DPT 2001. 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı: Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Bentonit, Barit, Diyatomit, Aşındırıcılar. Devlet Planlama Teşkilatı (DPT:2621-ÖİK.632), Ankara.
5. Gündüz, L., 2005, İnşaat Sektöründe Bimsblok, Süleyman Demirel Üniversitesi, Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, 928s, Isparta.
6. Gündüz, L., Bekar, M. and Şapcı, N., 2007, Influence of a new type of additive on the performance of polymer-lightweight mortar composites, Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 8, September, Pages 594-602.
7. Gündüz, L., Kalkan, Ş. O., 2016, Diyatomit Agregaların Çimento Esaslı Hafif Harç Özelliklerinin Gelişimine Etkisi, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, s284-294, Kütahya.
8. Şapcı, N., Gündüz, L., 2021, Kayseri Bölgesi Pomza Oluşumlarının Yalıtımlı Kompozit Harç Üretimlerinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme, International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies, Bandırma/Balıkesir, s69-83.
9. TSE 2002. TS EN ISO 8990, Isı Yalıtım-Kararlı Durum Isı İletim Özelliklerinin Tayini-Kalibre Edilmiş ve Mahfazalı Sıcak Kutu, Ankara.
10. TS EN 998-1, Kâgir harcı – Özellikler, "Bölüm 1: Kaba ve İnce Sıva Harcı", Ankara, TSE, Şubat, 2006.
11. TS EN 1015-3, Kagir Harcı- Deney Metotları, "Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma tablası ile)", Ankara, TSE, Kasım, 2000.
12. TS EN 1015-10, Kâgir Harcı-Deney Metotları, "Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlesinin Tayini", Ankara, TSE, Nisan, 2001.
13. TS EN 1015-11, Kagir Harcı - Deney Metotları, "Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini", Ankara, TSE, Ekim, 2000.
14. TS EN 1015-18, Kâgir harcı - Deney Metotları, "Bölüm 18: Sertleşmiş Harcın Kapiler Etkiler Esnasında Su Emme Katsayısının Tayini", Ankara, TSE, Ocak, 2004.

GÜNEŞ GÜÇ KULELERİNDE HELİOSTAT YERLEŞİMLERİNİN ENERJİ ÜRETİMİNE ETKİSİ

Onur Mahmut Pişirir[1]
Okan Bingöl[2]

[1]Süleyman Demirel Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-6895-3420
[2]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
ORCID: 0000-0001-9817-7266

1. Giriş

Enerji tüm işlerimizi yapmamız için gerekli kaynaktır. Bilimde enerji ne yoktan var edilebilir ne de yok edilebilir, sadece farklı formlara dönüşür. Enerji ve enerji dönüşümü tüm varlıklar için hayati bir önem taşır ve enerji dönüşümünün temel parçaları kullanılabilir enerji üretimine katkı sağlar. Bu işlemler sırasında enerji birden fazla forma dönüşebilir. Farklı enerji formları yenilenemez ya da yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilir. Fosil yakıtlar, petrol, doğal gaz ve kömür en çok kullanılan yenilenemeyen enerji kaynaklarındandır. Uranyum da yenilenemeyen ve yüksek ısı, çok yüksek elektrik enerjisi elde edilebilen bir kaynaktır. Nükleer enerji kaynaklar fosil yakıtlara göre daha az kullanılmaktadır. Kömür ve doğalgaz kullanımı 1973 ve 2010 yılları arasında artmıştır. Petrol krizinden sonra ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artış göstermiştir. Güneş enerjisi direkt olarak kullanılabilen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (Hossain vd., 2016).

Dünya'da enerjiye talep oldukça artmıştır ve gelecekte de artmaya devam edecektir. Dünya üzerinde üretilen enerjinin %16'sı hidroelektrik kaynak, %40 kömür, %20 doğal gaz, %16 nükleer, %7 yağ ve sadece %2 si yinelenebilir enerjiden elde edilmektedir. Yenilenebilir enerji tüm dünyada kolayca ulaşılabilecek durumdadır ve her yıl %3 artarak 2035 yılı sonunda kullanımı %14'e varacağı düşünülmektedir. İklim üzerindeki olumsuz etkileri ve CO_2 emisyonlarını da azaltacaktır. (Alper ve Oğuz, 2016; Sahoo, 2016).

2. Yenilenebilir Enerji

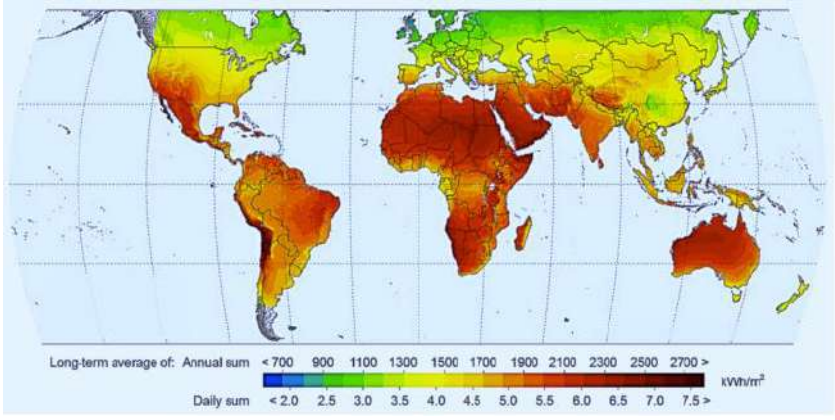
Dünya genelinde enerji sistemleri temel olarak aşağıdakilere dayanmaktadır fosil yakıtlara dayanmaktadır. Ancak yakın gelecekte aşırı kullanım sonucunda yakıt kaynakları azalmaya başlayacak ve bu durum yeni rezervlerin aranmasına ve yeni teknolojilerin icat edilmesine yol açacaktır. Son yıllarda sürdürülebilir üretim için enerji kaynakları büyük önem taşımaktadır (Pisirir ve Bingol, 2016). Tüketildiğinden daha hızlı bir şekilde yeniden doldurabilen ve doğal yollardan elde edilen enerji yenilenebilir enerji olarak tanımlanmaktadır. Güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik, ve bazı biokütle formları yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji çevreye az zararlı olduğu için yenilenebilir enerji kaynağı arayışları son yıllarda artmıştır. Bu nedenle çeşitli sertifikalar hibe edilmektedir. Yenilenebilir enerjinin en büyük avantajı ve fosil yakıtlardan temelde ayrıldığı nokta, fosil yakıtların geri dönüştürülebilir olmamasıdır (Destek, 2016; Erdil ve Erbıyık, 2015). Günümüzde her insan enerjiye çok kolay ulaşamamakta ve hayatta kalabilmek için elverişli bir ortam kuramamaktadır. Bazı yerleşim yerlerine de kolaylıkla enerji götürülememektedir. Bu nedenle de yenilenebilir enerjiye ihtiyaç artmaktadır (Kannan ve Vakeesan, 2016). Güneş

enerjisi yenilenebilir enerji olarak giderek daha fazla ilgi çekmektedir. ve net elektrik üretim kapasitesi fosil yakıtları geçmiştir (Yang, Lee, ve Lee, 2020).

3. Güneş Enerjisi

Gezegenimizin önemli enerji sorunları ile karşı karşıya olması ve enerji ihtiyacının sürekli artıyor olması, enerji kaynağı olarak Güneş'e bakmamızı gerektirmiştir. Fotovoltaik uygulamalardan fotosenteze kadar Dünya üzerinde birçok uygulama için enerji kaynağıdır. Bir ülkenin gelişmişlik düzeyi enerji üretimindeki ve tüketimindeki verimliliğe de bağlıdır. Dünya'nın yüzeyine işleyen Güneş en önemli enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinin potansiyeli tüm antik uygarlıklar tarafından da kullanılmıştır. Güneş enerjisi tükenmez ve ücretsiz olmasına rağmen tüm gün boyunca sürekli olarak ve kolayca üretilemeyebilir ve bu nedenle de güneş enerjisi ile enerji üretmek bazı mühendislik çalışmalarını gerektirmiştir. (Khatib, Mohamed, ve Sopian, 2012).

Güneş ışınımı ve dağılımı Dünya'nın şekline bağlı olarak ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Bu nedenle de verimlilik oldukça farklıdır. Şekil 1 üzerinde güneş ışınımlarının ülkelere göre dağılımı gösterilmiştir (Kannan ve Vakeesan, 2016).



Şekil 1. Küresel yatay ışınım haritaları (Kannan ve Vakeesan, 2016)

4. Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisi genellikle 3 teknoloji ile ele alınabilir. Bunlar;

- Pasif ve Aktif
- Termal ve Fotovoltaik
- Yoğunlaştırıcı ve Yoğunlaştırıcı olmayan

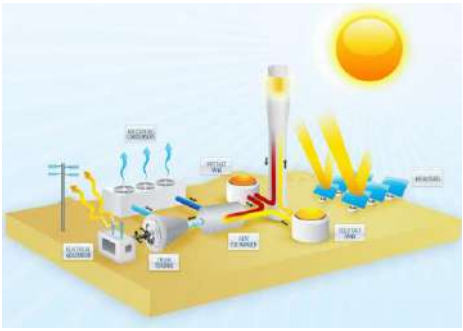
Pasif güneş enerjisi tasarımında ısı ve ışık diğer formlara dönüştürülmez, yalnızca ihtiyaç duyulan alanda güneş enerjisi emilir. Bunlarda binaların güneye bakan kısımlarını tasarımı, seralar, havalandırmalar örnek olabilir.

Aktif güneş enerjisi tasarımı, güneş enerjisini saklayan ve diğer uygulamalar için dönüştürebilen uygulamalardır. Bu uygulamalardan biri ısıyı sıcak su için tutmak ve pişirme, temizleme, ısıtma veya saflaştırma; buhar türbinlerinden elektrik elde etmek için de kullanılabilir. Genel karakteristiği güneşe yönlenme ve güneş enerjisini toplama üzerinedir. Aktif çözümler termal ve fotovoltaik olarak ayrılabilir. Termal uygulamalar çok yüksek ısı değerlerini buhara dönüştürmek için kullanılır. Fotovoltaik teknoloji aktif güneş elektrik üretiminde yeni nesil teknolojilerden biridir. Belirli bir molekül yapısının malzemeler üzerinde ışık enerjisinin yakalaması ile doğrudan elektrik akımı üretilir. Bir fotovoltaik hücrenin ömrü imalat yöntemleri ve alt-tabaka malzemesine bağlıdır, bazı PV hücreleri uzay teknolojileri ve uydularda kullanılmaktadır. PV hücreler için silikon malzemeli olduklarından, arazi tabanlı uygulamalarda genellikle yirmi beş yıl veya daha fazla süreyle kullanılabilir (Bradford, 2006).

Konsantre güneş enerjisi teknolojileri son yıllardaki gelişimi artmaktadır. Konsantre güneş enerjisi, elektrik elde etmek için ekonomik ve etkili bir yoldur. Bu teknoloji ile elektrik üreten tesislerin diğer enerji üretim yöntemleri ile rekabetçi olmaları için maliyetleri azaltmak gerekir. Güneş enerjisi yoğunlaştırmalı (CSP) sistemler, aynalar ya da mercekler yardımı ile güneş ışığının geniş bir alandan, küçük bir alana yansıtan bir takip sistemi kullanırlar. Yoğunlaştırılmış ısı enerji santralinde elektrik üretmek için kullanılır. En gelişmiş yoğunlaştırma teknolojileri parabolik oluk, yoğunlaştırıcı doğrusal Fresnel yansıtıcı, Sterling çanağı ve güneş enerjisi kulesidir. Güneşi izlemek ve odaklamak için birçok teknolojiyi kullanırlar (Balghouthi vd., 2016; Ma vd., 2015; Manente, Rech, ve Lazzaretto, 2016).

5. Güneş Güç Kulesi

Güneş Güç Kuleleri büyük ölçüde elektrik üretmek için kullanılan en ucuz yöntemlerden biridir. Güneş güç kulesi santrallerinde, güneş ışınları kulenin üstündeki bir alıcıya yansıtılır. Yoğunlaştırılan güneş ışınları termal güce çevrilir ve elektrik elde edilir (Wei vd., 2010). Örnek bir güneş güç kulesi santrali Şekil 2'de görülmektedir (Pittsburg, 2016).



Şekil 2. Solar Power Tower Plant (Pittsburg, 2016)

Bu sistemlerde güneş ışınlarını kuleye yansıtan heliostat ismi verilen bir dizi ayna bulunmaktadır. Bu heliostatlar ile yansıtılan güneş ışınları kulenin üstündeki alıcı ısınır. Termal enerji geleneksel güç çevrimleri de kullanılarak elektriğe çevrilir. Bu nedenle heliostat alan tasarımı çok büyük önem taşımaktadır. Santralin maliyetinin %50'sini ve güç üretiminin %40'nı heliostatlar oluşturur (Besarati ve Yogi Goswami, 2014). Heliostat alanının toplam verimlilik değerleri, bir yıllık güneşlenmeye bağlı olarak denklem 1'deki gibi hesaplanabilir.

$$\eta_{year,w} = \frac{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_{bN}(t)\eta(\mathrm{t})\mathrm{d}t}{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_{bN}(\mathrm{t})\mathrm{d}t} \quad (1)$$

Bu denklemde $\eta_{year,w}$ yıllık güneşlenme ağırlıklı verimliliği gösterir, I_{bN} normal radyasyon ışınıdır (W m^{-2}) ve η is anlık optik verimliliktir. (Besarati ve Yogi Goswami, 2014).

Heliostatların birbirini engellemesi ve gölgelemesi göz önüne alınırsa, heliostatın üzerindeki herhangi bir noktadaki verimlilik aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\eta' p = f_{at} * f_{rec} * \gamma_p = f_{at} * f_{rec} * \iint_D^f BS(\theta,\varphi)B(\theta)d\varphi \sin\theta d\theta \quad (2)$$

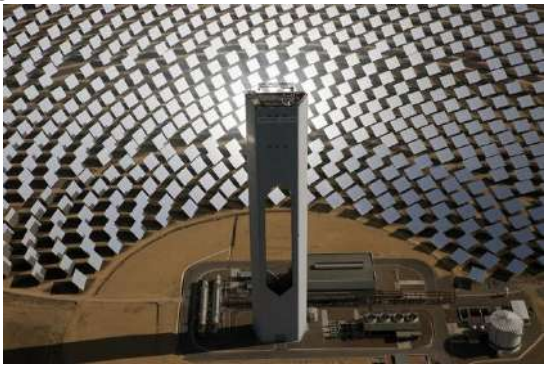
Bu denklemde; $\eta' p$ heliostat üzerindeki bir noktanın optik verimliliğidir, f_{at} atmosferik zayıflama faktörüdür, f_{rec} soğurucunun soğurma gücüdür, θ radyal açısal yer değiştirme veya enine yönde açısal yer değiştirmedir (rad), φ silindirik koordinat sistemindeki bir koordinattır (rad).

$$P(t) = \sum_1^N I(i,t) \quad (3)$$

N kule alanındaki heliostat sayısıdır, I (i, t) i'nci heliostat tarafından t anında toplanan güneş enerjisidir, dolayısıyla bir yıl içinde tüm heliostat alanı tarafından toplanan enerji aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir;

$$\mathrm{E} = \int_0^{365} 24 * \mathrm{DNI(t)} * \sum_1^{\mathrm{N}} [\cos(\lambda \mathrm{i}) * \rho \mathrm{i} * \eta_{\mathrm{o}}(\mathrm{i}) * \mathrm{s(i)}]\mathrm{dt} \quad (4)$$

λi merkezi güneş ışığının i'nci heliostat üzerindeki geliş açısıdır (rad), ρi i'inci heliostatın yansıtıcılığıdır, η_o bir heliostatın optik verimliliğidir, DNI doğrudan normal ışınımdır (W m^{-2}), S Doğrudan Normal ışınım altında aynanın yansıtılan alanıdır (m^2) (Huang ve Xu, 2014). Şekil 3'te bir Güneş Enerjisi Kulesi ve Heliostat alanı gösterilmektedir.



Şekil 3. PS10 Güneş Enerjisi Kulesi ve heliostat dizileri ("The Solar Power Towers of Seville, Spain," 2022)

6. Heliostat Alan Hesaplamalarında Kullanılan Algoritmalar

Heliostat alanı düzenlemesi yüksek hesaplama maliyeti ve oldukça karmaşık bir iştir. Bu nedenle farklı algoritmalar üretilmiştir.

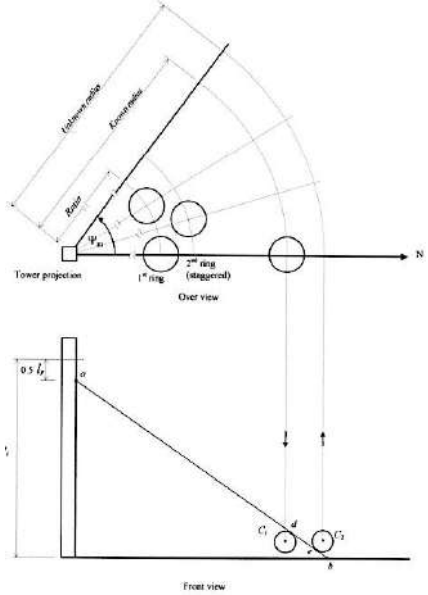
Dense radial staggered (Yoğun radyal kademeli); düzenleri tanımlamak için bir algoritma sunulmuştur. Bu düzenlerde bitişik sıralar arasındaki radyal aralık sabittir ve her heliostat bölgesi için azimut aralığı hesaplanır. Daha sonra, heliostat yoğunluğunu hafifletmek ve daha yüksek yıllık enerjiye sahip alanlar elde etmek için bir azimut genişlemesi ve radyal genişleme önerilmektedir. Algoritmanın girdi parametreleri heliostat boyutları, alandaki ilk sıranın yarıçapı, iki komşu heliostatın merkezi arasındaki ek bir ayırma mesafesi ve bir referans engelleme faktörüdür. Radyal Kademeli konfigürasyonlar ilk olarak Houston Üniversitesi tarafından RCELL kodu için önerilmiştir. İki aralık değeri kullanılarak oluşturulan dört alan konfigürasyonu sunulmaktadır: Radyal Yönelimli Mısır Tarlaları, Radyal Yönelimli Kademeli, Kuzey-Güney Yönelimli Mısır Tarlaları ve Kuzey-Güney Yönelimli Kademelidir (Barberena, Larrayoz, Sánchez, ve Bernardos, 2016).

Campo; Radyal kademeli yerleşimin özel bir durumu campo alanıdır. Bu düzen, heliostat alanını işaretlenmiş üç bölgeye ayırmaktadır. Her bölge, heliostatlar arasında sabit bir azimut aralığı ile karakterize edilir. Düzen, optik verimlilikteki kesişme, atmosferik zayıflama ve kosinüs kayıp faktörleri için en iyi değerleri sağlayan en yoğun radyal kademeli konfigürasyonla başlar. Daha

sonra alan, konsektif heliostat sıraları arasındaki radyal aralık artırılarak genişletilir, böylece engelleme faktörü iyileştirilir ancak optik faktörler kötüleşir. Engelleme faktörü ile diğer optik faktörler arasındaki bu değiş tokuş, campo yerleşim optimizasyonunun kilit noktasıdır (Rizvi, Danish, El-Leathy, Al-Ansary, ve Yang, 2021).

Graphical method (Grafik Metot); her bir yarıçap için arazi yarıçapını maksimize ederek ve araziyi daha verimli kullanmayı sağlar. Heliostatlar arasındaki kayıpları önlemeye yardımcı olur. Bu amaçla araziye yeni bir halka ekleneceğini ya da mevcut kuşağa bir satır ekleneceğini kendi belirler. Bunlar trigonometrik hesaplamalar iler yapılır.

Heliostat alanının performansı verimlilik için en önemli etkendir. Üretilecek güç alıcı tarafından net bir şekilde alınan güneş ışını ile orantılıdır. Optik kayıplar, cosinus etkisi, gölgeleme ve engelleme kayıpları, kusurlu ayna yansıtma, atmosferik zayıflama, alıcı kayıpları heliostat alanlarında performansı etkileyen unsurlardır. Heliostatlar birbirine yakın olduklarından dolayı, birbirlerini gölgeleyebilmektedir. Maliyet ve arazi açısından birbirine yakın heliostatlar avantaj sağlasa da gölgeleme enerji üretimini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle heliostatlar alan içinde dikkatli dağıtlması gerekmektedir. Her bir heliostatın birbirlerini gölgelemeden dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir (Mutuberria et al., 2015; Siala ve Elayeb, 2001).



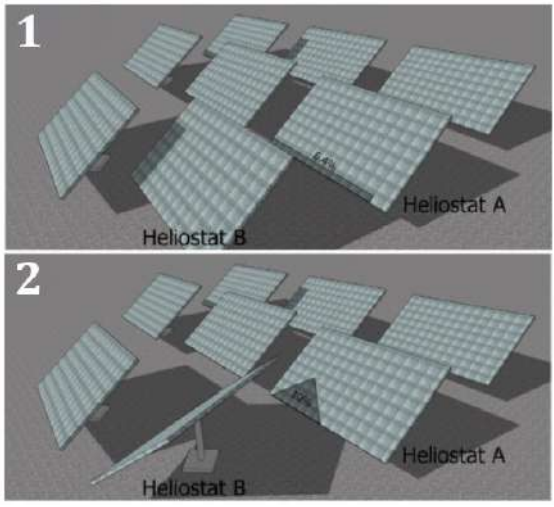
Şekil 4. Heliostat alanı için engelleyici olmayan radyal dağılım (Siala ve Elayeb, 2001)

Bu yöntem grafik metodu ismiyle anılır ve heliotstat alan yerleşimlerinde kullanılan önemli bir yöntemdir.

DELSOL; saha, alıcı boyutu ve kule yüksekliğini optimize etmek için kullanılan geometrik bir algoritmadır. Düşük enerji maliyetlerini elde etmek için kullanılır. Heliostat alanını ve heliostatlar arasındaki mesafeyi son derece verimli kullanacak şekilde ortaya koyar. Bölünmüş düzlem azimuth aralıklarında, azimuth önceki aralığa göre değiştirilir ya da yeni bir halka eklenir. Bitişik sıralanmalarda gölgelendirmeyi ve engellemeyi azaltır (Mutuberria et al., 2015; Sanchez ve Romero, 2006).

Fermat spiral (Fermat spirali); biyobenzetim (biomimetic) düzenleri oluşturmak için kullanılan bir yapıdır. Spiraller oluşturmak için denklemler belirlenir. Bu denklemler kule, radyal mesafe ve alan azimut açısını belirler (Mutuberria et al., 2015).

Birçok çalışma, heliostatların yansıtmadaki performanslarını artırabilmek için yapılmıştır. Merkezi alıcı sistemlerde böylelikle daha yüksek sıcaklıklar elde edilebilecektir ve termodinamik döngüde yüksek verimlilikle enerji elde edilebilecektir (Atif ve Al-Sulaiman, 2015). Tekli kule ile oluşturulan heliostat alanlarında heliostat yönelimlerin birim normal v vektör ($\vec{n}$) aynı kabul edilir. Bu nedenle buralardaki gölgeleme etkileri Sassi metodu ile basitçe hesaplanabilir. Bu etki Şekil 5'te gösterilmiştir. Birbirine yakı heliostatlar farklı gölgelendirme kayıplarına yol açmıştır. Şekil 5(1) üzerinde gösterilen yerleşimde Heliostat A'nın kaybı %6,4'tür. Şekil 5(2)'de ise Heliostat B pozisyonu değişince, Heliostat A üzerindeki kayıp %10'a çıkmaktadır (Piroozmand ve Boroushaki, 2016).



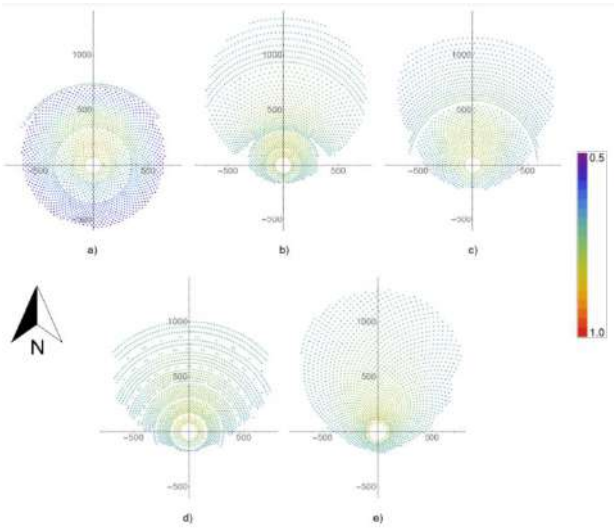
Şekil 5. Heliostatların gölge verimliliği (Piroozmand ve Boroushaki, 2016)

7. Heliostat Alan Yerleşimlerinin Enerji Üretimine Etkisi

Şekil 6'da tüm farklı algoritmalarla, 150 MWth enerji üreten bir santral için sonuçlar benzetim yöntemi ile elde edilmiştir. Tablo 1'de her bir algoritamada kullanılan parametreler gösterilmektedir. Kullanılan parametreler ile her algoritma, heliostatlar için farklı yerleşimlere karar vermiş ve bunlar sonucunda enerji verimliliği farklı olmuştur.

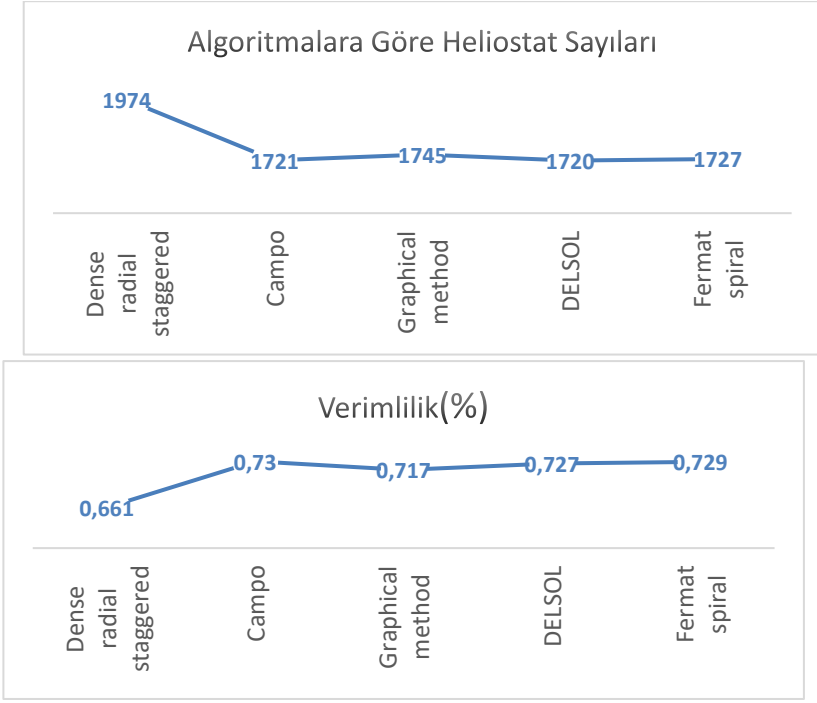
Tablo 1. 150 MWth heliostat alan algoritması (Mutuberria et al., 2015)

Algoritma	Parametreler	Heliostat Sayıları	Verimlilik (%)	Yıllık Enerji (GWth)
Dense radial staggered	dsep=8	1974	0,661	310.059
Campo	dsep=3; fbref=0.9	1721	0,730	298.029
Graphical method	dsep=0.7	1745	0,717	297.379
DELSOL	Nrad=35; expansionFactor=1.3; gapBetweenZones=16	1720	0,727	297.041
Fermat spiral	a=1.0; b=0.85	1727	0,729	299.180

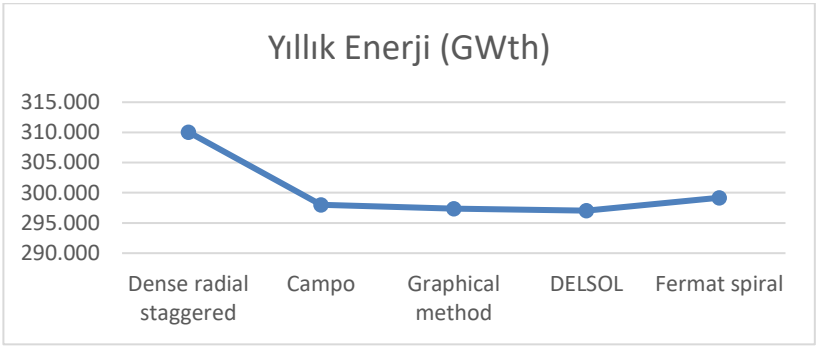


Şekil 6. Her algoritmanın Heliostat alan düzenleri (a) Dense Radial Staggered, b) Campo, c) Graphical Method, d) DELSOL and e) Fermat Spiral) (Mutuberria et al., 2015)

Şekil 6'da kullanılan tüm algoritmalar ve oluşturdukları heliostat alanları görülmektedir. Heliostatların yerleşiminde en verimli olanlar kuleye en yakın olanlardır. Radyal halkalar arttıkça ve heliostat yerleşimleri değiştikçe arkada kalan heliostatların verimi değişmektedir. Alıcılara gelen güneş ışınlarının toplanmasında her algoritma için farklı verimler elde edilmektedir. Bu verimler doğrudan olarak enerji üretimini etkilemekte ve farklılıklar yaratmaktadır. Bu benzetim örneğinde, Dense Radial Staggerd algoritması en az arazi alanını kullanarak saatte en fazla elektrik enerjisini üreten algoritma olmuştur. Ancak bunu en fazla heliostat sayısı ile başarmıştır bu nedenle verimlilik diğer algoritmalara göre düşük çıkmaktadır. Şekil 7'de algoritmaların grafikleri gösterilmiştir. En az heliostat sayısı ile enerji üreten DELSOL algoritması ise buna bağlı olarak en az enerjiyi üretmiştir, ancak diğer algoritmalara göre verimli bir yapısı vardır. Şekil 8 ise algoritmaların tamamının ürettiği enerji miktarlarını göstermektedir. Bu durumda enerji üretimi için, sadece heliostatların sayısı değil, tümünün verimli kullanılması ve alan üzerinde yayılımı da önemlidir. Arazi yapısı ve maliyetler hesaplandığında uygun algoritma buna göre seçilmelidir.



Şekil 7. Algoritmaların verimliliği ve heliostat sayısı (Mutuberria et al., 2015)



Şekil 8. Algoritmalar ve enerji üretimi (Mutuberria et al., 2015)

8. Kaynaklar

9. Alper, A., ve Oğuz, O. (2016). The role of renewable energy consumption in economic growth: Evidence from asymmetric causality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 953–959. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.123
10. Atif, M., ve Al-Sulaiman, F. A. (2015). Optimization of heliostat field layout in solar central receiver systems on annual basis using differential evolution algorithm. *Energy Conversion and Management*,*95*,1–9. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.089
11. Balghouthi, M., Trabelsi, S. E., Amara, M. Ben, Ali, A. B. H., ve Guizani, A. (2016). Potential of concentrating solar power (CSP) technology in Tunisia and the possibility of interconnection with Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 1227–1248. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.052
12. Barberena, J. G., Larrayoz, A. M., Sánchez, M., ve Bernardos, A. (2016). State-of-the-art of Heliostat Field Layout Algorithms and their Comparison. Energy Procedia, 93(March), 31–38. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.146
13. Besarati, S. M., ve Yogi Goswami, D. (2014). A computationally efficient method for the design of the heliostat field for solar power tower plant. *Renewable Energy*, *69*, 226–232. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.043
14. Bradford, T. (2006). Solar revolution: the economic transformation of the global energy industry. In *MIT Press Books* (Vol. 32). https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.03.002
15. Destek, M. A. (2016). Renewable energy consumption and economic growth in newly industrialized countries: Evidence from asymmetric causality test. *Renewable Energy*, *95*, 478–484. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.049
16. Erdil, A., ve Erbıyık, H. (2015). Renewable Energy Sources of Turkey and Assessment of Sustainability. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *207*, 669–679. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.137
17. Hossain, M. S., Madlool, N. A., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Pandey, A. K., ve Khan, A. F. (2016). Role of smart grid in renewable energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 1168–1184. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.098
18. Huang, W., ve Xu, Q. (2014). Development of an analytical method and its quick algorithm to calculate the solar energy collected by a heliostat

field in a year. *Energy Conversion and Management*, *83*, 110–118. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.065

19. Kannan, N., ve Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 1092–1105. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022
20. Khatib, T., Mohamed, A., ve Sopian, K. (2012). A review of solar energy modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(5), 2864–2869. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.064
21. Ma, Z., Mehos, M., Glatzmaier, G., ve Sakadjian, B. B. (2015). Development of a Concentrating Solar Power System Using Fluidized-bed Technology for Thermal Energy Conversion and Solid Particles for Thermal Energy Storage. *Energy Procedia*, *69*, 1349–1359. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.136
22. Manente, G., Rech, S., ve Lazzaretto, A. (2016). Optimum choice and placement of concentrating solar power technologies in integrated solar combined cycle systems. *Renewable Energy*, *96*, 172–189. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.066
23. Mutuberria, A., Pascual, J., Guisado, M. V., ve Mallor, F. (2015). Comparison of Heliostat Field Layout Design Methodologies and Impact on Power Plant Efficiency. *Energy Procedia*, *69*, 1360–1370. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.135
24. Piroozmand, P., ve Boroushaki, M. (2016). A computational method for optimal design of the multi-tower heliostat field considering heliostats interactions. *Energy*, *106*, 240–252. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.049
25. Pisirir, O. M., ve Bingol, O. (2016). Industrial PC based heliostat control for solar power towers. *Acta Physica Polonica A*, *130*(1), 36–40. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.36
26. Pittsburg, U. (2016), *The Solar Power Towers of Seville, Spain.* 08.10.2016 tarihinde http://www.pitt.edu/~viv14/images/6035949-fig-8-large.gif adresinden alındı.
27. Rizvi, A. A., Danish, S. N., El-Leathy, A., Al-Ansary, H., ve Yang, D. (2021). A review and classification of layouts and optimization techniques used in design of heliostat fields in solar central receiver systems. *Solar Energy*, *218*(October 2020), 296–311. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.011

28. Sahoo, S. K. (2016). Renewable and sustainable energy reviews solar photovoltaic energy progress in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *59*, 927–939. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.049
29. Sanchez, M., ve Romero, M. (2006). Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces. *Solar Energy*, *80*(7), 861–874. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.014
30. Siala, F. M. F., ve Elayeb, M. E. (2001). Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout. *Renewable Energy*, *23*(1), 77–92. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00159-2
31. Amusing Planet (2022), *The Solar Power Towers of Seville, Spain.* 01.12.2022 tarihinde http://www.amusingplanet.com/2013/08/the-solar-power-towers-of-seville-spain.html adresinden alındı.
32. Wei, X., Lu, Z., Wang, Z., Yu, W., Zhang, H., ve Yao, Z. (2010). A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant. Renewable Energy, 35(9), 1970–1975. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.026
33. Yang, S., Lee, K., ve Lee, I. (2020). Pattern-free heliostat field layout optimization using physics-based gradient. Solar Energy, 206(August 2019), 722–731. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.029

KÜRESEL GELİŞMELER IŞIĞINDA TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ

Doç.Dr.Ramazan ŞENOL

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye,
ramazansenol@isparta.edu.tr

Bu çalışmada dünya genelinde yaşanılan gelişmeler ışığında Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim ve alt yapı durumları ele alınmıştır. Özellikle son dönemlerde gerçekleşen küresel olaylar sebebi ile derinleşen enerji krizi temiz ve yenilenebilir enerjiye doğru olan geçişleri hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerjilerin bu ve benzeri krizlerin çözümü noktasındaki kilit rolü bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Özellikle, rüzgar ve güneş Fotovoltaik teknolojiler sayesinde, Avrupa Birliği'nin enerji sektörünün Rusya Federasyonu'na olan doğal gaz bağımlılığını 2023 yılına kadar azaltma potansiyeli olduğuna işaret etmektedir. Rusya'nın Ukrayna'yı işgal etmesinin ardından özellikle Avrupa'da 2022 ve 2023 yıllarının enerji tedariği açısından zorlu geçeceği tahmin edilmektedir [1]. Mevcut yüksek enerji fiyatlarından dolayı uzun vadeli enerji geleceğinin neler getireceğini görmek oldukça zordur. Pandeminin talep şoku ve Rusya'nın Ukrayna'yı işgaliyle gelen arz şoku dikkate alındığında, küresel enerji krizlerinin kaçınılmaz olabileceği ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, enerji piyasalarındaki mevcut türbülans göz ardı edilmemelidir. Avrupa'nın yenilenebilir enerji ağırlıklı bir enerji sistemine daha hızlı geçiş yapma isteği göz önünde bulundurulduğunda yüksek enerji fiyatları sebebiyle başka ülkelerde temiz enerjiye yapılan yatırımların azalma ihtimali görünmektedir. Yüksek fiyatların enerji tüketicileri arasında enerji tasarrufu davranışını teşvik edeceği gerçeği de göz ardı edilmemelidir. Enerji sistemimizde verimlilik kazanımlarının ekonomik büyüme hızını aştığı uzun bir döneme giriyoruz. Teoride bu, politika yapıcılara geçişi hızlandırmak için güven sağlamalıdır. Cesur ve cesur politika seçimleri, iklim değişikliği karşısında kritik öneme sahiptir. Yaşanan olağan dışı gelişmeler ışığında Dünyanın fosil yakıt kullanımını tamamen bırakmasının mümkün olmadığını düşünülürse, 2050'de %13'lük bir fosil yakıt kullanımı olabileceği öngörülmektedir. Fosil yakıt kullanımının aşılması durumunda ise 2040'larda karbon yakalama ve giderme çabaları için büyük harcamalar gerektireceği ve bunun da yılda 1 trilyon ABD dolarına ulaşacağı öngörülmektedir [2].

Covid 19 Pandemisinin ortaya çıkardığı tedarik zinciri zorlukları, inşaat gecikmeleri ve hammadde için rekor düzeydeki emtia fiyatlarının artışının devam etmesine rağmen, yıllık yenilenebilir kapasite ilaveleri 2021'de %6 artarak neredeyse 295 GW'a çıkarak yeni bir rekor kırmıştır. Güneş Fotovoltaik ve rüzgar maliyetlerinin, artan emtia fiyatları nedeniyle 2022 ve 2023'te pandemi öncesi seviyelerden daha yüksek kalması beklenmektedir. Ancak, doğal gaz ve kömür fiyatlarındaki çok daha yüksek artışlar nedeniyle yenilenebilir teknolojilerin rekabet güçleri de artmaktadır. Yenilenebilir kapasitenin 2022'de %8'in üzerinde artarak yaklaşık 320 GW'a ulaşması beklenmektedir. Biyoyakıt talebindeki

büyümenin 2022'de yıllık %5 ve 2023'te %3 artmasını beklenmektedir. Öte yandan, artan hammadde fiyatları kısa vadede büyümeyi yavaşlatmaktadır. Rusya'nın Ukrayna'yı işgali ise özellikle bitkisel yağlar olmak üzere biyoyakıt hammaddeleri için zaten yüksek fiyatlı olan ortam üzerinde yukarı yönlü baskı oluşturmaktadır [1].

Ukrayna'daki savaş nedeniyle yüksek enerji fiyatları ve enerji güvenliğine olan kaygıların artması sebebiyle

Avrupa'nın Ukrayna'daki savaş sırasında ve sonrasında yenilenebilir enerjiye geçişinin hızlanması beklenebilir. Özellikle Avrupa'nın ithal ettiği Rus fosil yakıt kaynaklarının hızlı bir şekilde kullanımdan kaldırılarak, yenilenebilir enerji ağırlıklı bir enerji sistemine geçilmesi ve enerji verimliliğini hızlandıracak önlemlerle donatılmış bir enerji güvenliğinin sağlanması Avrupa'nın enerji gündeminde ön planda olacağı düşünülmektedir. Enerji güvenliği, sürdürülebilirlik, karşılanabilirlik, doğal gaz ve elektrik için rekor yüksek fiyatlar kısa vadede önemli bir sorundur. Ülkeler başlangıçta arzın çeşitlendirilmesine odaklanarak bazı fosil kaynaklarına kısa vadeli bir destek sağlamasını düşünebilir ancak ana politika olarak, öncelikle yenilenebilir enerjiye dayalı bir enerji bağımsızlığına yönelmek ve bunu mümkün olduğunca erken yapmak büyük önem arz etmektedir. Avrupa dışında ve özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde, yüksek enerji ve gıda fiyatları artı küresel durgunluk riskinin artması, dikkatleri kısa vadeli önceliklere kaydırmaktadır. Bu sebeple uzun vadeli iklim değişikliği yatırımlarının ve elektrik altyapısının inşası gibi eylemlerin ertelenmesi söz konusu olabilir. Yüksek fiyatlı LNG, kısa vadeli bir kömür kullanımının canlanmasına yol açabilir. Yenilenebilir kaynaklar yerel olmasına ve yerel enerji güvenliğini desteklemesine rağmen, yerli kömür ithal gaza göre daha avantajlı bir durum ortaya çıkarabilir.COP26'da, BM Sekreteri António Guterres, emisyonların rekor seviyelerde kalmaya devam etmesi sebebiyle küresel ısınmaya karşı acil eylemin aciliyetini vurguladı ve bunu insanlık için bir Kırmızı Kod olarak nitelendirdi. COP26'da kömürün azaltılması, metan gazının azaltılması ve arazi kullanımı değişiklikleri gibi önemli konularda anlaşmalar yapılmasına rağmen bu anlaşmaların genellikle ulusal politika planlarına veya eylemlerine yansıtılmadığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji harcamalarının önümüzdeki 10 yılda iki katına çıkarak yılda 1,400 milyar ABD dolarını aşması beklenirken, şebeke harcamalarının da 2030'da yılda 1.000 milyar ABD dolarını aşması beklenmektedir. Elektrifikasyonla bağlantılı önemli verimlilikler ve yenilenebilir kaynakların düşen maliyetleri nedeniyle, dünya 2050 yılına kadar GSYİH'nın bir oranı olarak enerjiye çok daha az harcama yapması muhtemeldir [2].

Önümüzdeki 30 yıl içinde elektriğin küresel enerji karışımındaki payı %19'dan %36'ya yükselecek ve elektrik üretimi iki katından fazla olacağı tahmin edilmektedir. Fosil yakıtların elektrik karışımındaki payı şu anki %59'dan 2050'de sadece %12'ye keskin bir şekilde düşmesi planlanmaktadır. Güneş fotovoltaik teknolojisi ve rüzgar enerjisi, çoğu yerde halihazırda en ucuz elektrik üretimidir. 2050 yılına kadar güneş fotovoltaik teknolojisi ile üretim 20 kat ve rüzgar enerjisi ile üretim 10 kat büyüyeceği öngörülmektedir. Güneş fotovoltaik teknolojisi ile elektrik üretimi, 2050'de üretilen elektriğin %38'ini oluşturacağı ve rüzgarın ise bu pastada %31'lik bir paya sahip olacağı düşünülmektedir. Nükleer enerjinin ise, yüksek maliyetleri ve uzun tedarik süreleri nedeniyle mevcut üretim seviyelerini biraz artırmayı başarsa da elektrik üretimindeki payının azalacağı öngörülmektedir [2].

Türkiye ve Yenilenebilir Enerji

Enerji yoğunluğu ülke veya bölge bazında bir birim GSYH üretebilmek için ne kadar enerji gerektiğini ölçen bir enerji verimliliği göstergesidir. Gerekli enerji miktarı, ülkede toplam arz edilen, dönüşüme uğramamış enerji cinsinden ise birincil enerji yoğunluğundan; sanayi, konut, ulaştırma gibi sektörlerin nihai olarak tükettiği enerji cinsinden ise nihai enerji yoğunluğundan söz edilir [3]. Enerji yoğunluğundaki eğilim; ekonomi ve sanayideki yapısal değişiklikler, enerji tüketim yapısındaki değişimler, sektörlerin verimlilik gelişimi ve nihai kullanıcıların tercih ettiği cihaz ve ekipman gibi unsurlardan etkilenmektedir. Tablo 1 incelendiğinde Türkiye'nin 2021 yılı birincil enerji yoğunluğu 0,141 tep/bin 2015$, nihai enerji yoğunluğu ise 0,110 tep/bin 2015$ olarak hesaplanmıştır. 2021 yılında bir önceki yıla göre birincil enerji yoğunluğunda %2,7; nihai enerji yoğunluğunda %2,2 azalma gerçekleşmiştir. 2000 yılına göre bir kıyaslama yapıldığında ise birincil enerji yoğunluğunda %26,6; nihai enerji yoğunluğunda %26,4 oranında iyileşme söz konusudur.

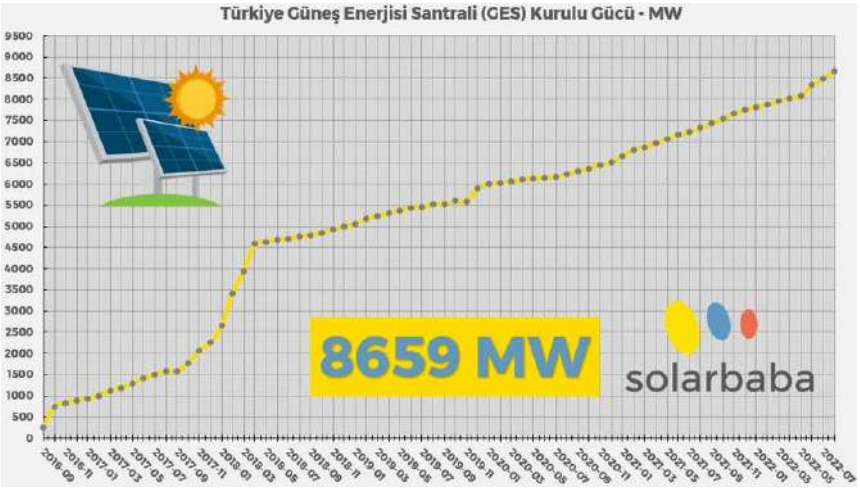
Tablo 1. Türkiye'nin Birincil ve Nihai Enerji Yoğunluğu [3].

Göstergeler (tep/bin 2015$)	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**	**2021**
Birincil Enerji Yoğunluğu	0,192	0,169	0,172	0,149	0,145	0,141
Nihai Enerji Yoğunluğu	0,149	0,134	0,130	0,115	0,112	0,110

Uluslararası bir karşılaştırma yapılacak olursa; Türkiye'nin 2020 yılı için 0,145 tep/bin 2015$ olan birincil enerji yoğunluğu dünya ortalamasından (0,171 tep/bin 2015$) daha düşük olmakla birlikte OECD ortalamasının (0,102 tep/bin 2015$) üzerindedir. Avrupa Birliği ülkelerinin birincil enerji yoğunluğu

ortalaması 0,094 tep/bin 2015$ olup gerek OECD ülkelerine gerekse Türkiye'ye kıyasla daha iyi bir seviyede olduğu görülmektedir [3].

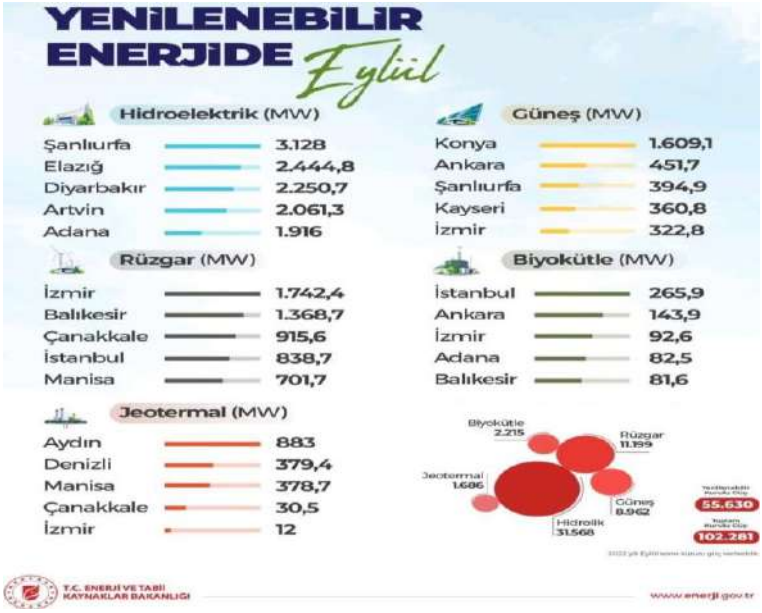
ENERJİ ve Tabii Kaynaklar Bakanı Fatih Dönmez'in TBMM Plan ve Bütçe Komisyonunda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın bütçe sunumunda verdiği bilgilere göre, Türkiye'nin "Ekim sonu itibarıyla elektrik enerjisi kurulu gücü 103 bin 276 megavata ulaştığı. 2002 yılında 298 olan elektrik üretim tesisi sayısı, 38 katına çıkarak 2022 ekim sonu itibarıyla 11 bin 276'ya ulaştığı" olmuştur. Ayrıca Türkiye "Elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımına bakıldığında; 2022 yılının ilk 9 ayında toplam elektrik üretiminin yaklaşık yüzde 44'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından, yüzde 32'si kömürden, yüzde 22'si doğal gazdan sağlanmış olup, yerli ve yenilenebilir kaynakların payı yüzde 60 olarak gerçekleşmiştir". Yine "2022 yılının ilk 10 ayında işletmeye alınan elektrik üretim santral sayısının yüzde 94'nün yenilenebilir enerji kaynaklı olduğu" belirtilmiştir [4]. Türkiye güneş enerji santrali (GES) toplam kurulu gücünün 2016 ile 2022 yılları arasındaki değişimi şekil 1'de [5] görülmektedir. Güncel verilere göre Ekim 2022 sonunda bu değer 9120 MW değerine [6] ulaşmıştır.



Şekil 1.Türkiye güneş enerji santrali (GES) toplam kurulu gücünün yıllara göre değişimi [5].

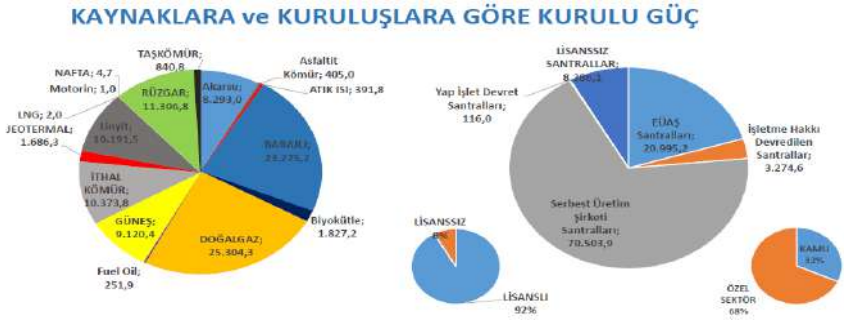
Şekil 2 incelendiğinde, kaynaklar bazında 5 önemli yenilenebilir enerji kaynağı için Türkiye'nin ilk 5 ili sıralaması Eylül 2022 için yapılacak olursa; Hidroelektrik –Şanlıurfa, Güneş-Konya, Rüzgar-İzmir, Biyokütle-İstanbul ve Jeotermal-Aydın olarak görünmektedir. Türkiye'nin Kurulu Güç Toplamı Eylül

2022'de 102.280,9 MW'a Yükselirken bu rakam Ekim 2022'de 103.275,8 MW olmuştur. TEİAŞ'ın verilerine göre, Ekim 2022'de kurulu güç içerisindeki en yüksek pay şekil 3 incelenecek olursa; 25.304,3 MW ile doğal gaz santrallerinin, sonrasında ise 23.275,2 MW ile barajlı kaynaklarının olmuştur. Rüzgar santrallerin kurulu gücü 11.306,8 MW, ithal kömür yakıtlı santrallerin kurulu gücü 10.373,8 MW olurken linyit santrallerinin kapasitesi 10.191,5 MW, güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücü 9.120,4 MW, akarsu tipi hidroelektrik santrallerin kurulu gücü 8.293 MW, jeotermalin 1.686,3 MW ve biyokütlenin 1.827,2MW olarak gerçekleşmiştir [6].



Şekil 2. Eylül 2022 için kaynaklar bazında 5 önemli yenilenebilir kaynağı için Türkiye'nin ilk 5 ili sıralaması [7].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç içindeki toplam payı 2022 yılı Ekim sonu itibarıyla %54,1 olmuştur. Lisanssız santrallerin toplam kurulu gücü 8 bin 386 megavata ulaşarak 2022 yılında ilk 9 ayda üretilen toplam elektriğin %4,5'i lisanssız santrallerden elde edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynak alanlarının ve bağlantı kapasitelerinin yatırımcılara tahsisiyle yatırımların hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla hayata geçirilen 'Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları' (YEKA) projelerindeki duruma bakıldığında; güneşte 3000 MW, rüzgarda ise 2850 MW olmak üzere toplam 5850 MW'lık yarışma yapılarak tesislerin devreye alma çalışmalarına devam edildiği görülmektedir [4].



Şekil 3. Türkiye için Ekim 2022 için kaynaklara ve kuruluşlara göre kurulu güç [6].

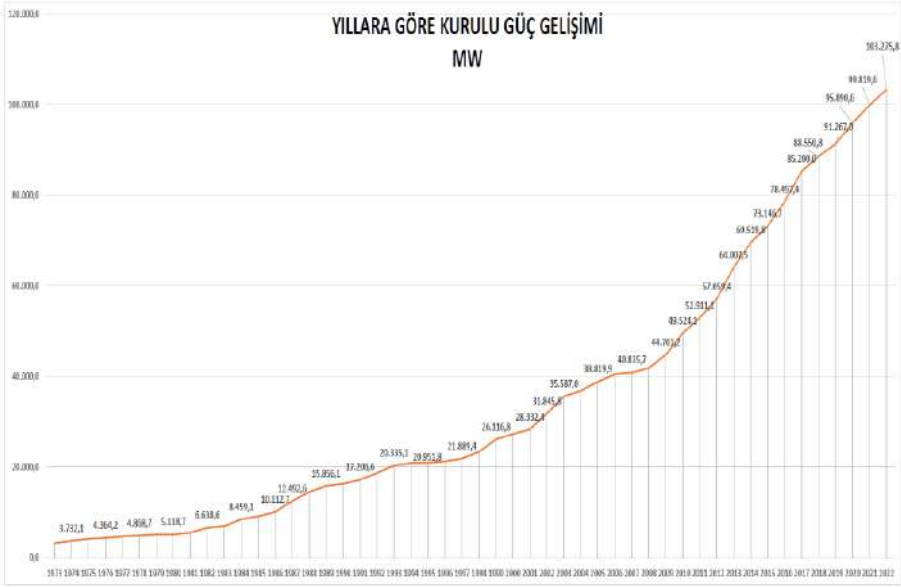
Türkiye'nin 2022 yılı Ekim Ayı için kaynaklara ve kuruluşlara göre kurulu güç Tablo 2'de, kaynaklara ve kuruluşlara göre santral adedi ise Tablo 3'de verilmiştir. Türkiye için yıllara göre kurulu güç gelişimi ise şekil 4'te görülmektedir.

Tablo 2. Türkiye için Ekim 2022 için kaynaklara ve kuruluşlara göre kurulu güç [6].

BİRİNCİL KAYNAKLARA VE KURULUŞLARA GÖRE KURULU GÜÇ (MW)						
BİRİNCİL KAYNAK	EÜAŞ Santralları	İşletme Hakkı Devredilen Santraller	Serbest Üretim Şirketi Santralları	Yap İşlet Devret Santralları	LİSANSSIZ SANTRALLAR	TOPLAM
Akarsu	56,3	671,7	7.532,6	16,0	16,4	8.293,0
Asfaltit Kömür	0,0	0,0	405,0	0,0	0,0	405,0
ATIK ISI	0,0	0,0	164,9	0,0	226,8	391,8
BARAJLI	10.781,6	574,5	9.439,1	100,0	0,0	20.275,2
Biyokütle	0,0	0,0	1.737,3	0,0	89,9	1.827,2
DOĞALGAZ	4.704,5	258,4	20.048,7	0,0	292,0	25.304,3
Fuel Oil	0,0	0,0	251,9	0,0	0,0	251,9
GÜNEŞ	0,0	0,0	1.411,3	0,0	7.709,1	9.120,4
İTHAL KOMUR	0,0	0,0	10.373,8	0,0	0,0	10.373,8
JEOTERMAL	0,0	15,0	1.671,3	0,0	0,0	1.686,3
Linyit	2.424,0	1.055,0	6.412,5	0,0	0,0	10.191,5
LNG	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	2,0
Motorin	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
NAFTA	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	4,7
RÜZGAR	17,4	0,0	11.207,8	0,0	81,6	11.306,8
TAŞKÖMÜR	0,0	0,0	840,8	0,0	0,0	840,8
TOPLAM	20.995,2	3.274,6	70.503,9	116,0	8.386,1	103.275,8

Tablo 3. Türkiye için Ekim 2022 için kaynaklara ve kuruluşlara göre santral adedi [6].

BİRİNCİL KAYNAKLARA VE KURULUŞLARA GÖRE SANTRAL ADEDİ						
BİRİNCİL KAYNAK	EÜAŞ Santralları	İşletme Hakkı Devredilen Santraller	Serbest Üretim Şirketi Santralları	Yap İşlet Devret Santralları	LİSANSSIZ SANTRALLAR	TOPLAM
Akarsu	7	69	514	1	18	609
Asfaltit Kömür	0	0	1	0	0	1
ATIK ISI	0	0	16	0	79	95
BARAJLI	37	24	79	1	0	141
Biyokütle	0	0	325	0	58	383
DOĞALGAZ	6	1	271	0	66	344
Fuel Oil	0	0	9	0	0	9
GÜNEŞ	0	0	38	0	9.165	9.203
İTHAL KOMUR	0	0	16	0	0	16
JEOTERMAL	0	1	62	0	0	63
Linyit	4	1	42	0	0	47
LNG	0	0	1	0	0	1
Motorin	1	0	0	0	0	1
NAFTA	0	0	1	0	0	1
RÜZGAR	2	0	271	0	85	358
TAŞKÖMÜR	0	0	4	0	0	4
TOPLAM	57	96	1.650	2	9.471	11.276



Şekil 4. Türkiye için yıllara göre kurulu güç gelişimi [6].

12. Türkiye Enerji Zirvesi'nde "Enerjide Dönüşüm" başlıklı TÜSİAD Özel Oturumu'nda, TÜSİAD Yönetim Kurulu Başkanı Orhan Turan'ın ana tema konuşmasında değindiği hususlar oldukça önem arz etmektedir. Bu hususlar aşağıda verilmiştir.

"…….

1. *Net-sıfır emisyon hedefi doğrultusunda enerji kaynak dağılımı, enerji verimliliği ve enerji yoğunluğu hedeflerini belirlemek, enerji arz/talep dengesini ve gerekli rezervleri gözeten sağlıklı bir plan yapmak.*
2. *Enerji tasarrufu ve enerji verimliliğinin tüm sektörlere azami seviyede yaygınlaştırılmasına yönelik somut hedefleri uygulamaya koymak; tasarımdan, ürün geliştirmeye ve üretim süreçlerine entegrasyona uzanan bir perspektifte dönüşüm için teşvik mekanizmalarını devreye almak.*
3. *Yenilenebilir enerji projelerinin sisteme hızla entegre edilmesini sağlamak amacıyla ihale yöntemlerini, teşvik mekanizmalarını gözden geçirmek ve yalın izin süreçlerini hayata geçirmek.*
4. *İletim ve dağıtım altyapılarını yenilenebilir kaynakların entegre edilmesini sağlayacak, kesintisiz ve kaliteli enerjiyi tüketiciye ulaştıracak şekilde güçlendirmek; tüketime yakın dağıtık üretim anlayışı ile tüketicinin kaliteli ve ekonomik enerjiye ulaşılabilirliğini artırmak.*

5. *Yenilenebilir dönüşümü destekleyen ve hızlandıracak olan depolama ve hidrojen teknolojileri, mikro-şebeke yönetimi, dijitalizasyon gibi yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması için teşvikleri artırmak, standartları belirlemek ve ilgili mevzuat düzenlemelerini hazırlamak.*
6. *Yenilikçi ve alternatif yeşil finansman modellerinin uygulanabileceği serbest piyasa koşullarını sağlamak ve mevzuat düzenlemelerini hayata geçirmek.*
7. *Enerji fiyatlarının serbest piyasa ilkelerine göre belirlenmesini engelleyen, piyasada şeffaflığı ve öngörülebilirliği kısıtlayan müdahalelerden kaçınmak, kamu müdahaleleri kaçınılmaz olduğu durumlarda fiyatların arz talep dengesine göre oluşması temel kuralına hızla geri dönmek.*
8. *Enerji fiyatlarındaki artış karşısında verilen destekleri AB uygulamalarına benzer şekilde önceliklendirilmiş sosyal gruplara, tarım ve sanayi sektörlerine dönük olacak şekilde sağlamak.*
9. *Türkiye'nin üç kıtayla olan bağlantı avantajını maksimum şekilde değerlendirmek; enerji merkezi ve terminali hedeflerini güçlendirilmek.*

Türkiye hiç şüphesiz bu alanların hepsinde önemli adımlar attı ve atmaya da devam ediyor. Biz de hem iklim krizi ile mücadele, hem enerjide arz güvenliğini sağlama hem de yüksek enerji fiyatlarının iş dünyasına ve tüketicilere maliyetini azaltma hedeflerimiz açısından bu çabaların hızlandırılması ve güçlendirilmesi gerektiğini düşünüyoruz. " [8].

Sonuç

Sonuç olarak enerji jeopolitiğinde kalıcı bir değişimin yaşandığı bir süreçten geçilmektedir. Yenilenebilir ve güvenilir enerji temini doğrultusunda Türkiye'nin de bu değişimin önemli bir aktörü olması fırsatını iyi değerlendirmesi gerekmektedir. Bu amaçla enerji politikalarının doğru planlanması ve yapısal gerekliliklerin hızlı bir şekilde yerine getirilmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

1. Renewable Energy Market Update 2022 Highlights Outlook for 2022 and 2023. International Energy Agency, https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022.
2. Energy Transition Outlook 2022. DNV Group, https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html
3. Enerji Verimliliği Veri Analizi Serisi. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı Planlama ve Denetim Daire Başkanlığı Ölçme ve Değerlendirme Grubu. 2022. https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EVCED/tr/EnerjiVerimlili%C4%9Fi/%C3%96l%C3%A7meveDe%C4%9Ferlendirme/Belgeler/Enerji_Yog2021.pdf
4. Sabah, 2022. https://www.sabah.com.tr/gundem/2022/11/16/bakan-donmez-yenilenebilir-kaynaklarin-payi-yuzde-60-olarak-gerceklesmistir
5. SOLAR STK, 2022. https://solarstk.org/infografik-turkiye-gunes-enerjisi-santrali-kurulu-gucu/
6. Kurulu Güç Raporları, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 2022. https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari
7. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022. https://twitter.com/TCEnerji/status/1586818216059318272
8. Tüsiad, 2022. https://tusiad.org/tr/basin-bultenleri/item/11138-12-turkiye-enerji-zirvesi-tusi-ad-ozel-oturumunda-arz-guvenliginden-surdurulebilirlik-finansmanina-ve-yenilenebilir-donusume-kadar-enerji-sektorune-iliskin-onemli-konular-degerlendirildi.

AKUAPONİK SİSTEMLERDE UV FİLTRELERİN İNCELENMESİ

Burcu ÇELİK[1],
Doç.Dr.Ramazan ŞENOL2[1],
Dr. Öğr. Üyesi Halit BAYRAK[3]

[1]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
[2]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Türkiye, ramazansenol@isparta.edu.tr
[3]Süleyman Demirel Üniversitesi Su Enstitüsü,
Türkiye, halitbayrak@sdu.edu.tr

Giriş

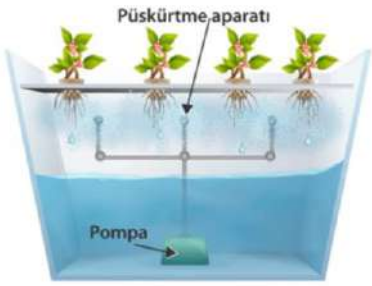
Dünyanın artan nüfus yoğunluğu sebebiyle, insanların gıda ve içilebilir suya olan erişimlerinde yakın gelecekte çok büyük problemler yaşayacağı öngörülmektedir. Gıda ihtiyacının karşılanması noktasında; topraksız tarımın ve su kaynaklarından (denizlerden ve tatlı sulardan) elde edilen su ürünlerinin büyük bir öneme sahip olacağı da açıktır. Özellikle içme suyu olarak kullanılan tatlı su kaynaklarının sınırlı ve bazı bölgeler için de erişilebilir olma noktasında problemler içerdiği göz önünde bulundurulduğunda, bu kaynakların gıda temini için su ürünlerinin üretiminde mi yoksa içme suyu temininde mi kullanılacağı tartışma konusudur. Bu kaynakların su ürünlerinin üretiminde kullanılması durumunda su ürünlerinin metabolik faaliyetleri sonucunda suya bırakılan fosfor ve azot gibi elementlerle yüklenmiş sular doğaya bırakılmaktadır. Azot ve fosfor, sudaki ekosistemin bir parçası olmakla birlikte bu elementlerin fazla olması, hem havada hem suda kirliliğe yol açmaktadır. Havadaki azot kirliliği çoğunlukla görülemiyor ancak su kaynakları veya denizler, kirlilikten dolayı yeşil bir renge dönüp köpürmeye başlıyor. Azot fazlalığı, su içerisinde yosun gelişimini hızlandırarak ekosistemin gereğinden fazla yosunla başa çıkamamasına yol açmaktadır. Bozulan su kalitesi sebebi ile sudaki canlıların yaşamlarını sürdürebilmek için ihtiyaç duydukları oksijen miktarı karşılanamamaktadır. Bu durum sadece su canlıları için değil aynı zamanda insanlar için de tehlikeli olmaktadır. Bu suları içme suyu ve/veya kullanım suyu olarak kullananlar ile bu sularda yetişen canlılar ile beslenenler Bakteri ve toksin içeriği sebebi ile hasta olmaktadırlar. Sudaki canlılarının atığı olarak suya aktarılan ve hem su hem de insanlar için zararlı hale gelebilen bu elementler bitkiler için hayati öneme sahip besinler olmaktadır. Su içerisinde köklendirilebilen ve gelişimi için gerekli besinleri sudan alan sebze veya bitkiler hidroponik olarak adlandırılan ortamlarda yetiştirilebilmektedir. Son yıllarda uygulama sayısını artıran bu sistemleri su ürünlerinin yetiştirildiği ortamlarda uygulamak oldukça popüler ve faydalı bir sistem olarak karşımıza çıkmakta ve Akuaponik sistem olarak adlandırılmaktadır. Akuaponik sistem topraksız (hidroponik) sistemlerde yetiştirilecek olan bitkilerin, içerisinde balık gibi sucul organizmaların yoğun şekilde yetiştirildiği nütrient bakımından zengin sularla gübrelenerek yetiştirilmesini kapsayan bir tarımsal uygulamadır. Bu sistemlerin konvansiyonel topraklı yetiştiriciliğe kıyasla hızlı bitki gelişimi, düşük alan ihtiyacı, düşük su kullanımı, düşük düzeyde çevresel zarar etkisi, düşük sistem maliyetleri, artırılmış yetiştiricilik sezonu, düşük miktarda toprak kökenli bitki patojenleri ve tarım ürünlerinin çeşitlendirilmesi gibi çeşitli faydaları söz konusudur.

Topraksız Tarım Sistemleri

Topraksız tarım sistemleri aeroponik sistemler, hidroponik sistemler ve akuaponik sistemler olmak üzere 3'e ayrılmaktadır.

Aeroponik sistemler

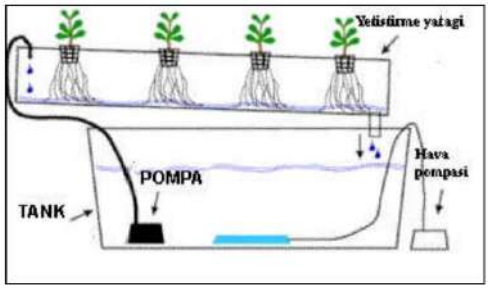
Aeroponik sistem besin eriyiklerinin bitki köklerine sis veya buhar halinde belirli aralıklarla veya sürekli olarak püskürtülmesiyle uygulanan yönteme denir. Aeroponik sistemde bitkiler köpüklere yerleştirilir ve bitki kökleri köpük altında havada asılı kalmaktadır. Işık geçirgenliği olmayan kapalı kutuların kullanılması alg gelişimini önler. Bitki köklerinin nemli olması ve besin çözeltisinin havalandırılması açısından 2-3 dakikada 1-2 saniye olacak şekilde mistleme yapılması yeterli olmaktadır. Su ve besinin alınması bitki köküne tutunan çözelti sisinden sağlanır. Aeroponik sistem daha çok seralarda uygulanmaktadır. Ispanak ve marul gibi sebzeler için uygun bir yöntemdir. Su, hava, ışık ve besin maddesi sistemin ana gereksinimleridir (Megep, 2008). Şekil 1'de aeroponik sistem görülmektedir.



Şekil 1. Aeroponik sistem (Anonim, 2015)

Hidroponik sistemler

Hidroponik sistem özel besin çözeltilerinin bitki köklerine belirli aralıklıklarla püskürtülerek ve katı ortam olmadan yetiştirilmesine denilmektedir. Hidroponik, destek olmadan besin çözeltisi kullanarak veya katı ortamda besin çözeltisi kullanarak bitki yetiştirmeye denilmektedir. Hidroponik sistemler açık ve kapalı sistemler olarak ayrılmaktadır. Açık hidroponik sistemlerde besin çözeltisi bir kez kullanılarak bitki köklerine tekrar verilmez. Kapalı hidroponik sistemlerde ise besin çözltisinin fazlası toplanıp tekrar dolaştırılır ve bitki köklerine verilir (Megep, 2008). Şekil 2'de hidroponik sistem görülmektedir.



Şekil 2. Hidroponik sistem (Megep, 2008).

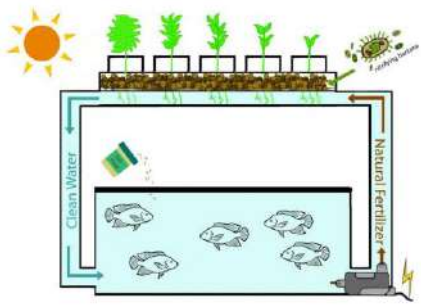
Akuaponik sistemler

Hidroponik tarımın akuakültür ile birleşiminden Akuaponik sistem oluşur. Akuaponik sistem için gerekli olan su, bitki ve balık kapları arasında devir daim halindedir. Balık atıkları bitkilerin besin ihtiyacının karşılanması açısından doğal gübre olarak kullanılmaktadır. Akuaponik sistem bileşenlerinden olan bitkiler, biyolojik olarak su arıtımını gerçekleştir ve yararlı bakteriler sayesinde de balık atıklarından besin elde edilmesini sağlarlar (Mukherjee, 2013).

Akuaponik sistemdeki balık atıklarında amonyak bulunur. Bitkilerin ihtiyacı olan azot ise Akuaponik sistemde bulunan bakteriler yardımıyla amonyağın önce nitrata daha sonra da nitrite dönüştürülmesini sağlar. Böylece bitkinin ihtiyacı olan azot nitritten karşılanmış olur (Ecolife, 2012).

Akuaponik sistemlerde suyun kirlilik oranının az olması en temel amaçtır. Bu suyun arıtma işlemi bitkiler tarafından yapılmaktadır. Bitkiler Akuaponik sistemde filtreleme işlemini üstlenerek su kirliliğinin azalmasını sağlarlar (Backyard Aquaponics 2007).

Balık sebze birlikteliği ile kurulan akuaponik sistemde balık atıkları bitkiler için gübre görevi görmekte, bitkiler ise balıklar için filtre görevi görmektedir. Bu sistemin kullanılmasının avantajı kültür balıkçılığın yarattığı kirliliğin önlenmesi, su tasarrufu sağlanması ve bitkiler için organik yoldan gübre elde edilmesidir. Akuaponik sistem diyagramı Şekil 3'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Akuaponik sistem diyagramı (Anonim, 2017)

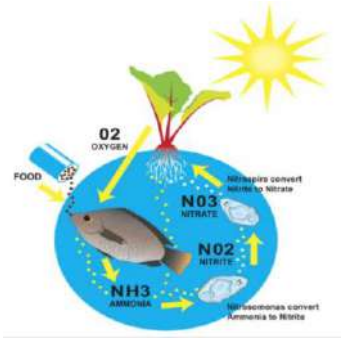
Akuaponik sistem diyagramından kısaca bahsedersek, sistem ilerleyişi şu şekildedir:

Akuaponik sistem içerisinde balık tankındaki balıklar atık üretir →

akvaryum içinde bulunan nitrifikasyon bakterileri atıkta bulunan amonyağı nitrite, nitriti de nitrata dönüştürür →

nitratta bulunan azot bitkiler için gübre olarak kullanılır →

en son olarak bitkilerin kullandığı azot ile nitrifikasyon bakterileri sayesinde filtrelenmiş suyun tekrar balık akvaryumuna geri dönüşü sağlanır. Akuaponik sistemde azot döngüsü aşağıda Şekil 4'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Akuaponik sistemde azot döngüsü (Anonim, 2017)

Mevcut Çalışmalar

Akuaponik ile ilgili ilk fikirler ve çalışmalar 1980'li yıllarda başlamış ve 1990'lı yıllarda teknolojinin gelişimine bağlı olarak hız kazanmıştır. Akuaponik üretim sistemi ile ilgili ilk çalışmalar Watten ve Busch (1984) ile Zweig (1986) tarafından yayınlanmıştır.

1990'lı yıllarda hız kazanan akuaponik sistem çalışmaları bazı araştırmacıların dikkatini çekmiştir ve yapılan araştırmalara göre çalışmalarda balık havuzlarına entegre edilen sebze türleri ile akuaponik sistemlerden başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu akuaponik sistemlerde insektisid veya antibiyotik kullanılmadan üretim yapılmasından dolayı sebze üretiminin organik tarım olarak kabul gördüğü bilinmektedir (Rackoy ve ark., 2006).

Rackoy (1995), balık üretim sistemleri için biyolojik filtrasyonun istenilen bir durum olduğunu ve akuaponik sistem modelleri ile de biyolojik filtrasyon sisteminin doğal yoldan oluşturulabileceğini, haricen filtrasyon sistemi kurulumunda gereken giderlerin de bu yolla giderilebileceğini belirtmiştir.

Aydın (2018), yaptığı çalışmada çakıl ve sal sistemi olmak üzere iki farklı hidroponik sistem kurarak kıvırcık marul yetiştirilmesinde bu sistemlerden hangisinin daha uygun olacağını karşılaştırmaktadır. Denemede nil tilapia türü balık kullanılmıştır. Kurulan bu sistemlerde biyolojik filtre kullanılmamasının

balık sağlığı ve gelişimi açısından olumsuz bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda çakıl sistemine göre sal sisteminde yetiştirilen marulların gelişiminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kapalı devre balık yetiştiriciliği için hem çakıl hem sal sisteminde kıvırcık marul yetiştirilmesinde rahat bir şekilde kullanılacağı görülmüştür.

Selek (2017), yaptığı çalışmada balık ve bitki üretiminin birlikteliği ile oluşturulan akuaponik üretim yöntemiyle tilapia ve fesleğen yetiştiriciliği yapılmıştır. Sudaki besin elementlerine bağlı olarak balıkların büyümesi, gelişmesi ve yem değerledirme analizleri, bitkilerin ise kök ve gövde gelişimleri incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen verilerden tilapia yetiştirilmesi ve bitki birlikteliğiyle oluşturulan akuaponik sistemde, balık tankında bulunan sudaki atıkların bitki gelişiminde nutrient olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Böylece çevre dostu, sürdürülebilir ve su kaynaklarının verimli kullanılacağı bir sistem olacağı sonucuna varılmaktadır.

Palazekin (2019), yaptığı çalışmada kapalı laboratuvar ortamında bir akuaponik sistem kurulmuş tilapia ve kıvırcık marul gelişimi için deneysel parametreler incelemiştir. Eş zamanlı olarak iki sistem kurulmuş bir tanesine adsorbiyon ünitesi ilave edilerek balıklardaki büyüme performansı, yem değerlendirilmesi ve marulun kök, gövde gelişimi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda balık ve bitki birlikteliğiyle oluşturulan akuaponik sistemde balık atık suyunun içerisindeki amonyum nitrifikasyon bakterileri ile bitkinin kullanabileceği forma dönüştürülerek değerlendirilmiştir. Böylece su kaynaklarından verimli bir şekilde yararlanıldığı görülmektedir.

Kapalı devre üretim modellerinde su filtrasyon işleminden geçirilerek arıtılmakta ve yeniden kullanılabilmektedir. Normal üretim sistemlerinde ise su bir kerelik kullanıma sahip olup kullanımdan sonra doğaya bırakılmaktadır. Akuaponik sistemlerde ise bitkiler suda bulunan azot ve fosfor besin elementlerini kökleri ile alarak filtrasyon işleminin doğal yoldan gerçekleşmesini sağlamaktadır. Akuaponik sistemdeki bu doğal filtrasyon sistemi ile bitkinin gerekli besin elementlerini alarak üretiminin yapılması aynı zamanda da yapay filtrasyon sisteminin maliyetinin azaltılması amaçlanmaktadır.

Goodman (2011), yaptığı çalışmada akuaponik sistemlerde hem balık hem bitki yetiştiriciliğinin aynı sistemde ekonomik olmadığını, farklı yöntemler geliştirilerek ekonomik olabileceğine değinmiştir. Mevcut bir işletme üzerine akuaponik sistem eklendiğinde ise su kaynağı, arazi vb. masraflar açısından yeni yatırıma göre kazançlı olabileceğini vurgulamıştır.

Güzel ve ark.(2014), yaptıkları çalışmada sazan balığı ve marul bitkisinin akuaponik sistemde hidroponik sisteme göre daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişler ve bu akuaponik sistemin suyun temizlenerek tekrar tekrar

kullanılmasına imkan sağladığına, balık ve sebzelerin sağlıklı bir şekilde birlikte yetiştirildiği sonuçlarına ulaşmışlardır. Akuaponik sistemde yapılan çalışmada marulda oluşan galeri parazitine rağmen marulların istenilen boyuta ulaşamadığı yine de akuaponik sistemdeki marulların durumlarının iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada kullanılan biyolojik filtre balık tankından çıkan suların temizlenmesinde kullanılarak suyun arıtılması sağlanmıştır. Ancak yapılan kimyasal analizlerde kullanılan biyolojik filtrenin suyu yeterince arıtmadığı gözlemlenmiştir. Mevcut biyolojik filtre sistemi yerine daha büyük ve daha kapsamlı filtre kullanımının daha sağlıklı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Graber (2009), akuaponik ve hidroponik sistem kullanarak domates, patlıcan, hıyar bitkileri ve Tilapia, Levrek balık türleri üzerinde yaptığı çalışmalarda iki sistem karşılaştırıldığında elde edilen sebze miktarının birbirine yakın olduğu sonucuna ulaşmıştır. Akuaponik sistemde balık tankındaki atık suların besleyici elementlere dönüştürülerek yararlanılması durumunda karlı olunabileceğini bildirmiştir.

Lastiri ve ark. (2016), yaptıkları matematiksel modelli araştırmada 1000m^2 hidroponik sistem ve 40m^3 balık tankları ile yıllık 75 ton domates ve 5 ton tilapia elde etmişlerdir. Bitkiler balık tanklarındaki NO_3 seviyesini %35 azaltmakta, balıklar ise bitkiler için gerekli olan azotun %26'sını karşılamaktadır.

Shete ve ark. (2013), akuaponik sistemde japon balığı ve ıspanak bitkisi kullanarak su devir daimini 4,8,12 ve 24 saatte 4 farklı grupta yapmışlardır ve en yüksek verimde bitki ve balık gelişimini 12 ve 24 saatlik su devir daiminde elde etmişlerdir.4 farklı grupta da balıkların yaşama oranı %100 olarak bulunmaktadır. 24 saatlik su devir daiminde balıklar en yüksek canlı ağırlığına sahip çıkmaktadır. 24 saatlik periyotta daha büyük büyüme oranına sahip olunsa da 12 saatlik periyotla arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Yapılan çalışmada 12 saatlik periyotla su devir daimi yapılmasının akuaponik sistemin ekonomikliği açısından uygun olacağı belirtilmiştir.

Wahyuningsih ve ark. (2015), atık zot miktarını azaltmak için yaptıkları çalışmada tilapia, marul bitkisi ve bakteri birlikteğiyle azotun en aza indirgenebileceğini bulmuşlardır.

Gökvardar (2013), yaptığı çalışmada akuaponik sisteme levrek ve marul bitkisini media- filled yatak sistemi ile entegresini sağlamıştır. Çalışmada kullanılan levreklerin ortalama ağırlığı 27,9 gr olarak çalışmaya başlanmış ve 100 günün sonunda levrekler 44 gr canlı ağırlığa ulaşmışlardır. Sonucunda balık türünde levrek kullanımının akuaponik sistemler için uygun olduğu belirtilmiştir.

Ultraviole ışık kaynakları ile su temizliği uygulamaları gelişen teknoloji ile birlikte popülerlik kazanmıştır. Bu konuda akademik veya ticari çalışmalar mevcut olup aşağıda değinilmiştir.

Yapılan bir çalışmada akuaponik bir sistemde yetiştirilen fesleğen, marul ve baramundi bitkileri için UV işleminin gıda güvenlik durumu üzerine etkisini ve mikrobiyal organizmalar için etkisini incelemişlerdir. UV işlemini hidroponik ünitenin çıkışına yerleştirerek sadece balık tankı için UV işleminin etkisi gözlemlenmiştir. UV işlemi yapılırken suyun akış hızı ile ilgili değerlendirme yapılmamıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak da akuaponik sistemde kullanılan UV işleminin koliform ve aerobik plaka sayısını azaltmada etkisinin olmadığını ileri sürmüşlerdir (Elamulai vd., 2017).

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Görüleceği üzere akuaponik sistemlerde; hem su ürünlerinin yetiştirilmesi hem de bitki veya sebze üretiminin sağlanması noktasında ultraviole ışık kaynaklarının etkisi üzerine çalışma oldukça az olup yapılan bu çalışmalardaki hem ultraviole ışık kaynaklarının dalga boyu aralıklarının hem de UV filtrasyon sonrasında ultraviole ışık kaynaklarının su ve sebze veya bitki üzerine olumlu / olumsuz etkilerinin araştırıldığı çalışma çok ama çok sınırlıdır. Konu ile ilgili olarak öne çıkan ve Elumalai vd. tarafından yapılan çalışmada kullanılan ışık kaynağının dalga boyu belli olmayıp ayrıca Ultraviole ışık uygulaması yapılan sistem ile kontrol sisteminin karşılaştırılmasında hem su akış hızı etkisi incelenmemiş hem de elementler açısından suda filtrasyon öncesi ve sonrası durumun karşılaştırılması detaylandırılmamıştır. Dolayısıyla Akuaponik sistemler için suyun akış hızı ile Ultraviole filtrasyon arasındaki ilişki net olarak belli değildir. Yine çalışmalarda Ultraviole filtreleme işleminin sudaki hangi elementleri veya atıkları ortadan kaldırdığı ve bu durumun balıklar ile sebze veya bitkiler üzerinde olan etkileri belli değildir. Örneğin hangi tehlikeli atık veya faydalı besin ortadan kaldırılmıştır ve bu ortadan kaldırılan atığın veya besinin yetiştirilen bitki veya su ortamındaki balıkların gelişimlerinde olumlu / olumsuz bir etkisi olmuş mudur belli değildir. Ayrıca yapılan çalışmada filtreleme için kullanılan ultraviole ışık kaynağı balık tankının çıkışı ile bitki tankının girişi arasına konulmak yerine bitki tankının çıkışı ile balık tankının girişi arasına konulmuştur. Yani bitkiler sudaki tüm zararlı atıklara maruz kalmıştır. Filtrelemeyi önce bitkiler sonrasında ise ultraviole ışık kaynağı yapmıştır. Yine bu noktada ultraviole ışık kaynağının balık tankının çıkışı ile bitki tankının girişi arasına konulması durumunda yani bitkinin doğrudan atık suya maruz kalmaması durumunda hangi sonuçların ortaya çıkacağı merak konusudur. Bu literatür eksiklerinden yola çıkılarak halen yürütülmekte olan bir yüksek lisans tezi kapsamında ultraviole ışık kaynağının kurulan sistemlere göre bağlantı şeklinin balık tanklarına ve bitki gelişimlerine olan etkileri incelenmektedir.

TEŞEKKÜR

2021-YL1-0119 No`lu Proje ile çalışmayı maddi olarak destekleyen Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Anonim (2015). Sisleme Sistemi – Aeroponics, https://toprakvesu.com/kb/sisleme-sistemi-aeroponics/ (Son erişim tarihi: 16.11.2022)
2. Anonim (2017). Introductıon to aquaponics, https://www.ecolifeconservation.org/wp-content/uploads/2017/06/Introduction-to-Aquaponics-Manual-1.pdf (Son erişim tarihi: 16.11.2022)
3. Aydın, H. (2018). *Akuaponik Sistemlerde Kıvırcık Marul(Lactuca Sativa) Yetiştiriciliği.* (Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
4. Backyard Aquaponics, 2007. Aquaponics magazine for the backyard enthusiast, Issue 1, 35 s.
5. Ecolife, 2012. Introduction to Village Aquaponics. (http://eco-library.theplanetfixer.org/docs/aquaponics/introduction-to-village-aquaponics-ecolife-2012.pdf, 05.03.2015).
6. Elumalai, S. D., Shaw, A. M., Pattillo, D. A., Currey, C. J., Rosentrater, K. A., & Xie, K. (2017). Influence of UV treatment on the food safety status of a model aquaponic system. *Water*, *9*(1), 27.
7. Goodman E.R., 2011. Aquaponics: Community and Economic Development. Master Thesis, The Massachusetts University, Boston, USA.
8. Gökvardar A., 2013. Kapalı devre sistemlerde akuaponik uygulamaları: Deniz balıkları bitkisel üretim entegrasyonunun araştırılması. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2013, 81 sayfa.
9. Graber, A., Junge, R., 2009. Aquaponic system: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Science Direct, 246:147-156.
10. Güzel, Ş., Şen, F., Kankaya, E., Paruğ, Ş.,Ş., Gültekin, A., 2014. Akuaponik Sistemlerde Sazan (Cyprinus carpio) Balığı ve Marul (Lactuca sativa) Yetiştiriciliği Üzerine Bir Araştırma,. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel araştırma projesi kesin raporu, Van.
11. Lastiri D.R., Slinkert T., Cappon H.J., Baganz D., Staaks G., Keesman K.J., 2016. Model of an aquaponic system for minimised water, energy and nitrogen requirements. Water Science and Technology, Mar 2016, wst2016127; DOI: 10.2166/wst.2016.127.
12. Megep (2008). *Hidroponik sistemler.* http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/bahcecilik/moduller/hidroponik_sistemler. (Son erişim tarihi: 06.09.2021)

13. Mukherjee, S. 2013. Concept Note: Aquaponic Systems and Technologies. Sankalpa Research Center.
14. Palazekin, D. (2019). *Balık Yetiştiriciliği Atık Sularının Akuaponik Tekniği İle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
15. Rakocy J.E., 1995. Aquaponics: the Integration of Fish and Vegetables Culture in Recirculating System. Pages. 101–108.
16. Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M., 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture. SRAC Publication, No. 454. Southern Region Aquaculture Center, Mississippi State University, Stoneville, Mississippi, USA.
17. Selek, M. (2017). *Balık Ve Bitki Üretiminin Entegrasyonu: Kapalı Devre Ve Akuaponik Sistemlerde Nil Tilapia Balığı (Oreochromis Niloticus) Ve Fesleğen Yetiştiriciliği (Ocimum Basillicum).* (Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
18. Shete A.P., Verma A.K., Tandel R.S., Prakash C., Tiwari V.K., HussainT., 2013. Optimization of Water Circulation Period for the Culture of Goldfish with Spinach in Aquaponic System. Journal of Agricultural Science, 5-4.
19. Zweig R., 1986. An İntegrated Fish Culture Hydroponic Vegetable Production System. Aquaculture Magazine, 12(3): 34-40.
20. Wahyuningsih S., Effendi H., Wardiatno Y., 2015. Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system. Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation International Journal of the Bioflux Society (AACL) Bioflux, Volume 8, Issue 4.
21. Watten B.J., Busch R.L., 1984. Tropical production of Tilapia (Sarotherodon aurea) and Tomatoes (Lycopersicon esculentum) in a Small-scale Recirculating Water System. Aquaculture, 41(3): 271-283.

ZNO NANOYAPILI MALZEMELERİN ODA SICAKLIĞINDA ÇALIŞAN GAZ SENSÖRLERİNDE KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi Selda Topçu Şendoğdular[1]
Dr. Öğr. Üyesi Levent Şendoğdular[2]

[1]Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
ORCID: 0000-0002-7757-4577
[2]Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
ORCID: 0000-0002-6364-0932

1. Giriş

Gaz algılama teknolojileri, toksik gazları tespit etmenin yanı sıra çevre ve hava kalitesinin izlenmesi gibi günlük hayatımızı etkileyen uygulamalarda çok önemli bir rol oynamaktadır [1][2]. Çeşitli gaz sensörü türleri arasında dirençli gaz sensörleri, imalat kolaylığı, basit kullanım, düşük üretim maliyeti ve minyatürleştirme nedeniyle en önemli sensörlerden biridir. Nanoteknoloji ile oksit nanoyapılar, iletken polimerler, karbon nanoyapılar ile sensörlerde önemli ilerlemeler kaydedilmesi mümkün olmuştur. Son zamanlardaki birçok ilerlemeye rağmen, güvenilir, sağlam gaz sensörleri için çalışmalar devam etmektedir önümüzdeki on yılda çok daha fazla gelişme beklenmektedir [3][4].

Küçük boyutlu ve özel yapılara sahip nanoyapılı malzemeler, algılama katmanları olarak kullanım için büyük potansiyel gösterirler. Gaz algılama için nanoyapılı malzemeler kullanmanın avantajları, geniş yüzey-hacim oranı, yüksek spesifik yüzey alanı, daha fazla yüzey aktif bölgeleri olduğundan kaynaklanmaktadır [5][6]. Gaz molekülleri ve malzemeler ilk olarak yüzeyde etkileşime girerler, bu nedenle bir malzemenin yüzeyinde bulunan atomların sayısı, sensör performansını kontrol etmek için kritik öneme sahiptir. Büyük yüzey-hacim oranı nedeniyle, nanoyapılı malzemeler, nanoyapılı olmayan malzemelerle karşılaştırıldığında yığın atomlardan çok daha büyük yüzey atomları kısmına sahiptir. Sonuç olarak, nanoyapılı malzemelere dayalı gaz sensörleri daha iyi performans sergileyebilir. Özellikle nanomalzemeler üretilen gaz sensörlerinin, sensör yanıtı, seçicilik, kararlılık ve yanıt/geri kazanım hızını iyileştirmesi için birçok çalışma yapılmaktadır [7][8][9].

Günümüzde sensör araştırma alanındaki ana hedef, oda sıcaklığında çalışabilen yüksek performanslı ve güvenilir gaz sensörleri geliştirmektir. Bu konudaki araştırma ilgisi son on yılda giderek artmakta ve büyümektedir. Oda sıcaklığında çalışan sensörler için asıl çabalar çalışma sıcaklığının düşürülmesine yöneliktir [10][11]. Örneğin, metal oksitlerden yapılan geleneksel gaz sensörleri normalde 100–400 °C'de çalışır, bu da yüksek güç tüketimine ve metal oksit taneciklerinin uyarılmış büyümesi nedeniyle sensör kararlılığının ve kullanım ömrünün azalmasına yol açar [12][13]. Ayrıca, sensörlerin yüksek sıcaklıkta çalıştırılması, yanıcı veya patlayıcı analitleri tespit ederken tutuşma riskleri getirebilir ve bu da geniş uygulama alanlarını sınırlar. Ayrıca, yüksek çalışma sıcaklığı, yüksek güç tüketimine yol açar, bu da yeni nesil pil yüklü kablosuz sensörler için önemli bir parametredir. Bu tür sensörlerde en büyük problem nemdir. Nemden etkilenirler ve ağır tepki ve geri kazanım (iyileşme) süresi ve zayıf kararlılık ile bozunmaya yatkındırlar [14]. Soy metallerle yüzey işlevselleştirme, oksit heteroyapılarının kullanımı ve UV aydınlatma veya harici bir ısıtıcı ile termal yardım dahil olmak üzere hassasiyeti ve seçiciliği

geliştirmeye yönelik stratejiler geliştirilmiştir [15]. Bununla birlikte, yüksek çalışma sıcaklıkları ve/veya sensör cihazlarının stabilite eksikliği hala önemli sınırlamalardır. Bu nedenle, bu araştırma alanı için birincil zorluk, nemin etkileri altında oda sıcaklığında veya oda sıcaklığında çalıştırılabilen hedef gazlara karşı son derece hassas ve seçici olan sağlam, güvenilir gaz sensörleri tasarlamak ve geliştirmektir. Çeşitli inceleme makaleleri ve kitap bölümleri, gaz sensörleriyle ilgili birçok konuyu ele almıştır [14] ve bu nedenle amaç, alandaki başarıların ve beklentilerin kapsamlı bir araştırmasını sunmaktır.

Tipik n-tipi yarı iletken olarak ZnO, geniş bant aralığı, yüksek elektron hareketliliği, fotoelektrik tepki, mükemmel kimyasal ve termal kararlılık gibi ideal bir gaz sensörü için gereken benzersiz özellikler sergiler [16]. Bu arada ZnO, düşük maliyetli, toksik olmayan, kolay hazırlanabilen ve yüksek seri üretime uygun avantajlara sahiptir [16]. Isıtma cihazı gerektirmeyen, oda sıcaklığında çalışan ZnO tabanlı gaz sensörleri, mevcut gelişen trende göre daha taşınabilir ve uygun maliyetlidir. Bu nedenle ZnO malzemesi bu makalenin konusu olarak seçilmiştir.

2. ZnO ve Özellikleri

ZnO, bant boşluk enerjisi 3,4 eV olan doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkendir. Geniş bant aralığı, büyük uyarım bağlanma enerjisi (60meV) ve yüksek elektron hareketliliğine (~ 400 cm^2 $V^{-1}s^{-1}$ sahip n-tipi II-IV yarı iletkenidir [17]. Ayrıca ZnO, biyouyumluluk, kimyasal kararlılık, çevre dostu olma, düşük sentez maliyeti vb. avantajlara sahip olması gaz sensörleri için umut verici bir malzemedir [18]. ZnO normalde altıgen (wurtzite) kristal yapısında oluşur ZnO kristal yapısından dolayı nanopartiküller, tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) yapılar gibi birçok farklı nanoyapı ile üretilebilirler [18].

ZnO nanoyapılarına dayalı gaz sensörlerinin gaz algılama mekanizması, ZnO nanoyapılarının yüzeyindeki bir tükenme tabakasının değiştirilmesine dayanır. Oksijen molekülleri, atmosferik hava varlığında ZnO yüzeyinde adsorbe edilir. Ayrıca ZnO'nun iletim bandından elektronların çekilmesi nedeniyle yüzeyde oksijen iyonlarının oluşumu meydana gelir ve bu da ZnO'nun direncinin artmasına neden olur. Oksijen iyonlarının ZnO üzerine adsorpsiyonu, oksijen moleküllerinin yüksek elektronegatifliği nedeniyle atmosferik oksijen altında bandın yukarı doğru bükülmesini ve bariyer yüksekliğini arttırmaktadır [19]. Ayrıca, adsorbe edilen oksijen iyonları (O, O ve O) büyük ölçüde çalışma sıcaklığına bağlıdır [19].

Sensör performansı tepki süresi, toparlanma süresi, algılama tepkisi, seçicilik, algılama limiti ve kararlılık gibi birkaç parametreye bağlıdır.

3. ZnO Sensör Performansını İyileştirmenin Etkili Yolları

Algılama tepkisi, ZnO'ya metal katkılama, polimerlerin yapıya eklenmesi, karbonlu nanoyapıların dahil edilmesi, farklı MO'ların bileşimi yoluyla geliştirilebilir. Bu işlemler aşağıda daha ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir.

3.1. Saf ZnO Nanoyapılar

Bu bölümde, Tablo 1'te gösterildiği gibi, farklı morfolojilere sahip saf ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama özelliklerine ilişkin bazı çalışmalar özetlenmiştir. Bununla birlikte, genel olarak, çeşitli ZnO nanoyapıları, nispeten düşük oda sıcaklığında gaz algılama özellikleri bir dereceye kadar gösterebiliyor. ZnO bazlı gaz sensörlerinin oda sıcaklığında gaz algılama özelliklerini daha da iyileştirmek için daha iyi stratejilere ihtiyaç vardır.

3.2. Metal ve Metal-oksit Katkılı ZnO Nanoyapılar

Tablo 2'te gösterildiği gibi, metal ve metal oksit katkılı ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama özelliklerine ilişkin bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1. Saf ZnO nanoyapılarının oda sıcaklığında gaz algılama performansları.

Mlz.	Malzeme yapısı	Sentez metodu	Algılanan gaz	Konsantrasyon, ppm	Tepki veya duyarlılık	Tepki zamanı, s	Ref.
ZnO	Nanotel	CVD	Etanol	20	%10	-	[20]
ZnO	Nanoyaprak	Kimyasal çöktürme	NO_2	20	119	85	[21]
ZnO	Nanolif	Elektroeğirme	HCHO	100	12,61	-	[22]
ZnO	Nanotüp	Elektrodepozisyon	Etanol	10	% 30,91	-	[23]
ZnO	Nanokemer	Karbotermal	H_2S	10	8	-	[24]
ZnO	Nanoçicek	Hidrotermal	H_2S	5	581	-	[25]
ZnO	Nanocomb	RF püskürtme	NH_3	25	%1,5	54	[26]
ZnO	İnce film	Magnetron püskürtme	NH_3	100 ppm	304	92	[27]
ZnO	İnce film	Sprey piroliz	NH_3	25 ppm	233	20s	[28]
ZnO	Tetrapod ağı	Termal oksidasyon	Etanol	1000 ppm	4.5	300	[29]
ZnO	Nanotel	Elektroeğirme	Etanol	100 ppm	78	9	[30]

ZnO'ya eklenen katkı maddeleri yük taşıyıcı konsantrasyonunu arttırır ve ayrıca yüzey algılama reaksiyonunun aktivasyon enerjisini düşürür ve sonuç olarak ta çalışma sıcaklığını düşürür. Saf ZnO nano yapısına göre, özellikler metal katkısı ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama özelliklerini keskin bir şekilde arttırır.

Tablo 2. Metal Katkılı ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama performansları.

Mlz.	Malzemenin yapısı	Sentez metodu	Algılanan gaz	Konsantrasyon, ppm	Tepki veya duyarlılık	Tepki zamanı, s	Ref.
La	Nanocorn	Sol-gel	H_2	1000	%51	-	[31]
Au	Nanopartikül	Sol-gel	HHO	5	10,57	138	[32]
Cu	İnce film	Sprey piroliz	NH_3	50	2667	30	[33]
Ni	Nanofiber	Elektroeğirme	HCHO	100	%535,7	-	[34]
Mg	İnce film	RF püskürtme	H_2	100	796	34	[35]

Tablo 3. Metal oksit katkılı ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama performansları

Mlz.	Malzemenin yapısı	Sentez metodu	Algılanan gaz	Konsantrasyon, ppm	Tepki veya duyarlılık	Tepki zamanı, s	Ref.
MoS_2	Nanokompozit	Hdrotermal	NH_3	50	46.2 (red.)	10 s	[36]
CuO	Nanoçubuk	Lazer biriktirme	H_2S	0,5	%25	180	[37]
NiO	Nanofiber	Elektroeğirme	NH_3	250	67	-	[38]
$CdSO_4$	Nanoparçacık	Biriktirme	HCHO	1	%20	-	[39]

3.3. Polimerli ZnO Nanoyapılar

Polianilin (PANI)[40], Polipirol (PPy)[41], Poli(3-heksiltiyofen) (P3HT)[42] gibi iletken polimeler ZnO gas sensörlerin perfonmaslarını arttırmak için nanokompozitlar üzerinde çalışan birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Bu tür polimerler yüksek hassasiyet, kısa tepki süresi ve kolay üretilebilirliğinden dolayı oda sıcaklığında çalışan sensörlerin kullanımında yaygındır. Bu iki malzemenin avantajlarını ile hibrit nanokompozit sensör malzemeleri geliştirmek için, iletken polimerler ve ZnO'nun arayüzünde bir delik-elektron tükenme tabakası ile heteroeklem oluşturulur. N-tipi ZnO'nun serbest elektronları, çoğunluk taşıyıcıları olarak delikleri olan p-tipi iletken polimerlere doğru iletilirken Fermi seviyesinin sonunda yeni bir denge ile heteroeklem oluşur. Bunun sonucunda da hedef gaz moleküllerine maruz kalan gaz sensörleri daha yüksek gaz algılama performansı göstereceklerdir. Tablo 3'de literatürden bazı metal oksit katkılı ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama performanslarını gösterilmiştir

Tablo 4. Polimerli ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama performansları

Mlz.	Malzemenin yapısı	Sentez metodu	Algılanan gaz	Konsantrasyon, ppm	Tepki veya duyarlılık	Tepki zamanı, s	Ref.
P3HT	İnce film	Döndürmeli kaplama	NO_2	50	% 180	-	[42]
PANI	İnce film	Kimyasal oksidatif süreç	Metanol	100	1318	7	[40]
PPy	Nanokompozit	Yerinde polimerizasyon	NH_3	1000	% 36,1	2-5	[41]
P3HT	Nanopartikül	İyonik topaklanma	NO_2	1	32	2	[43]
PANI	Nanoçubuk	Kimyasal sentez ve polimerizasyon	NO_2	100	75	83	[44]

3.4. Grafen bazlı ZnO Nanoyapılar

Karbon nanotüpler (CNT'ler) ve grafen, [45] gibi karbon bazlı nanoyapılı malzemeler ve ayrıca karbon siyahı, [46] ve karbon fiberler [47], kimyasal gaz sensörlerinde bir algılama elemanı olarak önemli ölçüde dikkat çekmiştir. CNT'lerin ve grafenin benzersiz yapısı, düşük sıcaklıklarda bile çevredeki gaz türleri için doğal bir yüksek hassasiyet ve çok düşük algılama limitleri sağlar. CNT'lerin ve grafen bazlı malzemelerin bazı oda sıcaklığı sensörü özellikleri Tablo 4'te özetlenmiştir. Ancak, seçicilik, tersine çevrilebilirlik, kurtarma ve ölçeklenebilirlik açısından zorluklar devam etmektedir. Bunlar, geniş bir nanokompozit yelpazesi oluşturmak için çeşitli konuk bileşenlerle işlevselleştirme yoluyla kısmen karşılanabilir. Karbon tabanlı ZnO anaoyapılar, grafen ve grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit gibi türevleri, kimyasal gaz sensörü de dahil olmak üzere son on yılda en çok çalışılan karbon malzemeleri olmuştur [48][49][50]. Grafenin elektriksel özellikleri, oda sıcaklığında gaz moleküllerinin adsorpsiyonundan kolayca etkilenir. Bu nedenle grafen, gaz sensörlerinde uygulamada umut verici bir geleceğe sahiptir. Gelişmiş elektron taşıma özellikleri, gaz moleküllerinin verimli adsorpsiyonu ve iyi sinyal-gürültü oranı sayesinde gaz algılama için uygundurlar [51][xx]. Gaz sensörlerinde kullanım için, grafen, kimyasal buhar biriktirme (CVD) [52], ark deşarj teknikleri [53], epitaksiyel and grafen oksidin kimyasal veya termal indirgenmesi [54] dahil olmak üzere tekniklerle sentezlenmiştir. Grafenin bir türevi olan grafen oksit (GO), grafenin oksidasyonu yoluyla hazırlanır. Grafen oksitin p-tipi yarı iletken olarak davranabilmesi için, indirgenme yöntemleri uygulanır ve buna da, indirgenmiş grafen oksit (rGO) yapıları denir. İndirgemeden sonra, rGO'nun

yüzeyinde bulunan oksijen fonksiyonel grupları, rGO'dan bir elektron transferine yol açar ve delikler, rGO'nun bir p-tipi yarı iletken olarak davrandığını gösteren ana yük taşıyıcıları haline gelir [55][56].

CNT'ler, küçük çapları ve yüksek en boy oranları nedeniyle benzersiz özelliklere sahiptir. Tek duvarlı CNT'ler, bir grafen şeridinin farklı şekilde yuvarlanmasından kaynaklanan yapı kiralitesine bağlı olarak yarı iletken, metalik veya yarı metalik olabilir [57][58]. Multiwall CNT'ler, p-tipi iletkenliğe sahip yarı iletkendir ve nanoelektronik cihazlar için yapı taşları olarak geniş ölçüde kullanılmıştır. [59]. CNT'lerin oda sıcaklığı sensörü olarak kullanım potansiyeli ilk olarak Dai [59] ve Zettl [60] grupları tarafından araştırılmıştır. Dai ve iş arkadaşları, tek duvarlı bir CNT içeren bir prototip kimyasal gaz sensörü gösterdiler. Sensörün elektrik direncinin, NO2 veya NH3 gibi gaz moleküllerine maruz kaldığında önemli ölçüde arttığını veya azaldığını gösterdiler.

Başka bir karbon allotropu olan grafen, kimyasal gaz sensörlerinde uygulama için giderek daha fazla ilgi görüyor [61][48][62]. CNT'lerin 1D yapısı ile karşılaştırıldığında, grafen daha fazla esnekliğe sahip 2D düzlemsel bir yüzeye sahiptir. Bu özellik, grafene elektronik cihazların imalatına entegre edilmek üzere daha iyi işlenebilirlik sağlar [63].

Tablo 5. Karbon bazlı polimeri ZnO'nun oda sıcaklığında gaz algılama performansları

Mlz.	Malzemenin yapısı	Sentez metodu	Algılanan gaz	Konsantrasyon, ppm	Tepki veya duyarlılık	Tepki zamanı, s	Ref.
rGO-ZnO	Mezoporoz	İki aşamalı çözelt sentezi	NO_2	1	119 (ox.)	75 s	[64]
rGO-ZnO	Nanosheet		Formaldehyde	25 ppm	0.43	30 s	[65]
rGO/ZnO	İnce film	Termal indirgeme	NH_3	10	1,2	78	[66]
rGO/ZnO	Nanoparçacık	Hidrotermal	NH_3	1	%24	180	[67]

4. Perspektif ve gelecek

Çeşitli nanoyapılı malzemeler kullanılarak oda sıcaklığı dirençli gaz sensörlerinde son zamanlarda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Oda sıcaklığında gaz algılama, düşük enerji tüketimi, bir ısıtma elemanına ihtiyaç duymadan basitleştirilmiş sensör üretimi ve dolayısıyla düşük maliyet açısından caziptir. Hiç şüphesiz, son on yılda nanokimya alanındaki ilerlemeler, gaz sensörü araştırmalarının gelişimini önemli ölçüde ilerletmiştir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında dirençli gaz sensörleri için nanoyapılı malzemelerin pratik bir uygulamasını gerçekleştirmek için, sensör özelliklerinin temel yönlerini iyileştirmek için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır.

Günümüzde sensör hassasiyeti artık önemli bir endişe kaynağı değildir. Yüksek hassasiyet ya yüzey işlevselleştirme ya da nanoyapıların mühendisliği yoluyla elde edilebilir. Ancak seçicilik, dirençli gaz sensörleri için hala bir sorundur. Gaz sensörü araştırması alanında aşılması gereken bir başka zorluk da kararlılıktır. Yüksek sıcaklıkta, sensörler, metal oksit taneciklerinin termal olgunlaşması nedeniyle hassasiyetlerini kaybetme eğilimindeyken, oda sıcaklığında, nem etkisi ve diğer moleküllerin girişimi nedeniyle sensör tepkisi dalgalanmaya tabidir. Bazı çalışmalar, sensör kararlılığının birkaç ay boyunca önemli bir bozulma olmadan korunabileceğini gösterse de, bu tür bir performans iyi kontrol edilen laboratuvar koşullarında elde edildiğinden gerçekte nasıl bir sonuç vereceği bilinmemektedir.

Oda sıcaklığında gaz algılayan ZnO sensörlerinin geliştirilmesinde yani farklı stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır. Belki geçirgen membranları üretilerek bunların sensörlere entegre edilip sensör performanslarının incelenmesi gelecekte bu alanda bir çalışma konusunu olabilecektir.

5. Kaynaklar

1. S. S. Varghese, S. Lonkar, K. K. Singh, S. Swaminathan, and A. Abdala, "Recent advances in graphene based gas sensors," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 218, pp. 160–183, May 2015, doi: 10.1016/J.SNB.2015.04.062.
2. "Metal-oxide-semiconductor based gas sensors: screening, preparation, and integration. Physical Chemistry Chemical Physics, 19(9), 6313–6329 | 10.1039/c6cp07799d." https://sci-hub.se/10.1039/c6cp07799d (accessed Dec. 13, 2022).
3. M. M. Rahman, H. B. Balkhoyor, A. M. Asiri, and H. M. Marwani, "A gold electrode modified with silver oxide nanoparticle decorated carbon nanotubes for electrochemical sensing of dissolved ammonia," doi: 10.1007/s00604-016-1797-4.
4. A. Tamvakos, D. Calestani, D. Tamvakos, R. Mosca, D. Pullini, and A. Pruna, "Effect of grain-size on the ethanol vapor sensing properties of room-temperature sputtered ZnO thin films," doi: 10.1007/s00604-015-1539-z.
5. X. Liu *et al.*, "Single crystal a-Fe 2 O 3 with exposed {104} facets for high performance gas sensor applications{," doi: 10.1039/c2ra20797d.
6. A. Gurlo, "Nanosensors: towards morphological control of gas sensing activity. SnO 2 , In 2 O 3 , ZnO and WO 3 case studies †," doi: 10.1039/c0nr00560f.
7. M. Stankova *et al.*, "Sensitivity and selectivity improvement of rf sputtered WO3 microhotplate gas sensors," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 113, no. 1, pp. 241–248, Jan. 2006, doi: 10.1016/J.SNB.2005.02.056.
8. S. Maryam, M. Zanjani, M. Sadeghi, and M. Holt, "Enhanced sensitivity of graphene ammonia gas sensors using molecular doping," *Appl. Phys. Lett*, vol. 108, p. 33106, 2016, doi: 10.1063/1.4940128.
9. "Photo-induced synthesis of polypyrrole-silver nanocomposite films on N-(3-trimethoxysilylpropyl)pyrrole-modified biaxially oriented polyethylene terephthalate flexible substrates. RSC Advances, 3(16), 5506 | 10.1039/c3ra22981e." https://sci-hub.se/10.1039/c3ra22981e (accessed Dec. 13, 2022).
10. F. H. Saboor *et al.*, "Enhanced NO2 gas sensing performance of bare and Pd-loaded SnO2 thick film sensors under UV-light irradiation at room temperature," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 223, pp. 429–439, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.SNB.2015.09.075.
11. T. Ueda *et al.*, "Enhanced sensing response of solid-electrolyte gas sensors to toluene: Role of composite Au/metal oxide sensing electrode," *Sensors*

Actuators B Chem., vol. 252, pp. 268–276, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.SNB.2017.05.172.
12. T. Gessner *et al.*, "Metal oxide gas sensor for high temperature application," *Microsyst. Technol.*, vol. 6, 2000.
13. C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang, and R. Gao, "Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors," *Sensors (Basel).*, vol. 10, no. 3, p. 2088, Mar. 2010, doi: 10.3390/S100302088.
14. J. Zhang, X. Liu, G. Neri, and N. Pinna, "Nanostructured Materials for Room-Temperature Gas Sensors," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 5, pp. 795–831, Feb. 2016, doi: 10.1002/ADMA.201503825.
15. Y. Kumar Mishra *et al.*, "Direct Growth of Freestanding ZnO Tetrapod Networks for Multifunctional Applications in Photocatalysis, UV Photodetection, and Gas Sensing," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, p. 13, 2015, doi: 10.1021/acsami.5b02816.
16. L. Zhu and W. Zeng, "Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 267, pp. 242–261, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.SNA.2017.10.021.
17. C. L. Hsu, L. F. Chang, and T. J. Hsueh, "Light-activated humidity and gas sensing by ZnO nanowires grown on LED at room temperature," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 249, pp. 265–277, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.SNB.2017.04.083.
18. Y. Kang, F. Yu, L. Zhang, W. Wang, L. Chen, and Y. Li, "Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors," *Solid State Ionics*, vol. 360, p. 115544, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SSI.2020.115544.
19. V. S. Bhati, M. Hojamberdiev, and M. Kumar, "Enhanced sensing performance of ZnO nanostructures-based gas sensors: A review," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 46–62, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2019.08.070.
20. A. L. Zou *et al.*, "Ethanol sensing with Au-modified ZnO microwires," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 227, pp. 65–72, May 2016, doi: 10.1016/J.SNB.2015.12.023.
21. R. K. Sonker, S. R. Sabhajeet, S. Singh, and B. C. Yadav, "Synthesis of ZnO nanopetals and its application as NO2 gas sensor," *Mater. Lett.*, vol. 152, pp. 189–191, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.MATLET.2015.03.112.
22. J. Cui, L. Shi, T. Xie, D. Wang, and Y. Lin, "UV-light illumination room temperature HCHO gas-sensing mechanism of ZnO with different nanostructures," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 227, pp. 220–226, May 2016, doi: 10.1016/J.SNB.2015.12.010.
23. D. Acharyya and P. Bhattacharyya, "Alcohol sensing performance of ZnO hexagonal nanotubes at low temperatures: A qualitative understanding,"

Sensors Actuators B Chem., vol. 228, pp. 373–386, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.SNB.2016.01.035.
24. M. Kaur *et al.*, "Gas dependent sensing mechanism in ZnO nanobelt sensor," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 394, pp. 258–266, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.APSUSC.2016.10.085.
25. Z. S. Hosseini, A. I. Zad, and A. Mortezaali, "Room temperature H2S gas sensor based on rather aligned ZnO nanorods with flower-like structures," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 207, no. PartA, pp. 865–871, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.SNB.2014.10.085.
26. "Rice Husk Templated Mesoporous ZnO Nanostructures for Ethanol Sensing at Room Temperature," *Chinese Phys. Lett.*, 2015, doi: 10.1088/0256-307X/32/7/078101.
27. P. Therasa Ranjani *et al.*, "Studies on Magnetron Sputtered V2O5 Thin Films Deposited over ZnO Buffer Layer," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 1477–1486, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.MATPR.2016.04.031.
28. G. K. Mani and J. B. B. Rayappan, "A highly selective room temperature ammonia sensor using spray deposited zinc oxide thin film," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 183, pp. 459–466, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.SNB.2013.03.132.
29. M. Thepnurat, T. Chairuangsri, N. Hongsith, P. Ruankham, and S. Choopun, "Realization of Interlinked ZnO Tetrapod Networks for UV Sensor and Room-Temperature Gas Sensor," 2015, doi: 10.1021/acsami.5b07491.
30. P. Shankar, J. Bosco, and B. Rayappan, "Monomer: Design of ZnO Nanostructures (Nanobush and Nanowire) and Their Room-Temperature Ethanol Vapor Sensing Signatures," 2017, doi: 10.1021/acsami.7b11561.
31. K. S. Venkatesh, K. Vijayalakshmi, K. Karthick, S. R. Krishnamoorthi, N. S. Palani, and R. Ilangovan, "Fabrication of room temperature H2 gas sensor using pure and La: ZnO with novel nanocorn morphology prepared by sol–gel dip coating method," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 25, no. 10, pp. 4339–4347, Oct. 2014, doi: 10.1007/S10854-014-2171-0.
32. F. C. Chung, Z. Zhu, P. Y. Luo, R. J. Wu, and W. Li, "Au@ZnO core–shell structure for gaseous formaldehyde sensing at room temperature," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 199, pp. 314–319, Aug. 2014, doi: 10.1016/J.SNB.2014.04.004.
33. G. K. Mani and J. B. B. Rayappan, "Influence of copper doping on structural, optical and sensing properties of spray deposited zinc oxide thin films," *J. Alloys Compd.*, vol. 582, pp. 414–419, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2013.07.146.

34. “The role of Ni doping on photoelectric gas-sensing properties of ZnO nanofibers to HCHO at room-temperature. RSC Advances, 6(82), 78257–78263 | 10.1039/c6ra11887a.” https://sci-hub.se/10.1039/c6ra11887a (accessed Dec. 13, 2022).
35. A. J. Kulandaisamy *et al.*, “Room temperature ammonia sensing properties of ZnO thin films grown by spray pyrolysis: Effect of Mg doping,” *J. Alloys Compd.*, vol. 688, pp. 422–429, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2016.07.050.
36. D. Zhang, C. Jiang, and Y. Sun, “Room-temperature high-performance ammonia gas sensor based on layer-by-layer self-assembled molybdenum disulfide/zinc oxide nanocomposite film,” *J. Alloys Compd.*, vol. 698, pp. 476–483, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2016.12.222.
37. X. Liu *et al.*, “Sensitive Room Temperature Photoluminescence-Based Sensing of H 2 S with Novel CuO−ZnO Nanorods,” 2016, doi: 10.1021/acsami.6b02455.
38. G. K. M. Krishnakumar Lokesh, Gnanasekaran Kavitha, Elayaperumal Manikandan, R. L. Kasinathan Kaviyarasu, John Bosco Balaguru Rayappan, and and M. M. Jagathrakshakan Sundeep Aanand, Mayandi Jayachandran, “Effective ammonia detection using n-ZnO/p-NiO heterostructured nanofibers,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2016. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7378875 (accessed Dec. 13, 2022).
39. c J. Z. and X. L. Xinghua Chang, Mi Peng,a Junfeng Yang, Teng Wang, Yu liu, “A miniature room temperature formaldehyde sensor with high sensitivity and selectivity using CdSO4 modified ZnO nanoparticles. RSC Advances, 5(92), 75098–75104 | 10.1039/c5ra13459e,” *RCS Advances*, 2015. https://sci-hub.se/10.1039/c5ra13459e (accessed Dec. 13, 2022).
40. R. Paulraj, P. Shankar, G. Kumar Mani, L. Nallathambi, and J. Bosco Balaguru Rayappan, “Fabrication of PANI-ZnO nanocomposite thin film for room temperature methanol sensor,” *J Mater Sci Mater Electron*, vol. 28, pp. 10799–10805, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-6857-y.
41. P. Patil, G. Gaikwad, D. R. Patil, and J. Naik, “Synthesis of 1-D ZnO nanorods and polypyrrole/1-D ZnO nanocomposites for photocatalysis and gas sensor applications,” *Bull. Mater. Sci*, vol. 39, no. 3, pp. 655–665, 2016, doi: 10.1007/s12034-016-1208-9.
42. J. Wang *et al.*, “Hierarchical ZnO Nanosheet-Nanorod Architectures for Fabrication of Poly(3-hexylthiophene)/ZnO Hybrid NO 2 Sensor,” 2016, doi: 10.1021/acsami.5b12553.
43. Y. Y. and H. E. Katz, “Hybrid of P3HT and ZnO@GO nanostructured

particles for increased NO2 sensing response," *J. Mater. Chem. C*, vol. 8, 2017.
44. S. Jain, N. Karmakar, A. Shah, and N. G. Shimpi, "Development of Ni doped ZnO/polyaniline nanocomposites as high response room temperature NO2 sensor," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 247, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.MSEB.2019.114381.
45. D. R. Kauffman, A. Star, A. Star, and D. R. Kauffman, "Carbon Nanotube Gas and Vapor Sensors Reviews 6550 www.angewandte.org," *Angew. Chem. Int. Ed*, vol. 47, p. 35, 2008, doi: 10.1002/anie.200704488.
46. M. C. Lonergan, E. J. Severin, B. J. Doleman, S. A. Beaber, R. H. Grubbs, and N. S. Lewis, "Array-Based Vapor Sensing Using Chemically Sensitive, Carbon Black-Polymer Resistors," 1996, Accessed: Dec. 13, 2022. [Online]. Available: https://pubs.acs.org/sharingguidelines.
47. L. Li, J. Li, and C. M. Lukehart, "Graphitic carbon nanofiber-poly(acrylate) polymer brushes as gas sensors," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 130, no. 2, pp. 783–788, Mar. 2008, doi: 10.1016/J.SNB.2007.10.050.
48. F. Schedin *et al.*, "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene," 2007, doi: 10.1038/nmat1967.
49. G. Yuan, Wenjing, Shi, "Graphene-based gas sensors," *J. Mater. Chem. A*, no. 35, 2013.
50. H. J. Yoon, D. H. Jun, J. H. Yang, Z. Zhou, S. S. Yang, and M. M. C. Cheng, "Carbon dioxide gas sensor using a graphene sheet," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 157, no. 1, pp. 310–313, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.SNB.2011.03.035.
51. K. S. Novoselov, V. I. Fal9ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, and & K. Kim, "A roadmap for graphene," 2012, doi: 10.1038/nature11458.
52. F. Rigoni *et al.*, "Transfer of CVD-grown graphene for room temperature gas sensors," *Nanotechnology*, vol. 28, p. 414001, 2017, doi: 10.1088/1361-6528/aa8611.
53. Z. Bo *et al.*, "Green preparation of reduced graphene oxide for sensing and energy storage applications," doi: 10.1038/srep04684.
54. T. Wang *et al.*, "A Review on Graphene-Based Gas/Vapor Sensors with Unique Properties and Potential Applications," *Nano-Micro Lett. 2015 82*, vol. 8, no. 2, pp. 95–119, Nov. 2015, doi: 10.1007/S40820-015-0073-1.
55. S. Gilje, S. Han, M. Wang, K. L. Wang, and R. B. Kaner, "A Chemical Route to Graphene for Device Applications," 2007, doi: 10.1021/nl0717715.

56. J. Moser, A. Verdaguer, and D. Jiménez, “The environment of graphene probed by electrostatic force microscopy,” *Appl. Phys. Lett*, vol. 92, p. 123507, 2008, doi: 10.1063/1.2898501.
57. J. Li, Y. Lu, Q. Ye, M. Cinke, J. Han, and M. Meyyappan, “Carbon Nanotube Sensors for Gas and Organic Vapor Detection,” *NANO Lett.*, vol. 3, no. 7, pp. 929–933, 2003, doi: 10.1021/nl034220x.
58. P. Qi *et al.*, “Toward Large Arrays of Multiplex Functionalized Carbon Nanotube Sensors for Highly Sensitive and Selective Molecular Detection,” 2003, doi: 10.1021/nl034010k.
59. H. D. J Kong 1, NR Franklin, C Zhou, MG Chapline, S Peng, K Cho, “Nanotube molecular wires as chemical sensors,” *Science (80-.).*, vol. 287, no. 5453, 2000.
60. P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, and A. Zettl, “Extreme Oxygen Sensitivity of Electronic Properties of Carbon Nanotubes,” *Science (80-.).*, vol. 287, no. 5459, pp. 1801–1804, Mar. 2000, doi: 10.1126/SCIENCE.287.5459.1801.
61. J. D. Fowler, M. J. Allen, V. C. Tung, Y. Yang, R. B. Kaner, and B. H. Weiller, “Practical Chemical Sensors from Chemically Derived Graphene,” vol. 3, no. ▪, pp. 301–306, 2009, doi: 10.1021/nn800593m.
62. F. Yavari and N. Koratkar, “Graphene-Based Chemical Sensors,” 2012, doi: 10.1021/jz300358t.
63. Fazel Yavari and Nikhil Koratkar, “Graphene-Based Chemical Sensors,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 3, no. 13, pp. 1746–1753, 2012.
64. Y. Xia *et al.*, “Confined Formation of Ultrathin ZnO Nanorods/Reduced Graphene Oxide Mesoporous Nanocomposites for High-Performance Room-Temperature NO 2 Sensors,” 2016, doi: 10.1021/acsami.6b12501.
65. H. L. and C. X. Qingwu Huang, Dawen Zeng, “Room temperature formaldehyde sensors with enhanced performance, fast response and recovery based on zinc oxide quantum dots/graphene nanocomposites,” *Nanoscale*, no. 18, 2012.
66. H. Tai, Z. Yuan, W. Zheng, Z. Ye, C. Liu, and X. Du, “ZnO Nanoparticles/Reduced Graphene Oxide Bilayer Thin Films for Improved NH 3-Sensing Performances at Room Temperature,” 2011, doi: 10.1186/s11671-016-1343-7.
67. G. Singh *et al.*, “ZnO decorated luminescent graphene as a potential gas sensor at room temperature,” *Carbon N. Y.*, vol. 50, no. 2, pp. 385–394, Feb. 2012, doi: 10.1016/J.CARBON.2011.08.050

CNC KOORDİNAT SİSTEMİNE VE PROGRAM KODLAMASINA GİRİŞ

Dr. Öğr. Üyesi, Selim BACAK,

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
ORCID ID: 0000-0002-9640-2893

GİRİŞ

Hassas olmakla beraber verimli işleme kolaylığı sağlayan aynı zamanda kolay kullanım da sunan bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) gelişmiş bir imalat teknolojisidir (Hatem vd. 2021, Mori vd. 2001). Endüstride kullanılan makinelerin ileri teknolojisi olan bilgisayar sayısal kontrol, modern bir üretim sisteminin temel bir unsurunu oluşturmaktadır (Zhang vd.2018, Bukofzer vd. 2002). Konvansiyonel takım tezgâhlarının amacı, malzemeye yapım şeklinde belirtilen toleranslarla şekil vermektir. Malzemeyi şekillendirme işlemi, kesici takım ve iş parçasının izafi hareketleri sonucu, talaş kaldırarak gerçekleşir (Yan, 2020). CNC tezgâhlarında ise bu hareketler programla belirtilir. Programda belirtilen kodlar kontrol ünitesinde sinyallere dönüşür (Ma vd. 2007). Bu sinyaller tezgâhtaki motoru ve buna bağlı mekanik iletim araçlarını (dişli çark, civata mekanizması vb.) harekete geçirerek tablanın hareketini sağlar (Kim vd. 2021)

Bu bölümde CNC tezgâhlar ile genel bilgiler edinildikten sonra koordinat sistemi ve programlama dilinde kullanılan harfler ve kodlar ile ilgili bilgiler verecektir.

NC KONTROL

Konvansiyonel tezgâhların talepleri karşılayamaması üzerine özellikle ikinci Dünya savaşından sonra uçak ve otomobil parçaları ağırlıklı olarak birçok karmaşık şeklin üretilebilmesi için yeni bir üretim ve bunu kontrol edecek sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Bu sistem karmaşık parçaların üretimini kolaylaştırıp mümkün kılmak ile beraber konvansiyonel tezgâhlarda üretilen ürünlere oranla daha hassas üretim sağlaması hedeflenmiştir.

Sayısal Kontrol (NC) sistemi ilk olarak bir freze makinesinde denenmiş ve tezgâhın tablasının her iki eksende aynı anda hareket edebilmesi hedeflenmişti. Savunma sanayinin ihtiyaçları ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda ilk sayısal kontrollü tezgâhlar üretilmiş ve beklenenin aksine torna tezgâhı üzerine uyarlanmıştır.

Bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişimi Sayısal Kontrollü (NC) tezgâhları da geliştirmiş yerini bilgisayar yardımı ile kontrol sağlayan CNC (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol) teknolojisine bırakmıştır.

Sayısal denetim (NC) tezgâhları; talaşlı imalatta, ağaç endüstrisinde, kesme işlemlerinde, saç ve plastik kalıpçılığı sektörlerinde yerini almış ve sektöre üretim özdeşliği, verimliliğin artması, karmaşık parçaların üretim kolaylığı gibi avantajlar sağlamıştır. Sayısal kontrol sistemleri, oldukça fazla kullanım alanına sahiptir. Aşağıdaki üretim tesisleri için de uzun yıllardan beri kullanılmaktadır.

CNC TEZGÂHLARININ ÖZELLİKLERİ

Bilgisayarlı sayısal kontrol de (CNC) takım tezgâhlarının harf, sayı, vb. ifadeler ile oluşturulan mantığı kullanan kodlar sayesinde çalıştırılmasıdır. Bunu kontrol eden bir bilgisayarın mevcut olması parça üretimi için yazılmış olan programın saklanabilmesine, gerektiğinde değişikliklerin yapılmasına, üretim esnasında programı durdurup istenilen zaman diliminde tekrardan başlatıla bilmesine olanak sağlamaktadır. Bilgisayarlı sayısal kontrol tezgâhlarında temel üç adet bileşen mevcuttur.

- Tezgâh fonksiyonlarının yerine getirilebilmesi için verilerin toplanacağı ve saklanabileceği bilgisayar ünitesi
- Bilgisayar ile tezgâh arasındaki veri akışının sağlayan kontrol ünitesi
- Arabirim

CNC Tezgâhlarında Avantaj ve Dezavantajlar

CNC tezgâhlar, konvansiyonel tezgâhlar ile kıyaslandığında üretimde birçok avantaj sağlamaktadır;

- Tezgâh çalışma süresi boyunca yüksek tempoya sahiptir.
- Üretim hassasiyeti yüksek parçaların imalatı mümkündür.
- Seri imalata elverişlidir.
- İmalat süresince insan faktöründen kaynaklanan hata ve zaman kaybı yoktur.
- Tezgâhın işleme başlamadan önceki ayarlanma süresi kısadır.

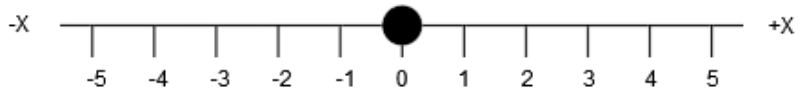
CNC Tezgâhlarında Dezavantajları

- Detaylı üretim planının yapılması gerekmektedir
- Tezgâh ve aparatları için yapılan maliyetler yüksektir.
- Konvansiyonel tezgâhlara oranla kullanımı daha çok titizlik gerektirir.
- Kullanılan kesişici takım ve soğutma suyunun daha kaliteli olmasın gerektiğinden masrafı daha çoktur.
- Periyodik bakımları pahalıdır.
- Yetişmiş, nitelikli eleman ihtiyacı fazladır.

KOORDİNAT SİSTEMİ

CNC tezgâhlarının hareketi, Kartezyen koordinat sistemine dayalı olarak çalışmaktadır. Takım yollarının oluşması için koordinat sistemi referans alınması gerekmektedir aksi şekilde CNC makinesinin düzgün bir şekilde çalıştırılması mümkün değildir.

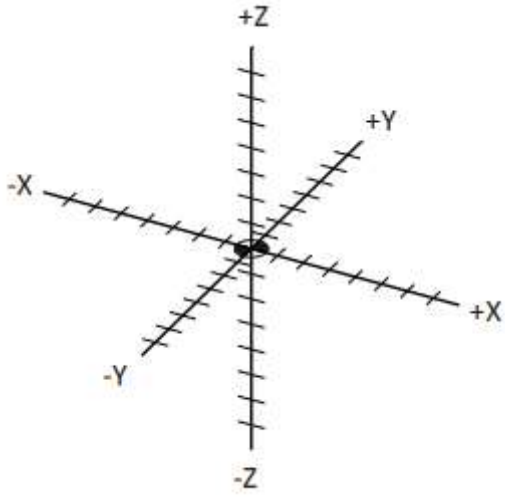
Kartezyen koordinat sistemini, sayı doğrusu oluşturur. Sayı doğrusunun sağ tarafı pozitif sol tarafı ise negatif sayılardan oluşmaktadır. Doğru üzerinde bir nokta başlangıç noktası belirlenir ve koordinatlandırma işlemi bu başlangıç noktası üzerinden yapılır.



Şekil 1. Sayı doğrusu

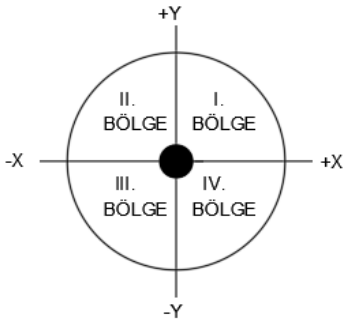
3D Kartezyen Koordinat Sistemi

Kartezyen koordinat sistemi, X, Y ve Z olarak isimlendirilmiş, üç adet sayı doğrusundan oluşmaktadır. Sayı doğruları birbirleri ile 90 derecelik açılar ile ayarlanmıştır. 3 boyutlu düzlem uzay üzerinde 3 değer ile ifade edilir. İlk değer X ekseni, ikinci değer Y eksenini, üçüncü değerde X ve Y eksenine dik eksen olan Z eksenini ifade eder. Bu üç eksenin kesiştiği nokta, koordinat noktasının uzaydaki yerini belli eder.



Şekil 2. Kartezyen koordinat sistemi

Koordinat sistemi üzerindeki herhangi iki eksen bir düzlem oluşturur, düzlemler onları adlandıran eksenlere göre adlandırılır. Şekil 3 te XY düzlemi dört bölgeye bölünmüş ve numaralandırılmıştır.



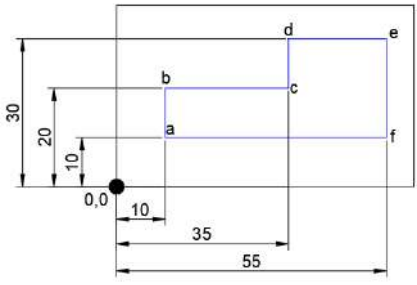
Şekil 3. XY düzlemi

CNC tezgâhlarında parça üretimi yapılırken yazılacak programlarda iki ölçü sistemi kullanılır. Bunlar Metrik ve İnç sistemi olarak adlandırılır. Tezgâhlarda her iki ölçü sistemi ile parça üretimi yapmak mümkündür, tek bir kod ile değişim sağlanabilmektedir.

Mutlak (Absolute) Koordinatlandırma Sistemi

Mutlak Koordinatlandırma sistemi iş parçasının sıfır noktası referansına göre belirlenmiş olup diğer tüm noktaların sabit bir noktaya göre ölçülendirilmesi ile oluşur. Bu sabit noktaya orijin adı da verilir. Referans noktasının koordinat değerleri (X0,Y0, Z0) olarak gösterilir. G90 kodu ile aktif hale getirilir.

Nokta	X	Y
a	10	10
b	10	20
c	35	20
d	35	30
e	55	30
f	55	0

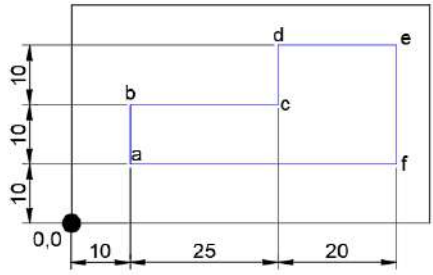


Şekil 4. Mutlak koordinat girişi örneği

Artışlı (Incremental) Koordinatlandırma Sistemi

Artışlı koordinat sisteminde, noktalar bir önceki noktaya göre değerlendirilir. Sabit bir referans noktası yoktur. Referans noktası (X0, Y0, Z0); koordinat değeri verilecek noktanın bir önceki noktasıdır, ölçü değeri ona göre belirlenir. CNC tezgâhlarında artışlı koordinat sistemini aktif hale getirmek için G91 kodu kullanılır.

Nokta	X	Y
a	10	10
b	0	10
c	25	0
d	0	10
e	20	0
f	0	-20



Şekil 5. Artışlı koordinat girişi örneği

CNC TEZGÂHLARININ HAREKET KONTROLÜ

CNC makinelerinin her eksenine bağlı bir servo motor bulunmaktadır. Makine kontrolü ünitesi, bir kontrol panosu aracılığıyla, her makine eksenine bağlı servo motora hareket sinyali gönderir. Bu servo motor, makine tablasına veya sütuna bağlı bir bilyalı vidayı döndürüp tezgâh tablasının hareket etmesine sebep olur. Böylelikle eksen yönlerine bağlı motorların harekete geçmesi ile eksenel yönlerde hareket sağlanmış olur. Her eksenin gerçek konumu bilyalı vidaya bağlı bir servo vericiden sürekli olarak izlenir. Geri bildirimle komut verilen konum karşılaştırılır.

Vidalı millerde neredeyse hiç geri tepme yoktur, bu nedenle servo motor dönme yönünü değiştirdiğinde, komut verilen ters hareket ile tabla yönünde karşılık gelen değişiklik arasında neredeyse hiç gecikme olmaz. CNC kontrolleri, mevcut olabilecek herhangi bir küçük geri tepmeyi ayarlamak için elektronik telafi kullanır.

Makine Sıfır Pozisyonu

CNC makineleri ilk çalıştırıldığında eksenlerin çalışma alanında nerede konumlandığını bilmez. Makineye güç verilip açıldıktan sonra ilk önce ana konumuna (makine sıfırı) operatör tarafından gönderilir.

Gönderim sonrası, üç eksen yavaşça uç sınırlarına (-X, +Y, +Z) doğru ilerler. Her eksen mekanik olarak gideceği son noktaya ulaştığında, bir mikro anahtar devreye girer. Bu, kontrol ünitesine o eksenin ana konumuna ulaştığını bildirir. Üç eksenin tümü hareket etmeyi bıraktığında, makinenin ana konumuna geldiği söylenir. Makine koordinatları, bu ana konuma göre daha sonra bulunur.

Parça Koordinat Sistemi (Parça sıfır noktası)

Makine Koordinatlarına (makine sıfırına) göre bir CNC programı yazmak zordur. Ana konum makine tablasından uzak bir konumdadır, bu nedenle CNC programındaki değerler koordinat değerleri büyük olur ve parça modeliyle kolayca ilişkilendirilemez. CNC tezgâhını, programlamayı ve ayarlamayı kolaylaştırmak için, her program için ayrı bir İş Koordinat Sistemi (parça sıfır noktası) belirlenir.

Takım Uzunluğu Ofseti

CNC makinelerinde kesici takımların takıldığı yer magazin olarak adlandırılır. Bir iş parçasını işlemek için kullanılan kesici takımların hepsi burada yer alır. Her takım farklı uzunluktadır. Tezgâha takımların uzunluklarının ve bu takımların iş milinden uca ne kadar mesafede olduğunu bilebilmek Takım Uzunluğu Ofseti ile mümkün olmaktadır. Bir takım aşınma veya kırılma nedeniyle değiştirilirse, yeni takımın uzunluğu da değişecektir. Bunun sebebi her takımın takım magazinindeki tutucuya aynı şekilde yerleştirmenin neredeyse mümkün olmayışıdır.

CNC PROGRAMLAMA DİLİNE GİRİŞ

CNC makineleri, 1950'lerde güçlü ve hassas işlem yapabilen endüstriyel robotlar olarak geliştirildi. CNC takım tezgâhlarının büyük bir çoğunluğu, 1960'larda ortaya çıkan bir dili kullanır. Bu dilin adı RS-274D'dir. Bu dilin birçok satırı G ve M kodlarından oluştuğu için genel olarak G kodu veya G ve M kodu diye adlandırılır.

CNC makinelerinde kullanılan kelimelerin çoğu aynı olsa da marka ve modeller değiştikçe farklılıklarda ortaya çıkmaktadır. Buna sebep ise makine konfigürasyonlarının ve seçeneklerinin farklılıklarından olmasıdır. Örneğin bir makinede bulunana bir özellik için bir kod varken diğer modelde o özellik yoksa o koda da ihtiyaç yoktur. Tezgâhtan tezgaha değişen bu farklılıklara ve kodlara hakim olabilmek için kullanılan tezgahın belgelerine bakmak gerekmektedir.

Çoğu makinede yaklaşık yüz civarı kod bulunmakta ve bunların otuzu sıklıkla kullanılmaktadır. G kodu dili ilk bakışta karmaşık görünse de, takım tezgâhı hareketini kontrol etmek için tasarlanmış en güvenli ve en verimli yoldur. G ve M kodları, ölçüm koordinatları ve diğer parametrelerle birlikte CNC programı olarak adlandırılan şeyi oluşturur.

CNC Dili ve Yapısı

CNC programları, soldan sağa ve yukarıdan aşağıya satırlara geçerek okunur. CNC programındaki her cümle, Blok adı verilen ayrı bir satıra yazılır. Bloklar, güvenliği, okunabilirliği ve öngörülebilirliği destekleyen belirli bir sırayla düzenlenir, bu nedenle standart bir program yapısına bağlı kalarak programı oluşturmak önemlidir.

Genel olarak bloklar aşağıdaki sırayla düzenlenir:

1) Program Başlangıcı
2) Takımın Yüklenmesi
3) Devir Açık
4) Soğutma Sıvısı Açık
5) Parçanın üzerindeki konuma hareket
6) İşleme işlemi
7) Soğutma Sıvısı Kapalı
8) Devir Kapalı
9) Güvenli konuma hareket edin
10) Programı sonlandır

Bu tarz bloklama takım magazini olmayan yani sadece bir adet kesici takım ile çalışan CNC tezgâhları için geçerlidir. Birden çok kesici takım ile çalışan tezgâh modellerinde ise döngü iki ve dokuz arasında yapılmaktadır.

Program blokları tek irdelendiğinde;

- Program başlangıcında
  Program adı veya numarası, operatörün hangi takımı kullanacağının belirlenmesi, makinen güvenli mod da olmasını sağlama için gerekli kodlar,
- Takımın yüklenmesi
  Tercih edilen kesici takımın çağrılması, tezgâh devrinin çalıştırılması ve hangi dönüş yönünde olacağının kararlaştırılması.
- Parça üzerindeki konuma hareket,
  Soğutma sıvısını açma, parça üzerine hızlı hareket, takım uzunluğu ofsetini ayarlama.
- İşleme işlemi
  Parça üzerinde talaş kaldırma işlemi,
- Program sonlandır

Tezgâh devrinin kapanması, soğutma suyunun kapanması, tüm koordinatlarda güvenli konuma gidilmesi, makine ana konumuna hareket, programı başlangıca sıfırlama, programı sonlandırmak

Alfabenin her harfi bir CNC makine adres kodu olarak kullanılır. Bazen bazı harfler birden fazla kullanılır ve anlamları aynı veya farklı bloklarda hangi G kodunun yanında yer aldığına göre değişir. Kodlar ya modaldir, yani iptal edilene veya farklı bir koda geçilip değiştirilene kadar yürürlükte kalırlar ya da modal değildir, yani sadece mevcut blokta etkilidirler. En yaygın kullanılan harfler ve anlamları şu şekildedir;

A	X ekseni etrafında döndürme
B	Y ekseni etrafında döndürme
C	Z ekseni etrafında döndürme
D	Kesici çapı telafisi
F	İlerleme hızı
G	G kodları
H	Takım uzunluğu telafisi
I	Dönme hareketindeki yay merkezi X vektörü
J	Dönme hareketindeki yay merkezi Y vektörü
K	Dönme hareketindeki yay merkezi Z vektörü
M	M kodları
N	Blok numarası
O	Program numarası
P	Bekleme süresi
Q	Delme işlemlerinde kullanılır
R	Yarıçap değeri
S	Dönme devri
T	Takım numarası
X	X koordinatı
Y	Y koordinatı
Z	Z koordinatı

Tablo 1. CNC adres kodları

A,B,C alfabetik harfleri 4 ve 5 eksen tezgâhlarda, X, Y,Z eksenleri etrafındaki dönmeyi ifade eder G kodları ile kullanılır. Derece cinsinde açıyı ifade eder ve noktadan sonra 3 basamak kadar hassasiyettedir.

Ör: G1 A28.894 C90

D Kesici takım çapı aşınmasını ve sapmasını telafi etmek için kullanılır. D'ye verilen değer Takım numarasıdır. Yanı D1 denildiğinde tezgaha T kodu ile tanıtılan 1 numaralı takımın telafisinin yapılacağını anlatır. Her zaman G41 veya G42 hareketi ile birlikte kullanılır. Çağrıldığında, kontrol kaydı okur ve takım

yolunu kayıttaki değere göre telafi eder. Sola telafi için (G41) sağa telafi için (G42) kullanılır.

Ör: G1 X5 D1

F ilerleme hızı, talaş kaldırma zamanı kullanılan kesici takımın ilerleme hızıdır.

G93 kodu ile kullanılırsa ilerleme hızının birim değeri dakikada inç cinsinden hareket olur, G94 kullanılırsa dakikadaki ilerleme değeri olur.

Ör: G1 X463 Y0 Z0 F21

G kodu, Bilgisayar sayısal Kontrollü tezgahlar için kullanılan bir programlama dilidir. Makinenin nereye hareket edeceğini bildirir.

Ör: G1 X6 Y0 Z-1 F18

H CNC tezgahlarında kullanılan kesici takımların uzunlukları ve çapları birbirinden farklıdır Kesici takımların boy farklılıklarının ölçülüp tezgâh offset sayfasına girilmesi sonucu takım boy farklılıklarının kalibrasyonu yapılmış olur. H harfi her zaman tamsayı ile kullanılır. Bu satırda yanında G43 ve Z koordinatı da yer alır

Ör: G43 H3 Z5

I G2 ve G3 kodlarında kullanılır. Yayın yay merkezinden başlangıcına olan X mesafesidir.

Ör: G2X22.5 Y17 I6 J0

J G2 ve G3 kodlarında kullanılır. Yayın, yay merkezinden başlangıcına olan Y mesafesidir.

Ör: G3 X26 Y15 I0 J3

K G2 ve G3 kodlarında kullanılır. Yayın, yay merkezinden başlangıcına olan Z mesafesidir.

Ör**:** G3 X36 Y11 I0 K1.8

M Yardımcı fonksiyon kodlarıdır. Her zaman tam sayı ile ifade edilir. Kodların yazıldığı her blokta sadece bir tane M kodu bulunur.

Ör: M3

N Blok numaraları CNC programlarının okunmasını kolaylaştırır, alt programlarda daha çok kullanılır, 5 haneye kadar olan tam sayılardan oluşurlar.

Ör: N10 T2 M6

O Program numarasını ifade eder, tamsayı kullanılarak yazılır.

Ör: O1102(Blok İşleme)

P bekleme işlemi için kullanılır. Bekleme süresi saniye cinsindendir. Genellikle G4 ile birlikte verilir.

Ör: G4 P5

Q Delme işlemlerinde gagalama olarak tabir edilen yöntemde parçaya her dalıp geri çekilme sonrası bir sonraki dalma mesafesini belirtir.

Ör: G83 X12 Y15 Z-.2 F14 R1 Q1 P5

R Daire, yay, yay yarıçapı R veya I,J,K vektörleri kullanılarak tanımlanabilir. I, J, K'lar R' ler den daha güvenilirdir, bu nedenle bunların kullanılması önerilir.

Ör: G2 X12 Y15 R 12

S Dakikada aldığı devir (RPM) cinsinden iş mili hızı olarak tanımlanır. Ondalık sız bir tamsayı değeridir ve her zaman M3 (saat dönüş yönü CW) veya M4 (saat dönüş yönünün tersine CCW' de) ile birlikte kullanılır.

Ör: S1250 M3

T Kesici takım numarasını belirtmek için kullanılır. M6 kesici takım değiştirme kodu ile kullanılır.

Ör: T01 M6

X Koordinat sisteminde bulunan X ekseni değeri için kullanılır. Ondalıktan sonra dört haneye kadar izin verilir.

Ör: G1 X92.345

Y Koordinat sisteminde bulunan Y ekseni değeri için kullanılır

Ör: G1 Y22.341

Z Koordinat sisteminde bulunan Z ekseni değeri için kullanılır

Ör: G1 Z34.663

Alfabedeki harfler haricinde yaygın olarak kullanılan özel karakterler bulunmaktadır. **%** işareti program başlangıcı veya bitişini, ( ) yorum yazmak için, / Blok silme için, ; işareti Blok silme için kullanılırlar.

G Kodları

G ile başlayan kodlar, makineyi belirli bir hareket türü için hazırladıkları için hazırlık kodları olarak adlandırılır. Aşağıdaki tabloda yaygın olarak kullanılan G kodları ve anlamları bulunmaktadır.

G0	Hızlı hareket (Talaş kaldırmadan yapılan)
G1	İlerleme hızına bağlı olarak yapılan hareket
G2	Saat dönüş yönünde yapılan dairesel hareket
G3	Saat dönüş yönünün tersine yapılan dairesel hareket
G4	Kesici takımın talaş kaldırma işlemi sonundaki bekleme komutu
G28	Tezgâh sıfırına dönüş komutu
G40	Kesici çap telafisi kapalı
G41	Kesici çap telafisi (sol taraftan)
G42	Kesici çap telafisi (sağ taraftan)
G43	Kesici takım uzunluğu ofseti
G54	İş parçası sıfırının ayarlanacağı koordinat sistemi 1
G55	İş parçası sıfırının ayarlanacağı koordinat sistemi 2
G56	İş parçası sıfırının ayarlanacağı koordinat sistemi 3
G57	İş parçası sıfırının ayarlanacağı koordinat sistemi 4
G58	İş parçası sıfırının ayarlanacağı koordinat sistemi 5
G59	İş parçası sıfırının ayarlanacağı koordinat sistemi 6
G80	Delme döngüsünü iptali
G81	Delme döngesi
G82	Bekleme süreli delme döngüsü
G83	Gagalamalı delme yöntemi
G84	Klavuz çekme çevrimi
G90	Mutlak koordinatlandırma sistemi
G91	Artışlı koordinatlandırma sistemi
G98	Matkap çevrimi Başlangıç noktasına (R) geri döner.
G99	Delme döngüsü Referans düzlemine dönüş (son Z Yüksekliği)

Tablo 2. CNC G kodları

M Kodları

M ile başlayan kodlara yardımcı fonksiyon kodları denir. Soğutma sıvısı açıp kapama ve iş mili yönü gibi makinenin yardımcı seçeneklerini kontrol ederler. Her kod bloğunda sadece bir tane M kodu kullanılır. Aşağıdaki tablo en yaygın kullanılan M kodlarını ve anlamlarını listelenmiştir.

M0	Program durdurma
M1	Programı isteğe bağlı olarak durdurma
M2	Program sonu
M3	İş milini saat dönüş yönünde döndürme
M4	İş milini saat dönüş yönünün tersine döndürme
M5	İş milini durdurma
M6	Kesici takımı değiştirme
M8	Tezgah soğutma sıvısını açma
M9	Tezgah soğutma sıvısını kapama
M30	Program sonu

Tablo 3. CNC M kodları

KAYNAKLAR

1. N. Hatem, Y. Yusof, A.Z.A. Kadir, K. Latif, M.M. Abedlhafd, Optimization and execution of multiple holes-drilling operations based on STEP-NC, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 114 (2021) 2031–2043. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06958-y.
2. M. Mori, K. Yamazaki, M. Fujishima, J. Liu, N. Furukawa, A study on development of an open servo system for intelligent control of a CNC machine tool, CIRP Ann. - Manuf. Technol. 50 (2001) 247–250. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62115-5.
3. Y. Zhang, Q. Zeng, G. Mu, Y. Yang, Y. Yan, W. Song, Y. Gong, A design for a novel open, intelligent and integrated CNC system based on ISO 10303-238 and PMAC, Teh. Vjesn. 25 (2018) 470–478. https://doi.org/10.17559/TV-20170419111243.
4. S. Bukofzer, N. Livesey, A framework for an intelligent CNC and data model, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 19 (2002)727–735. https://doi.org/10.1007/ s001700200083
5. G. Yan, H. Chen, X. Zhang, C. Qu, Z. Ju, A dimensiondriven adaptive programming for tool-path planning and post-processing in 5-axis form milling of hyperboloidal-type normal circular-arc gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 106 (2020) 2735–2746. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04723-w.
6. X.B. Ma, Z.Y. Han, Y.Z. Wang, H.Y. Fu, Development of a PC-based open architecture software-CNC system, Chinese J. Aeronaut. 20 (2007) 272–281. https://doi.org/10.1016/S1000-9361(07)60044-2.
7. B.C. Kim, I. Song, D. Mun, Practical method for the fast generation of a CAM model for jet engine parts, Adv. Mech. Eng. 13 (2021). https://doi.org/ 10.1177/16878140211002700.

KARNAUBA VE BALMUMU VAKSLARI İLE HAZIRLANAN OLEOJELLERİN DSC VE FT-IR SPEKTROSKOPİSİ İLE KARAKTERİZASYONU

Selvanur KARA[1]
Dr. Öğr. Üyesi Halime PEHLİVANOĞLU[2]

[1]İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Gıda Mühendisliği, karas21@itu.edu.tr ORCID: 0000-0001-9444-8866
[2]Namık Kemal Üniversitesi, Veteriner Hekim Fakültesi,
hpehlivanoglu@nku.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3138-9568

1.GİRİŞ

Doymuş yağların aşırı tüketimi, küresel bir sorun haline gelen obezite başta olmak üzere ölümcül hastalıklardan olan kardiyovasküler hastalıklar, metabolik sendrom ve diyabetin önemli bir tetikleyicisi olarak kabul edilmektedir (WHO, 2002). Sağlık sorunlarının artmasını tetikleyen bu durumlar, gıda mevzuatlarında kademeli olarak kalıcı düzenlemelerin yapılmasını zorunlu kılmıştır. Bu düzenlemelerin başında trans yağ miktarının sınırlanması gelir. Hidrojenasyon uygulamaları, bitkisel yağın bazı gıda ürünlerinin kullanımıyla ilgili teknik problemlerin üstesinden gelmesine rağmen, doymuş ve trans yağ asidinin yüksek tüketimi nedeniyle kardiyovasküler hastalıklarla ilgili bazı sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Pehlivanoğlu vd., 2018a). Özellikle trans yağ miktarının kardiyovasküler hastalıklar ile ilgili öneminin her geçen gün artması ile birlikte sanayide yağların sertleştirme yöntemlerinden biri olan hidrojenasyon teknolojisisnin yerini interesterifikasyon, almıştır. İnterifikasyon teknolojisi trans yağ sorununa çözüm olmuş, ancak doymuş yağ miktarı konusuna çözüm olamamıştır. Bu nedenle günümüzde kahvaltılık ve paket margarinlerin tüketimi toplam doymuş yağ içeriği nedeniyle her geçen gün azalmaktadır. Bunun neticesinde doymamış yağ içeriği fazla olan sürülebilir yağ üretimine alternatif oleojelasyon gibi yeni çalışmalara ilgi artmaktadır (Pehlivanoğlu, 2021).

Son yıllarda yağların katılaştırılmasında kullanılmaya başlanılan oleojelasyon ya da organojelasyon ile ilgili çalışmalar eczacılık, gıda, kozmetik ve petrokimya gibi birçok alanda yapılmaktadır. Oleojelasyon sıvı yağların jel-benzeri katı yağlara yüksek miktarda doymuş yağ içermeden dönüştürülmesi işlemidir. Sıvı yağların katılaştırılması işleminde, 3 boyutlu ağ yapının oluşarak sıvı kısmın immobilize olmasını sağlayan ajanlar olejelatör olarak adlandırılmaktadır. Bilinen ve sıklıkla kullanılan oleojelatörler bitki vaksları, monodigliseritler, yağ asitlerinin alkolleri ya da esterleri, fosfolipitler ve fitosterollerdir. (Dassanayake vd., 2011).

Gıda alanında kullanılan oleojelatörlerin güvenli, düşük konsantrasyonlarda etkili jel oluşturabilme kabiliyetinde, piyasada kolay bulunabilir ve ekonomik olması önemlidir. (Marangoni, 2012).

Oleojelasyon işleminde yağın çeşidi, oleojelatörün türü ve konsantrasyonu son ürünün reolojik, tekstürel ve termal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Oleojelatörler, güvenli, düşük konsantrasyonlarda etkili jel oluşturabilme özelliğine sahip, piyasada kolay bulunabilir ve ekonomik olmalıdır (Marangoni, 2012). Bu özellikler göz önüne alındığı zaman gıda uygulamalarında bitkilerden ekstrakte edilen vakslar kullanılmaktadır. Kullanılması uygun olarak bildirilenler ayçiçeği vaksı, balmumu vaksı, pirinç kepeği vaksı, candelilla vaksı, karnauba

vaksı, berri vaks ve doymuş mono-gliseritlerdir. (Dassanayake vd., 2009; Da Pieve vd., 2010; Hwang vd., 2012; Marangoni, 2012).

Gıda alanında yaplan oleojelasyon çalışmalarında oleojelatör olarak, ayçiçeği vaksı, balmumu vaksı, pirinç kepeği vaksı, candelilla vaksı, karnauba vaksı ve berri vaksı, yağ olarak ise; ayçiçek, mısır, zeytin, fındık ve kanola yağı kullanılmıştır. (Patel and Dewettinck, 2015; Öğütçü ve Yılmaz., 2015a; Öğütçü ve Yılmaz, 2015b; Jang vd., 2015).

Oleojellerin gıdalardaki uygulama alanları ile ilgili çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Çikolata ve türevlerinde (Stortz vd.2014), kurabiye, kek vb. ürünlerde (Yılmaz ve Öğütçü, 2015; Mert ve Demirkesen, 2016; Pehlivanoğlu vd.,2018b), baharatlı alman sosislerinde (Zetzl vd., 2012), hamburger köftesinde (Moghtadaei vd., 2018; Tabibiazar vd., 2020), sürülebilir kahvaltılık margarinlerine alternatif olarak (Hwang vd., 20121; Yılmaz ve Öğütçü 2014a; Yılmaz ve Öğütçü 2014b; Patel vd.,2014a; Yılmaz, ve Demirci, 2021), kızartma yağı olarak (Lim vd., 2007; Çakır ve Özer, 2021), krem peynir ve dondurma üretiminde (Zulim vd., 2013; Bemer, 2016) olmak üzere oleojel ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Çalışmamızda ayçiçek yağı, karnauba ve balmumu vaksı ile 32 farklı formülasyon oluşturulmuş ve bunların erime profili ile moleküler yapısının incelenmesi amaçlanmıştır.

2.MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Oleojel hazırlanmasında kullanılan ayçiçek yağı İstanbul'da bir süper marketten, balmumu ve karnauba vaksı ise gıda katkı maddesi satışı yapan bir firmadan temin edilerek materyal olarak kullanıldı. Tablo 2.1'de verilen yanıt yüzey metodu ile elde edilen modelleme konsantrasyonları kullanılarak, ayçiçek yağı ile hazırlanan oleojel numuneleri -20 °C de muhafaza edilerek analiz edilmiştir. Tüm analizlerde üniversite laboratuvarında bulunan cihazlar kullanılmıştır.

2.2. Metod

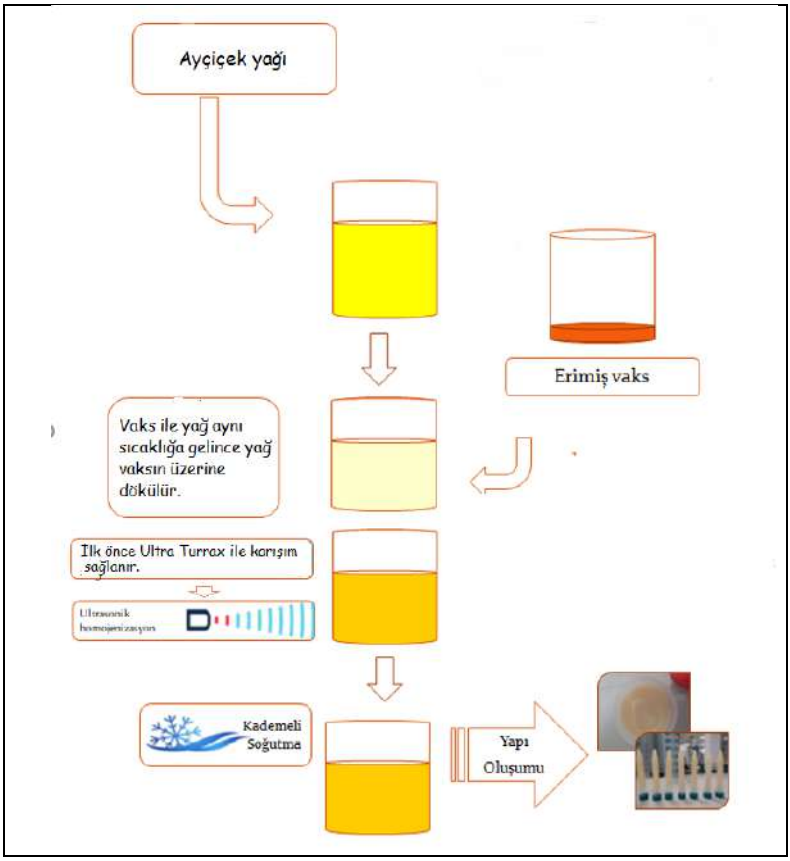
2.2.1. Oloejelin Hazırlanması

Modelleme tablosunda yer alan değerlere göre vaks ve yağ tartımı yapıldı. Ayçiçek yağı ile vaksların homojen karışımının sağlanması için su banyosunda ayçiçek yağı, balmumu vaksı, karnauba vaksı 85 °C'ye getirilerek vaksın erimesi sağlandı. Vaks yağın üzerine eklenerek 5 dk süresince IKA® T18 Dijital Ultra Turrax ile karışımı sağlandı. Ardından SELECTA® Ultrasonik karıştırıcıya

alınarak 5 dakika daha karıştırıldı. Hazırlanan oleojeller falkon tüplere konularak oda sıcaklığında 1 saat bekletildi. Ardından +4 OC'de 1 saat bekletildikten sonra analizlerde kullanılmak üzere -20 °C'de saklandı (Şekil 2.1).

Tablo 2.1: Karnauba ve Balmumu Vaksının Modellemesi

Örnek İsimleri	**% Konsantrasyon**	
	Balmumu Vaksı	Karnauba Vaksı
1-3	2,442	0,557
2-3	1,785	1,214
3-3	2,089	0,910
4-3	0,551	2,448
5-3	1,960	1,039
6-3	1,521	1,478
7-3	0	3
8-3	3	0
1-5	3,037	1,962
2-5	0,904	4,095
3-5	3,580	1,419
4-5	2,497	2,502
5-5	3,281	1,718
6-5	4,067	0,932
7-5	0	5
8-5	5	0
1-7	3,515	3,485
2-7	5,039	1,960
3-7	4,220	2,779
4-7	1,283	5,716
5-7	5,783	1,216
6-7	2,456	4,543
7-7	0	7
8-7	7	0
1-10	6,472	3,527
2-10	1,804	8,195
3-10	4,949	5,050
4-10	3,467	6,532
5-10	9,097	0,902
6-10	8,093	1,906
7-10	0	10
8-10	10	0



Şekil 2.1: Oleojel Hazırlama Aşamaları (Pehlivanoğlu vd., 2017).

2.2.2.DSC Analizi

1 gün boyunca -20 °C'de depolanan oleojellerin termal özelliklerinin belirlenmesinde diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile (Shimadzu, DSC-60 Plus Series, USA) ölçümler yapılmıştır. Numuneler 15-20 mg 160 µL alüminyum DSC panlarında dikkatle tartılarak hazırlanmıştır. Numuneler, 20 °C'den 5 °C / dk süreyle 100 °C'ye ısıtılmıştır. Elde edilen termogramdan erime olaylarının başlangıcı, on-set (Ton), erime noktası (Tpeak), erime entalpileri (ΔH) hesaplanmıştır (Dassanayake vd., 2009).

2.2.3.NMR Analizi

Oleojeller ilk önce bir su banyosunda eritilmiş ve her bir numuneden 3.5 ml alınarak cam NMR tüpüne konulmuştur. Hazırlanan numuneler ilk önce 60 ° C'de (su banyosu) 5 dakika sonra 0 ° C'de 1 saat bekletilmiş ve daha sonra tüm tüpler sırasıyla 10,20, 30 ve 35 ° C'de 30 dakika bekletilerek şartlandırılmıştır. Her şartlandırılan dereceden sonra Minispec Bruker marka Mq 20 NMR cihazı ile

okuma yapılarak % katı yağ içeriği (Solid Fat Content) tespit edilmiştir. Analizde AOCS Cd 16b-93 metodu kullanılmıştır (AOCS, 1998).

2.2.4.FT-IR Spektroskopisi

Oleojel numuneleri -20 °C'den alınarak kızılötesi spektrumları, FT-IR Spektrofotometresinde (Shimadzu, IRTracer-100) ATR ile kullanılarak analiz edilmiştir. Numunelerin ATR-FTIR spektrumları 4 cm-1 rezolusyonda her bir spektrumda 16 tarama toplanarak gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm öncesi background olarak hava kullanılmıştır. İki ölçüm arasında cihazın kristal yüzeyi etil alkol ile temizlenmiştir.

2.2.5.Yağ Asidi Komposizyonu

Çalışmada kullanılacak ayçiçek yağının yağ asidi içeriği belirlenmiştir. 0,1 gr ayçiçek yağı tartılıp ve üzerine 10 ml hegzan eklenmiştir. 100 µL 2 mol/L KOH ilave edildikten sonra 30 sn vorteks ile karıştırılmıştır. 400 devirde 5 dakika santrifüj edilen örneklerin üst fazından alınarak GC'de analiz edilmek üzere viallere alınmıştır. Analizde ThermoScientific Trace 1300 cihaz kullanılmıştır. Cihazda FID dedektör ile yağ asidi kolonu (100m x 0,25 mm) enjeksiyon blok sıcaklığı 250 °C ye ayarlanmıştır. Fırın sıcaklığı 250 °C'de 1 dk tutulduktam sonra 270 °C'ye 20 °C artışla 300 °C'ye yükseltilmiştir. Taşıyıcı gaz olarak helyum kullanılmıştır (Anonymous, 1998).

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Oleojellerin Erime Profili

3.1.1. Balmumu Vaksı ve Karnauba Vaksının Erime Profili

Çalışmamızda kullanılan balmumu ve karnauba vaksının termal özellikleri erime başlangıç sıcaklığı (T_{on}), erime bitiş sıcaklığı (T_{end}), erime sıcaklığı (T_{peak}), erime entalpisi (Hc) değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Balmumu Vaksı ve Karnauba Vaksı Termal Davranışı

	T_{peak} (°C)	T_{on} (°C)	T_{end} (°C)	ΔH (J/g)
Beeswax	66,75	63,48	68,77	89,82
Carnauba wax	88,68	85,30	90,00	51,28

3.1.2. %3 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin Erime Profili

Tablo 2.1'de yer alan bileşimlerde üretilen %3 vaks içeriğine sahip, ayçiçek yağı oleojellerinin termal özellik değerleri olan, erime başlangıç sıcaklığı (T_{on}), erime bitiş sıcaklığı (T_{end}), erime sıcaklığı (T_{peak}), erime entalpisi (ΔH) Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 incelendiğinde, %3 vaks ve vaks karışımı içeren oleojellerin erime sıcaklıklarının 49,8 C^0 ile 81,2 °C arasında değiştiği, en yüksek erime noktasının 81,2 C^0 ile %3 karnauba vaksı içeren oleojel, en düşük erime noktasının ise 49,8 °C ile %3 balmumu vaksı içeren oleojel olduğu tespit edilmiştir. Karışım içeren vakslar incelendiğinde en yüksek erime noktasının 79,3 °C; en düşük erime noktasının 65,3 °C olduğu tespit edilmiştir. Karışım olarak eklenen vaksların oranlarının değişimiyle erime noktasının %21,4 oranında arttığı saptanmıştır.

Söz konusu oleojel numunelerinin, erime entalpi değerlerinin 0,2 J/g ile 18,3 J/g arasında olduğu görülmüştür. Balmumu vaksı ve susam yağı ile elde edilen bir oleojel çalışmasında oleojellerin entalpi değerlerinin 5,77 ile 12,78 J/g olduğu tespit edilmiştir (Moghtadaei vd., 2018).

Yılmaz ve Öğütçü (2014b), yaptıkları çalışmada ticari şortening ürünlerinin erime sıcaklığını 41,86 °C, %3 balmumu vaksı içeren oleojel numunesinin erime sıcaklığını 45,22 °C olarak tespit etmişlerdir. Çalışmamız literatürde yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında sonuçların benzer olduğu görülmektedir. Ancak vaksların karışım şeklinde eklenmesiyle karnauba vaksı erime noktasına (88,68 °C) yakın oldukları görülmüştür.

Tablo 3.3: %3 Vaks Karışımı Oleojellerinin Termal Davranışı

No	%3 Vaks Karışımı		Termal Davranış			
	Balmumu vaksı	Karnauba vaksı	Tpeak (°C)	Ton (°C)	Tend (°C)	ΔHc (J/g)
1-3	2,442	0,557	67,1±0,007	62,0±4,546	68,9±9,142	0,2±0,098
2-3	1,785	1,214	79,3±4,963	78,6±4,737	80,8±4,617	0,9±1,117
3-3	2,089	0,910	65,3±5,084	64,3±5,826	71,2±11,228	5,6±3,634
4-3	0,551	2,448	70,2±10,180	67,2±8,492	81,4±0,919	3,6±0,615
5-3	1,960	1,039	77,2±1,371	76,2±2,609	81,8±1,972	1,1±0,035
6-3	1,521	1,478	74,6±0,848	73,3±0,318	77,6±3,775	0,5±0,028
7-3	0	3	81,2±0,261	76,8±4,744	84,9±1,088	11,9±15,412
8-3	3	0	49,8±2,786	48,7±1,308	63,9±20,958	18,3±24,663

3.1.3. %5 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin Erime Profili

Tablo 2.1'de yer alan bileşimlerde üretilen %5 vaks içeren ayçiçek yağı oleojellerinin termal özelliklerinden erime başlangıç sıcaklığı (T_{on}), erime bitiş

sıcaklığı (T_{end}), erime sıcaklığı (T_{peak}), erime entalpisi (ΔHc) değerleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3'e göre %5 vaks ve vaks karışımı içeren oleojellerin erime sıcaklıkları 57,2 ile 83,8 °C arasında değişmektedir. En düşük erime sıcaklığı 57,2 °C ile %5 balmumu vaksı içeren oleojelde tespit edilirken en yüksek erime sıcaklığı 83,8 °C yalnızca %5 karnauba vaksı içeren oleojelde tespit edilmiştir. Ayrıca oleojellerin erime entalpilerinin 1,1-8,3 J/g arasında olduğu tespit edilmiştir.

Karışım vakslı oleojeller incelendiğinde; en düşük erime sıcaklığı 67,2 °C iken en yüksek erime sıcaklığı 80,2 °C olarak bulunmuştur. Karışım olarak eklenen vaksların oranlarının değişimiyle erime noktasının %19,3 oranında arttığı saptanmıştır. %3 vaks ve vaks karışımları içeren oleojellere göre %5 vaks ve vaks karışımlarında hem erime profilinde hem de entalpi değerlerinde artış görülmüştür.

Literatürde yer alan diğer bir çalışmada %5 pirinç kepeği vaksı ile hazırlanan zeytin yağı oleojelinin erime sıcaklığı 57,9 °C olarak bulunmuştur (Dassanayake vd., 2009). Bu sonuçlar elde ettiğimiz sonuçlar ile karşılaştırıldığında %5 balmumu vaksı içeren oleojel için yakın değerleri göstermektedir. Ancak çok yakın değerlerin çıkmamasındaki başlıca nedenin kullanılan vakstaki safsızlıklardan ileri geldiği düşünülmektedir. Vaks karışımı bulunan oleojellerdeki erime sıcaklığındaki değişim kullandığımız vaksın yüksek erime sıcaklığına sahip karnauba vaksı (88,68 °C) olmasından kaynaklanmaktadır. Karışım olan oleojellerin erime sıcaklığın karnauba vaksı erime sıcaklığına daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.4: %5 Vaks Karışımları İçeren Oleojellerin Termal Davranış

No	%5 Vaks Karışımı		Termal Davranış			
	Balmumu Vaksı	Karnauba Vaksı	Tpeak (°C)	Ton (°C)	Tend (°C)	ΔHc (J/g)
1-5	3,037	1,962	75,7±0,685	73,7±2,234	79,1±1,025	2,4±0,113
2-5	0,904	4,095	80,2±0,749	77,1±1,378	82,2±1,428	1,1±0,763
3-5	3,580	1,419	75,6±0,509	68,2±1,350	81,5±1,513	1,1±0,077
4-5	2,497	2,502	78,2±1,916	76,6±0,905	80,7±4,171	3,9±4,270
5-5	3,281	1,718	77,8±3,577	74,9±6,264	81,2±2,078	2,5±9,680
6-5	4,067	0,932	67,2±5,883	63,4±5,388	77,7±0,502	1,2±0,272
7-5	5	0	57,2±0,466	56,3±0,650	57,4±2,559	3,3±0,282
8-5	0	5	83,8±0,014	78,6±1,562	87,4±2,432	8,3±0,127

3.1.4. %7 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin Erime Profili

Tablo 2.1'de yer alan bileşimlerde üretilen %7 vaks içeren ayçiçek yağı oleojellerinin termal özelliklerinden erime başlangıç sıcaklığı (T_{on}), erime bitiş sıcaklığı (T_{end}), erime sıcaklığı (T_{peak}), erime entalpisi (Hc) değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 incelendiğinde %7 vaks ve vaks karışımı eklenen oleojellerin erime sıcaklıkları 59,5 ile 85,2 °C arasında değiştiği saptanmıştır. En düşük erime noktası 59,5 C^0 ile %7 balmumu vaksı içeren oleojelde en yüksek erime noktası 85,2 °C ile karnauba vaksı içeren oleojelde tespit edilmiştir. Ayrıca oleojellerin erime entalpilerinin 0,1-5,3 J/g arasında olduğu bulunmuştur.

Karışım vakslı oleojeller incelendiğinde; en düşük erime sıcaklığı 70,7 °C iken en yüksek erime sıcaklığı 79,5 °C olarak bulunmuştur. Karışım olarak eklenen vaksların oranlarının değişimiyle erime noktasının %12,4 oranında arttığı saptanmıştır. %5 vaks karışımı içeren oleojellerin entalpi değerleri ile %7 vaks ve karışımı içeren oleojellerin entalpi değerleri farklılık göstermektedir. Soya yağı ve karnauba vaksı kullanılarak oleojel elde edilen bir çalışmada erime sıcaklığı 75 °C olarak tespit edilmiştir (Thakur vd., 2022).

Yapılan diğer bir çalışmada balmumu vaksı ve karnauba vaksı kullanılarak fındık yağı oleojelleri elde edilmiştir. Elde edilen fındık yağı oleojellerinden %7 balmumu vaksı içeren oleojelin erime sıcaklığı 48,87 °C iken %7 karnauba vaksı içeren oleojelin erime sıcaklığı 69,3 °C dir (Öğütçü, 2014). Aynı çalışmada zeytinyağı ve aynı vakslar kullanılarak elde edilen oleojellerden %7 balmumu vaksı içeren oleojelin erime sıcaklığı 49,1 °C iken %7 karnauba vaksı içeren oleojelin erime sıcaklığı 71,8 °C dir. Yapılan diğer bir çalışmada sızma zeytin yağı ile zenginleştirilmiş rafine fındık yağının karnauba vaksı eklenerek oleomargarin üretilmiştir. Elde edilen oleomargarinlerin erime sıcaklık değeri 76,09 °C olarak tespit edilmiştir. (Çevik vd., 2022). Sonuçlar çalışmamızdaki değerler ile karşılaştırıldığında değerler arasında farklılık bulunmaktadır. Farklılığın kullanılan vaksın özellikleri ve yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 3.5: %7 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin Termal Davranışı

No	%7 Vaks Karışımı		Termal Davranış			
	Balmumu Vaksı	Karnauba Vaksı	Tpeak (C^O)	Ton (C^O)	Tend (C^O)	ΔHc (J/g)
1-7	3,515	3,485	78,9±4,560	76,7±6,569	81,3±3,266	0,8±2,269
2-7	5,039	1,960	75,9±0,898	74,9±1,110	77,9±0,127	2,6±0,565
3-7	4,220	2,779	70,7±5,409	69,4±4,893	73,6±7,382	0,9±0,063
4-7	1,283	5,716	76,7±0,431	69,1±0,010	83,4±0,205	3,3±1,025
5-7	5,783	1,216	71,3±5,388	68,2±2,276	75,9±9,885	0,8±0,346
6-7	2,456	4,543	79,5±0,148	75,8±4,603	82,7±0,707	2,2±0,049
7-7	0	7	85,2±0,565	75,2±7,134	88,2±6,788	0,1±0,120
8-7	7	0	59,5±0,070	50,1±1,576	60,9±0,091	5,3±0,084

3.1.5. %10 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin Erime Profili

Tablo 2.1'de yer alan bileşimlerde üretilen %10 vaks içeren ayçiçek yağı oleojellerinin termal özelliklerinden erime başlangıç sıcaklığı (T_{on}), erime bitiş sıcaklığı (T_{end}), erime sıcaklığı (T_{peak}), erime entalpisi (Hc) değerleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5'e göre %10 vaks ve vaks karışımı eklenen oleojellerin erime sıcaklıkları 62,2 ile 86,4 °C arasında olduğu tespit edilmiştir. En düşük erime sıcaklığı 62,2 °C %10 balmumu vaksı içeren oleojele ait iken, en yüksek erime sıcaklığı 86,4 °C %10 karnauba vaksı içeren oleojele aittir. Oleojellerin erime entalpi değerleri ise 0,3-11,2 J/g dır. Karışım vakslı oleojeller incelendiğinde; en düşük erime sıcaklığı 69,9 °C iken en yüksek erime sıcaklığı 81,9 °C olarak bulunmuştur. Karışım olarak eklenen vaksların oranlarının değişimiyle erime noktasının %17,2 oranında arttığı saptanmıştır.

Fayaz vd., (2017) propolis ve balmumu vaksı ile hazırlanan nar çiçeği yağı oleojellerinde %10 propolis vaks içeren oleojelin erime sıcaklığını 53,96 °C, %10 balmumu vaksı içeren oleojelin erime sıcaklığını 55,23 °C olarak saptamışlardır. Ayrıca bu iki vaks kullanılarak hazırlanan oleojelin erime sıcaklığı 54,03 °C olarak tespit edilmiştir. Yılmaz ve Öğütçü, (2014a) yaptıkları çalışmada, %10 balmumu vaksı içeren zeytinyağı oleojelinin erime sıcaklığını 40,04 °C, %10 ayçiçeği vaksı içeren zeytinyağı oleojelinin erime sıcaklığını ise 48,01 °C olarak tespit etmişlerdir. Yapılan diğer bir çalışmada %10 balmumu vaksı içeren susam yağı oleojelinin erime sıcaklığı 52,25 °C tespit edilmiştir (Moghtadaei vd., 2018). Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar litaratürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında elde edilen oleojellerin erime sıcaklıklarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedenin de karnauba vaksının erime noktasının yüksek olması ve artan vaks konsantrasyonudur.

Tablo 3.6: %10 Vaks İçeren Oleojelerin Termal Davranışı

3.2. FT-IR Spektrumlarının İncelenmesi

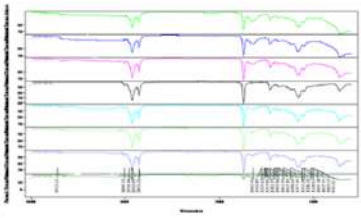
No	%10 Vaks Karışımı		Termal Davranış			
	Balmumu Vaksı	Karnauba Vaksı	Tpeak (°C)	Ton (°C)	Tend (°C)	ΔHc (J/g)
1-10	6,472	3,527	78,6±0,530	79,7±0,593	79,9±0,905	0,5±0,685
2-10	1,804	8,195	79,0±0,707	77,9±0,424	81,2±0,784	1,7±1,420
3-10	4,949	5,050	80,8±0,523	79,7±0,855	81,7±0,261	0,3±0,141
4-10	3,467	6,532	81,9±0,304	80,3±0,014	84,2±0,862	4,7±0,466
5-10	9,097	0,902	77,8±0,749	77,3±0,720	78,8±0,678	1,3+1,689
6-10	8,093	1,906	69,9±6,823	66,8±7,841	74,4±3,429	2,0±0,756
7-10	0	10	86,4±0,084	70,1±0,091	87,8±0,537	8,6±0,487
8-10	10	0	62,2±0,952	44,9±2,371	59,3±4,659	11,2±4,058

Kullanılan materyallerin ve hazırlanan oleojellerin molekül yapısının incelenmesi Infrared bölgenin 4000- 500 cm^{-1} dalga boyu aralığında ölçümler yapılmıştır. Literatürde; 2800-3100 cm^{-1} dalga boyu alanında C-H germe titreşimi piki, 1700-1800 cm^{-1} bölgesinde C = O germe titreşimi piki ve 900-1400 bölgede C-O-C germe titreşimi ve C-H bükme titreşimi vermektedir. (Tay vd., 2002). Daha ayrıntılı şekilde trigliserit fonksiyonel gruplarını temsil eden ana pikler Tablo 3.6'de gösterilmiştir (Vlachos 2006).

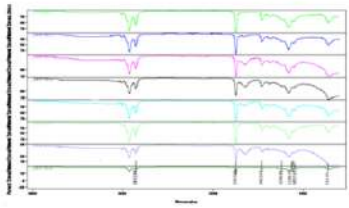
Tablo 3.6: Trigliserit Fonksiyonel Grupları

Dalga Boyu	Fonksiyonel Grupların Davranışı
2922 cm^{-1} ve 2853 cm^{-1}	Alifatik CH_2 grubunun simetrik ve asimetrik germe titreşimi
1743 cm^{-1}	Trigliseritlerin ester karbonil fonksiyonel grubu
1465 cm^{-1}	CH_2 ve CH_3 alifatik grupların bükme titreşimleri
1238 cm^{-1} ve 1163 cm^{-1}	C=O ester gruplarının titreşimi
709 cm^{-1}	C-H bükme titreşimi

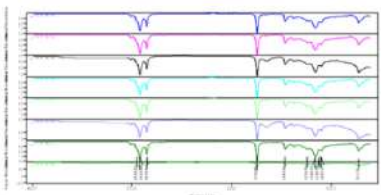
Genel olarak %3 %5 %7 ve %10 saf ve karışım vaks içeren oleojellerin yakın frekanslarda FT-IR spektrum sinyali verdiği görülmüştür. (Şekil 3.1, 3.2, 3.3, 3.4).



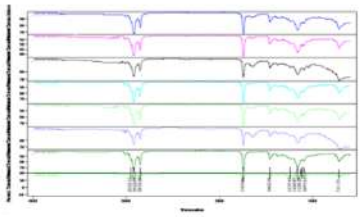
Şekil 3.1: %3 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin FT-IR Spektrumları



Şekil 3.2: %5 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin FT-IR Spektrumları



Şekil 3.3: %7 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin FT-IR Spektrumları



Şekil 3.4: %10 Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin FT-IR Spektrumu

%3 saf ve karışım vaks içeren oleojellerin CH_2 bantlarının verdiği pikler, yaklaşık olarak 2923 ve 2853 cm^{-1}'dir. %5 saf ve karışım vaks içeren oleojellerin CH_2 bağlarının verdiği pikler yaklaşık olarak 2922 ve 2853 cm^{-1}'dir. %7 saf ve karışım vaks içeren oleojellerin CH_2 bağlarının verdiği pikler yaklaşık 2921 ve 2852 cm^{-1}'dir. %10 saf ve karışım vaks içeren oleojellerin CH_2 bağlarının verdiği pikler ise 2919 ve 2852 cm^{-1}'dir. Her ne kadar spektrum değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiş olsa da yapılan literatür çalışmaları, dalgacıklarda çok küçük değişikliklerin van der Waals etkileşimlerine atfedilebileceğini düşündürmektedir (Lupi vd., 2016; Ren, Wang ve Zhang, 2015).

Hint yağı ile yapılan bir oleojel çalışmasında 1743 cm^{-1}'deki hint yağındaki trigliseritlerin karbonil grubunu işaret etmiştir (Singh, 2013). Oleojel üretiminde kullanılan ayçiçek yağından kaynaklanan 1743 cm^{-1}'deki pikler literatür çalışmaları ile benzer sonuçlar olduğunu göstermektedir.

Nar çekirdeği yağı ile balmumu vaksı ve propolis kullanılarak oleojel üretilen diğer bir çalışmada da 1735- 1750 cm^{-1} 'de ve 1000-1300 cm^{-1}'de pikler elde edilmiştir (Fayaz, 2017). Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlarda 1160 cm^{-1}'de bulunan pik yine benzer sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Literatür çalışmaları ile benzer sonuçların elde edilmesi oleojel üretiminde kullanılan sıvı yağların, vaksların yapısal özelliklerinin çoğunlukla benzer olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.3. Ayçiçek Yağının Yağ Asidi Kompozisyonu

Çalışmamızda oleojel üretiminde kullanılan ayçiçek yağının yağ asidi kompozisyonu Tablo 3.7' de verilmiştir. Ayçiçek yağ asidi bileşimi Ulusal Gıda Kompozisyon Veri Tabanı ve Türk Gıda Kodeksi'ne göre C:16:0 yağ asidinin 4

ile 7,6 arasında, C:18:0'in 2,1 ile 6,5 arasında, C:18:1'in 14 ile 71,8 arasında, C:18:2'nin ise 18,7 ile 74,0 arasında olması gerektiği bildirilmektedir (Anonim, 2012; Anonim 2019). Çalışmamızda kullanılan ayçiçek yağının kodekse uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 3.7: Ayçiçek Yağı Yağ Asidi Komposizyonu

Yağ Asidi (g/100g)	Ayçiçek Yağı
C:16:0	4,57
C:16:1	-
C:18:0	3,99
C:18:1 (cis-9)	25,99
C:18:2 (cis-9,12)	65,99
C:18:3	0,82
C:20:0	0,69
C:20:1	-
C:22:0	0,72
C:22:1	0,10

3.4. Vaks Karışımı İçeren Oleojellerin % Katı Yağ İçeriği

Çalışmamızde üretilen olejellerden her konsantrasyon için bir numune seçilerek 10, 20, 30 ve 35 C^{O}'de ki % katı yağ içeriği (SFC) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.8'degösterilmiştir. Oleojelatör konsantrasyonu arttıkça %SFC değerlerinin de arttığı, yükselen sıcaklık ile birlikte % SFC değerlerinin düştüğü görülmektedir.Katı yağlardaki % SFC değeri, katı yağlar için ürünün son kalitesini, kristallenme eğilimini, elastik yapısını, sürelebilirliliğini direk etkileyen bir parametredir Piyasadaki kâse margarinlerin 20 C^{o}'ki % SFC değerleri 5,5 ile 15,27 arasında, paket margarinlerin ise 20 C^{o}'ki % SFC değerleri 22,90 ile 35,75 arasında değişim göstermiştir (Pehlivanoğlu vd. 2016). Çalışmamızda elde edilen oleojellerin 20 C^{o}'ki SFC değerleri %2,68 ile 10, 10 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlarımız oleojellerin katı yağlara iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.8: Oleojellerin %Katı Yağ İçeriği

	Vaks Konsantrasyonu		**% SFC**			
	Karnauba V.	BalmumuV.	10 C^{o}	20 C^{o}	30 C^{o}	35 C^{o}
%3	1,478	1,521	2,92	2,68	2,28	2,20
%5	0	5	4,71	4,67	4,49	3,94
%7	1,960	5,039	6,50	6,37	5,20	4,86
%10	6,532	3,677	10,30	10,10	8,90	8,40

Yılmaz ve Öğütçü, (2015) Nar çiçeği yağı ile karnauba vaks ve monogliserid ile elde edilen oleojellerde SFC değerlerini 35 ve 20 C^0'de incelemişlerdir. Karnauba vaksı oleojellerinin 20 C^0'de SFC değerlerini %2,96-8,71 arasında tespit etmişlerdir. Monogliserid oleojellerinin SFC değerinin ise %2,59- 9,43 arasında olduğunı tespit etmişlerdir. 35C^0'ye 20 C^0'de oleojellerin katı yağ içeriğinin oleojelatörlerden daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Bu da oleojellerin en önemli özelliğinin, sıvı yağlardan oluşmuş olduklarını göstermektedir. Ayrıca oleojellerin yağ asidi profilindeki doymuşluk seviyelerinde bir değişiklik olmadığı bildirilmektedir.

Fındık yağı, karnauba vaks ve balmumu vaks kullanılarak oleojel üretilen bir çalışmada 20 ve 35 C^0'de SFC değerleri incelenmiştir. Endüstriyel şortening yağın 20 C^0 deki SFC değeri %30 iken hazırlanan oleojellerin 20 ve 35 C^o deki SFC değerleri %1,96 – 8,52 arasında tespit edilmiştir. (Yılmaz ve Öğütçü, 2014b)

Yapılan başka bir çalışmada oleojeller kullanılarak elde edilen kek ürününde düşük sıcaklık seviyelerinde düşük SFC oranı gözlemlenmiştir (Pehlivanoğlu vd, 2018b). Unlu mamüllerde elde edilen hamurun karıştırma sırasında gaz tutma kabiliyeti arttırmak için gerekli miktarda SFC gerekmektedir (Ghotra, Dyal ve Narine, 2002). Literatür çalışmaları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında oleojellerin katı yağ içereklerinin benzer olduğu görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya nüfusunun hızla artışı, yaşam koşulları ve Gıda Endüstrisinde kullanılan bazı teknolojiler beslenmeye bağlı rahatsızlıkları arttırmaktadır. Özellikle endüstriyel katı yağ tüketiminin obezite, kardiyovasküler hastalıklar ve diyabette önemli bir etkisi olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle doymamış yağ asidi yüksek, trans yağ içermeyen sıvı yağların kullanılması önerilmektedir. Gıda endüstrisinde katı yağlar oksidatif dayanım, sürülebilirlilik, elastikiyet, performans vb. özellikleri nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Bu sebeple hidrojenasyon, interesterifikasyon ve fraksiyonlama gibi teknolojiler kullanılarak sıvı yağların katılaştırılması söz konusudur. Ancak özellikle hidrojenasyon teknolojisi ile doymuş ve trans yağ asidi içeriği artarak insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Son yıllarda bitkisel yağın vakslar ile jelleştirilmesi işlemi olan oleojelasyon teknolojisinde yapılan çalışmalarda sağlık açısından doymamış yağ asidi daha fazla olmakta ve GRAS statüsünde olan vakslar kullanılmaktadır.

Ayçiçek yağı kullanarak karnuba vaksı, balmumu vaksı ve karışımları ile %3 %5 %7 ve %10 vaks içeren oleojeller üretilerek ilk olarak DSC ile erime profili incelenmiştir. Balmumu vaksı kullanılarak elde edilen oleojellerin erime noktası düşük, karnauba vaksı kullanılarak elde edilen oleojellerin erime noktasının daha

yüksek olduğu görülmüştür. Vaks karışımları ile elde edilen oleojellerin erime profili ise karnauba vaksına bağlı olarak artış göstermiştir.

Üretilen oleojellerin moleküler yapısı FT-IR spektroskopisi ile ortaya konmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda van der Walls bağlarının gösterdiği sinyallere bağlı olarak, değişen vaks konsantrasyonlarının FT-IR spektroskopisi sinyallerinde küçük değişimler olduğu saptanmıştır.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki oleojelatör olarak kullanılan vaksın sahip olmuş olduğu özellikler doğrudan elde edilen oleojelin özelliklerini etkilemektedir. Bundan sonra vaksların karakterizasyonu ve optimizasyonu ile ilgili çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Anonim. (2012). Türk Gıda Kodesi, Bitki Adı Anılan Yağlar Tebliği, Tebliği No: 2012/29
2. Anonim. (2019). TürKomp, Ulusal Gıda Kompozisyon Veri Tabanı, versiyon 1.0, www.turkomp.gov.tr
3. Anonymous. (1998). Adjusting flow properties of the chocolate mass by means of emulsifiers. Technical memorandum, Palsgaard Industry A/S, Juelsminde.
4. AOCS (1998). Official methods Cc 16b–93. Official method and recommended practice of the American Oil Chemists' Society, 5th edn. AOCS Press, Champaign.
5. Bemer, H. L., Limbaugh, M., Cramer, E. D., Harper, W. J., & Maleky, F. (2016). Vegetable organogels incorporation in cream cheese products. Food Research International, 85, 67-75.
6. Çakır, M., & Özer, C. O. (2021). Kaplamalı tavuk ürünlerinin kızartılmasında oleojel kullanımının etkilerinin araştırılması (Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi).
7. Çevik, Ş., Özkan, G., & Karacabey, E. (2022). Oleomargarine Production Using Hazelnut Oil-Carnauba Wax Mixture: Process Optimization and Characterization. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 6(2), 118-131.
8. Da Pieve, S., Calligaris, S., Co, E., Nicoli, M. C., Marangoni, A. G. (2010). "Shear nanostructuring of monoglyceride organogels", Food Biophys., 5, 211-217.
9. Dassanayake, L. S. K., Kodali, D. R., Ueno, S., & Sato, K. (2009). Physical properties of rice bran wax in bulk and organogels. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *86*(12), 1163.
10. Dassanayake, L.S.K., Kodali, D.R., Ueno, S. (2011). "Formation of oleogels based on edible lipid materials", *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 16 (5), 432-439.
11. Fayaz, G., Goli, S. A. H., Kadivar, M., Valoppi, F., Barba, L., Balducci, C., ... & Nicoli, M. C. (2017). Pomegranate seed oil organogels structured by propolis wax, beeswax and their mixture. European Journal of Lipid Science and Technology
12. Ghotra, B. S., Dyal, S. D., & Narine, S. S. (2002). Lipid shortenings: a review. Food Research International, 35(10), 1015-1048.
13. Lim, J., Jeong, S., & Lee, S. (2017). Evaluation of soybean oil-carnauba wax oleogels as an alternative to high saturated fat frying media for instant fried noodles. LWT-Food Science and Technology, 84, 788-794.

14. Lupi, F. R., Greco, V., Baldino, N., de Cindio, B., Fischer, P., & Gabriele, D. (2016). The effects of intermolecular interactions on the physical properties of organogels in edible oils. Journal of colloid and interface science, 483, 154-164.
15. Hwang, H. S., Kim, S., Singh, M., Winkler-Moser, J. K., & Liu, S. X. (2012). Organogel formation of soybean oil with waxes. Journal of the American Oil Chemists' Society, 89(4), 639-647.
16. Marangoni, A.G. (2012). "Organogels: an alternative edible oilstructuring method", J. Am. Oil Chem. Soc., 89(5), 749-780.
17. Mert, B., & Demirkesen, I. (2016). Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product. Food chemistry, 199, 809-816.
18. Moghtadaei, M., Soltanizadeh, N., & Goli, S. A. H. (2018). Production of sesame oil oleogels based on beeswax and application as partial substitutes of animal fat in beef burger. Food Research International, 108, 368-377.
19. Öğütçü, M., (2014). Yemeklik oleojellerin hazırlanması ve gıda ürünü olarak kullanımlarının araştırlması. Doktora Tezi. Çanakkale 18 Mart Üniversitesi.
20. Öğütçü, M., Yılmaz, E. (2015a). "Characterization of hazelnut oil oleogels prepared with sunflower and carnauba waxes". International Journal of Food Properties, 18(8), 1741-1755.
21. Öğütçü, M., Yılmaz, E. (2015b). "Comparison of the pomegranate seed oil organogels of carnauba wax and monoglyceride", Journal of Applied Polymer Science, 132(4).
22. Patel, A. R., & Dewettinck, K. (2015). Comparative evaluation of structured oil systems: Shellac oleogel, HPMC oleogel, and HIPE gel. European journal of lipid science and technology, 117(11), 1772-1781.
23. Patel, A. R., & Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. Food & function, 7(1), 20-29.
24. Patel, A. R., Cludts, N., Sintang, M. D. B., Lesaffer, A., & Dewettinck, K. (2014). Edible oleogels based on water soluble food polymers: preparation, characterization and potential application. Food & function, 5(11), 2833-2841.
25. Pehlivanoğlu, H., Çakır, B., & Demirci, M. (2016). Investigation of Physicochemical Properties of Bowl and Packet Margarines Produced by Interesterification Technology.
26. Pehlivanoğlu, H., Demirci, M., Toker, O. S., Konar, N., Karasu, S., & Sagdic, O. (2017). Oleogels, a promising structured oil for decreasing

saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications. Critical reviews in food science and nutrition, 1-12.
27. Pehlivanoglu, H., Demirci M., & Toker O. S. (2018a). Rheological properties of wax oleogels rich in high oleic acid, *International Journal of Food Properties,* DOI:10.1080/10942912.2017.1381704.
28. Pehlivanoglu, H., Ozulku, G., Yildirim, R. M., Demirci, M., Toker, O. S., & Sagdic, O. (2018b). Investigating the usage of unsaturated fatty acid-rich and low-calorie oleogels as a shortening mimetics in cake. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(6), e13621.
29. Pehlivanoglu, H., Akcicek, A., Can, A. M., Karasu, S., Demirci, M., & Yilmaz, M. T. (2021). Effect of oil type and concentration on solid fat contents and rheological properties of watery oleogels. Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse, 98(3), 177-186.
30. Ren, Y., Wang, B., & Zhang, X. (2015). Synthesis of photoresponsive cholesterol-based azobenzene organogels: dependence on different spacer lengths. Beilstein journal of organic chemistry, 11(1), 1089-1095.
31. Singh, V. K., Pal, K., Pradhan, D. K., & Pramanik, K. (2013). Castor oil and sorbitan monopalmitate based organogel as a probable matrix for controlled drug delivery. Journal of Applied Polymer Science, 130(3), 1503-1515.
32. Stortz, T. A., De Moura, D. C., Laredo, T., & Marangoni, A. G. (2014). Molecular interactions of ethylcellulose with sucrose particles. RSC Advances, 4(98), 55048-55061.
33. Tabibiazar, M., Roufegarinejad, L., Hamishehkar, H., & Alizadeh, A. (2020). Preparation and characterization of carnauba wax/adipic acid oleogel: A new reinforced oleogel for application in cake and beef burger. Food Chemistry, 333, 127446.
34. Thakur, D., Singh, A., Prabhakar, P.K., Meghwal, M., Upadhyay, A. (2022). Optimization and characterization of soybean oil-carnauba wax oleogel. LWT, 157, 113108.
35. W.H.O., (2002). The World Health Report, Reducing Risks, Promoting Healthy Life. World Health Organization, Geneva
36. Yilmaz, E., Demirci, Ş. (2021). Preparation and evaluation of virgin olive oil oleogels including thyme and cumin spices with sunflower wax. Gels, 7(3), 95.
37. Yılmaz, E., & Öğütçü, M. (2014a). Comparative analysis of olive oil organogels containing beeswax and sunflower wax with breakfast margarine. Journal of food science, 79(9).

38. Yılmaz, E., & Öğütcü, M. (2014b). Properties and stability of hazelnut oil organogels with beeswax and monoglyceride. Journal of the American Oil Chemists' Society, 91(6), 1007-1017.
39. Yılmaz, E., & Öğütcü, M. (2015). The texture, sensory properties and stability of cookies prepared with wax oleogels. Food & function, 6(4), 1194-1204.
40. Zetzl, A. K., Marangoni, A. G., & Barbut, S. (2012). Mechanical properties of ethylcellulose oleogels and their potential for saturated fat reduction in frankfurters. Food & function, 3(3), 327-337.
41. Zulim Botega, D. C., Marangoni, A. G., Smith, A. K., & Goff, H. D. (2013). The potential application of rice bran wax oleogel to replace solid fat and enhance unsaturated fat content in ice cream. Journal of food science, 78(9).

SİBER GÜVENLİK VE DOS SALDIRILARI

Dr. Semih Çakır[1]
Dr. Nesibe Yalçın[2]

[1]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Kdz. Ereğli M.Y.O., Bilgisayar Teknolojileri Bölümü ORCID: 0000-0003-3072-9532
[2]Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü ORCID: 0000-0003-0324-9111

1. Giriş

Akıllı nesne ve kablosuz ağ teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ışığında günümüz teknolojisi modern yaşamın her noktasında yer almaktadır. Eğitim, sağlık, askeri, ticaret, finans, ulaşım, lojistik vb. birçok alanda teknoloji kullanımı yaygınlaşmakta, hatta bireysel kitlelerce bağımlılık seviyesine ulaşacak derecede hızla artmaktadır. Birçok hizmetin elektronik ortamda hızlı ve daha işlevsel sunulması, özellikle bankacılık/finans, uzaktan kontrol sistemleri, tedarik zinciri ve kamu bilgi sistemlerinde tasarruf ve verimliliğe destek sağlamaktadır. Yaygın hale gelen teknoloji beraberinde riskleri de getirmektedir. "Siber güvenlik", "Siber suçlar" ve "Siber saldırılar" gibi birçok terim günlük yaşamda sıkça duyulur hale gelmiştir. Siber saldırılar, her geçen gün farklı yapılar ile ortaya çıkıp kamu kurum ve kuruluşları, özel kurumları ve kişisel bilgi sistemleri gibi önemli unsurları tehdit etmektedir.

İnternete bağlı olan cihazlar ve kullanıcılardan üretilen verilerin depolandıkları ortamlar da tehlike altında olabilmektedir. Sunucular (yerelde veya bulutta), içerisinde barındırdıkları içerikler ile saldırıların odak noktasındadır. Gereksiz isteklerle aşırı yüklenen sunucu kaynaklarının isteklere yanıt veremeyerek bulundukları sistem içerisinde hizmet verememesi yıkıcı sonuçlara neden olmaktadır. İtibar kaybı ve maddi kayıplar bu sonuçlardan bazılarıdır. Hizmet aksatma ya da erişim engelleme olarak adlandırılan DoS (Denial of Service, Hizmet Reddi) saldırıları, geniş alan ağında yer alan herhangi bir sunucu hizmetine belli bir süre ya da süresiz olarak kullanıcılar tarafından ulaşılamamasını hedefleyen bir siber saldırı türüdür. DoS saldırılarının oluşumu itibari ile iki tür yapıdan bahsedilebilir; birinci durumda servisin git gide aşırı yavaşlaması, ikinci durumda ise servisin tamamıyla hizmet dışı kalarak çökmesidir.

Bu çalışmada, DoS saldırı türlerinden wabbit (rabbit virus, tavşan virüsü) olarak da bilinen fork bomb (çatal bomba) saldırısı ele alınmıştır. Özellikle Linux veya Unix tabanlı bir sistemde hizmet reddi/aksatma saldırısı olarak ifade edilmektedir. Temelinde bash (komut çalıştırılmadan önce üzerinden değişiklik yapılabilmesini sağlar) işlevi olan bu saldırıda, işlevler devamlı olarak yinelemeli şekilde yürütülerek sistem kaynaklarını tüketir, özellikle belleği doldurarak sistemin işleyişini engeller. Çalışmanın ikinci bölümünde, siber güvenlik hakkında bilgi verilmiş, üçüncü bölümde DoS saldırısı ve türleri ele alınmış, fork bomb saldırı türünün oluşumu detaylı incelenmiştir. Ayrıca DoS saldırılarına ve fork bomb saldırılarına karşı alınabilecek önlemler sunulmuştur. Son bölümde ise siber güvenliğin sağlanmasında DoS saldırılarının ele alınmasının önemine vurgu yapılarak çalışma sonuçlandırılmıştır.

2. Siber Güvenlik

Finans, enerji, tıp, eğitim kurumları başta olmak üzere birçok kuruluş bilgi ağını etkin bir şekilde kullanmaktadır. Bilgi ağı içerisinde birbirine bağlı olan elektronik nesneler günlük hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Büyük veriyi oluşturan bilgi ağındaki her nesnenin ürettiği veri, dijital ortamdan toplanarak depolanır, işlenir ve sonrasında ağ içerisinde paylaşılır. Her geçen gün nesnelerin artışına bağlı artan dijital bilgi toplanıp paylaşıldıkça verinin kontrolü ve korunması daha güç hale gelir. Milli güvenlik ve ülke istikrarı için siber güvenlik hayati önem taşımaktadır. Siber güvenlik, bilgi ağına bağlı sistemleri ve sahip olunan varlıkları yetkisiz erişim ve olası zarardan korumaya çalışan bir oluşum olarak dikkat çekmektedir. Siber güvenlik hususunda varlıkların korunması Şekil 1' de sunulduğu gibi 3 boyutta gerçekleştirilebilir.

Şekil 1. Siber güvenliği ilgilendiren temel alanlar

İlk boyutta kişisel güvenlik ele alınmaktadır. Kişisel veriler olarak ifade edilen sadece kullanıcının adı – soyadı bilgileri değildir, kullanıcıya ait olan ve kullanıcıyı tanımlayan benzersiz her türlü bilgi özelinde kişisel veri olarak kabul edilebilir. Çevrimiçi ve çevrimdışı ortamlarda çoğu zaman kullanıcıyı tanımlayan, kullanıcı özeline ait olan verilerin ifşası ile karşılaşılmaktadır. Yasal olmayan ortamlarda mahremiyet içerikli bilgilerin ifşa edilmesi suç olarak kabul edilmekte ve siber suçlar kapsamında ele alınmaktadır. Kimlik bilgileri, banka bilgileri ve bilgi işlem alt yapısında kullanılan cihazların korunması gerekmektedir. İkinci boyutta ele alınan ise kurumsal düzeyde sahip olunan bilgilerdir. Kuruluşun itibarını, verilerini ve sahip olduğu müşteri bilgilerini korumak kuruluşların sorumluluğundadır. En son boyutta ise devlet düzeyinde ulusal güvenliğin sağlanması ve ulus vatandaşlarının güvenliği ve refahını tehlikeye atacak siber saldırılara karşı önceden koruma mekanizmalarının devreye sokulmasıdır. Ulusal siber güvelik tedbirlerinin alınması hususunda siber güvenlik ilkeleri 4. maddede siber güvenliğin sağlanmasında kişinin, toplumun, kurum ve kuruluşlar ile devletin hukuki ve sosyal yükümlülükleri tümüyle yerine

getirmesi (Yeniman Yıldırım ve Adalı, 2017) açıkça ifade edilmiştir. Şekil 1'de ifade edilen 3 boyut temelinde bir bütün olarak ele alınmalıdır. Çünkü her boyut birbiri ile ilişkili olup özelden genele doğru her boyutun sorumluluğu bulunmaktadır. Kişisel bir hata kurumsal tarafı etkileyebilir. Kurumsal hatalar ise devlet olarak uluslararası alanda güvenlik ve politik sorunlara neden olabilir.

Zincir olarak ifade edilen siber güvenlikte en zayıf halkanın insan yani kullanıcı olduğu düşünüldüğünde kullanıcıya ait verilerin korunması oldukça önemlidir. Şekil 2' de kullanıcılardan elde edilen ve kullanıcının özeline ait veriler gösterilmiştir. En yaygın olarak kullanılan veriler özellikle sosyal medya üzerinden gönderilip alınan fotoğraflar, metin mesajları ve özel mesajlardır. Adı, soyadı, doğum yeri, doğum tarihi, kimlik numarası, e-posta adresi, araç plaka numarası, telefon numarası ve bankacılık alanında kullanılan anne kızlık soyadı gibi veriler kullanıcı tarafından bilinen ve kullanıcıyı tanımlamaya yarayan ayırt edici bilgilerdir.

Şekil 2. Kullanıcıya ait olan kişisel veri alanları

Sağlık, eğitim, iş ve finans verileri de çevrimiçi ortamlarda kullanıcı kimliğini belirlemek için kullanılabilir. Özellikle sağlık verileri pandemi süreci ile birlikte saldırganların hedefi haline gelmiştir. Her randevu ile hasta bilgi sistemine işlenen veriler, saldırganlar tarafından ele geçirilip fidye yazılımı (ransomware) saldırıları ile hastane bilgi sistemini kilitleyebilir, hastanenin hizmet vermesini engelleyebilir. Ayrıca hasta bilgilerini belirli bir bedel karşılığında başkalarına satabilir ya da kişiye şantaj amaçlı kullanabilir. Kişilerin hasta doktor mahremiyetini ihlal ederek hastanın sosyal yaşamını, iş yaşamını ve aile yaşamını olumsuz etkileyebilir.

Bireysel veya kurumsal saldırılara maruz kalan alt yapı sistemleri ile varlıklar için gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik ilkeleri ihlal edilmektedir. DoS saldırıları, siber güvenlik unsurlarından erişilebilirliği tehdit etmektedir. Hizmet aksatma/engelleme olarak gerçekleştirilen bu saldırılar sonucu alt yapı

sistemlerinden özellikle sunuculara kullanıcıların bağlantıları kısıtlanarak erişimleri (geçici süreliğine de olsa) aksamaktadır. Çeşitli güvenlik mekanizmaları bulunsa da tam anlamıyla DoS ataklarının tümüne yönelik engellemeler gerçekleştirilememektedir. Bir sonraki bölümde, DoS saldırı türleri ve açık kaynak işletim sistemlerine yönelik gerçekleştirilen DoS saldırı türü olarak bilinen fork bomb saldırılarının oluşum aşamaları ele alınmış ve sistemde oluşturacağı olası tahribatlar hakkında bilgiler verilmiştir.

3. DoS Saldırı Türleri

DoS saldırıları, hedef sunucu, uygulama ve/veya servisin hizmet dışı kalmasını amaçlar. Saldırgan, bellek, işlemci ve bant genişliği gibi sistem kaynaklarına aşırı yüklenerek ve protokoller, cihazlar ve uygulamalardaki çeşitli güvenlik açıklarını (zafiyetleri) manipüle ederek hizmetleri aksatmaya çalışır ve çevrim içi faaliyetlerin durmasına neden olabilir. Saldırganın hizmeti aksatmak veya engellemek için tek bir makine/cihaz kullanması DoS saldırı, birden fazla cihazdan saldırıyı başlatması ise DDoS (Distributed DoS, Dağıtık Hizmet Engelleme) saldırısıdır. Her iki saldırının da nihai amacı, sisteme ait kaynakları büyük miktarda kullanarak ve sisteme ağ trafiğini aşırı yükleyerek hizmeti çökertmektir (Yihunie vd., 2018).

DoS saldırıları, hedef sisteme ciddi zararlar verebilmektedir. Örneğin, 2016 yılında DNS (Domain Name System, Alan Adı Sistemi) sağlayıcısı Dyn arka arkaya DoS saldırısına maruz kalmış, saldırı çok sayıda kullanıcının belirli bir süre hizmetleri kullanamamasına neden olmuştur (Mansfield-Devine, 2016). 2018 yılında GitHub sunucularına saniyede 126,9 milyon paket ile saniyede 1,35 Terabiti bulan bir DoS saldırısı gerçekleştirilmiş, kullanıcıların siteye erişiminde aksama olmuştur (Horawalavithana vd., 2019). Bankalar, devlet kurumlarının yanı sıra Amazon, eBay, Yahoo, Facebook ve Twitter gibi çeşitli ağların da DoS saldırılarının kurbanı olduğu görülmüştür (Alieyan vd., 2016). Bu bölümde, günümüzde saldırganlar tarafından sıklıkla başvurulan DoS saldırı yöntemleri sunulmuştur.

3.1. TCP SYN Seli Saldırısı

SYN paketleri, istemci ile sunucu arasında iletişimi başlatmak için kullanılmaktadır. TCP sunucusuna karşı yapılan DoS saldırısı olan TCP (Transmission Control Protocol, İletişim Kontrol Protokolü) SYN seli saldırısı (flood attack) ile hedef sunucuya bir anda çok sayıda SYN paketi gönderilip hedefe ait kaynakları tüketmek ve hedef sunucunun hizmet vermesini engellemek amaçlanmaktadır (Çelikbilek, 2016). Bu saldırı, TCP'nin üçlü el sıkışma (three way handshake) açığını kullanır. Şekil 3(a)'da doğru bir şekilde gerçekleşen üçlü

el sıkışma gösterilmiştir. İstemci tarafından sunucuya SYN paketi ile bağlantı isteği gönderilir, sunucu SYN-ACK paketi ile istemciye onay verir ve bağlantı için bellekte bir alan ayırır. İstemci ACK yanıtını hemen gönderir ve böylece iletişim başlar. Şekil 3(b)'de ise TCP SYN seli saldırısı görselleştirilmiştir. Saldırgan, hedeflenen sunucuya (kurbana) çok sayıda bağlantı isteğini çok hızlı bir şekilde gönderir, böylece sunucu gönderilen SYN paketlerinin her birine sürekli olarak onay paketleri göndermeye ve ACK paketlerini beklemeye devam eder. Sunucu, yarı açık bırakılan bağlantılarla meşgul edilerek meşru isteklere yavaş bir şekilde yanıt verir veya yanıt veremez duruma getirilmektedir. Ayrıca her bir bağlantı için bellekte belirli bir süre alan ayrıldığından sunucu kaynakları da tüketilmektedir.

(a) (b)

Şekil 3. (a) TCP üçlü el sıkışma, (b) TCP SYN seli saldırısı

İşletim sistemleri için belirli bir yarı açık bağlantı sayısı söz konusudur. Bu değer artırılarak SYN seli saldırılarının etkisi azaltılabilir. Bu değerin aşılması durumunda, önceki yarı açık bağlantıların üzerine yazdırılarak bellek tüketimi de sınırlandırılabilir. Bu şekilde meşru isteklerin sonlandırma ihtimali de söz konusudur (Şamlıoğlu, 2021). Bir diğer saldırı etkisini azaltma yöntemi, bağlantı talepleri ile ayrılan bellek alanları için daha küçük zaman aşımı sürelerinin belirlenmesidir. Cevapsız kalan SYN paketleri için bekleme süreleri bu sayede azaltılmış olacaktır. SYN saldırılarını önlemek için SYN vekil sunucu/güvenlik duvarı kullanılabilir. Böylece üçlü el sıkışmanın kullanıcı/istemci ile SYN vekil sunucu arasında gerçekleştirilmesi sağlanarak hedef sunucu saldırıdan korunmuş olacaktır (Çelikbilek, 2016).

3.2. ICMP Seli Saldırısı

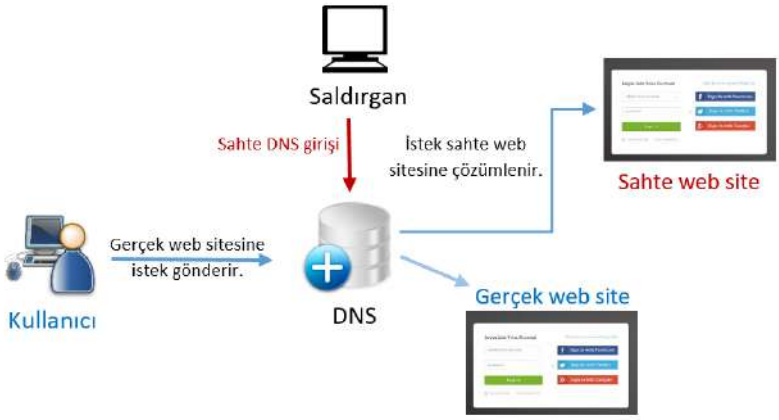
ICMP (Internet Control Message Protocol, İnternet Kontrol Mesaj Protokolü), ağ boyunca paketlerin teslimini engelleyen ağ sorunları (örneğin, "alıcıya erişilemiyor", "zaman aşımı", "parametre sorunu", "daha fazla parçaya ihtiyaç var") hakkında geri bildirim sağlar (Gupta vd., 2016). Herhangi bir IP (Internet

Protocol, İnternet Protokolü) ağ cihazı, ICMP mesajlarını gönderme, alma veya işleme yeteneğine sahiptir. Saldırgan, ICMP paketlerini saldırı amacıyla kullanmaktadır. Ping seli saldırısı olarak da bilinen ICMP seli saldırısı, Şekil 4'de gösterilmiştir (Harshita, 2017). Hedeflenen kaynağa anormal derecede fazla sayıda ICMP yankı isteği (ping) gönderilerek ICMP seli (ICMP flood) saldırısı başlatılır. Gelen her bir ICMP isteğine cevap vermeye çalışan sunucunun sistem kaynakları (CPU, bant genişliği) tüketilir ve böylece hedef sunucu hizmet veremez, istemciler tarafından erişilemez hale gelir. ICMP saldırılarını önlemek amacıyla gelen paketlerin sayısı ve boyutu sınırlandırılabilir.

Şekil 4. ICMP seli saldırısı

3.3. DNS Saldırıları

TCP/IP protokolünü kullanan bir ağ ortamına veya internete bağlanan her bir cihaza bir IP adresi atanır. IP adresine sahip olan cihazlar, internette birbirlerine bağlanabilir ve iletişim kurabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan IP adresleme türü IPv4'e göre bir IP adresi, 8 bitlik noktalarla ayrılmış 4 adet sayıdan oluşur. Bu sayı dizisini hatırlamak ve kullanmak pratik olmadığından IP adreslerine karşılık gelen daha akılda kalıcı alan adları (domain) tanımlanmıştır. İnternetin önemli bileşenlerinden biri olan DNS, alan adı-IP adresi ve IP adresi-alan adı eşleştirmesini sağlar. Saldırganlar, DNS altyapısını kullanarak kullanıcıları sahte adreslere yönlendirme (hedefin kaynak IP adresini taklit etme), DNS sunucularını ele geçirme ve sunucuya erişimi engelleme gibi çeşitli kötü niyetli faaliyetler gerçekleştirmektedir.



Şekil 5. DNS ön bellek zehirlenmesi saldırısı

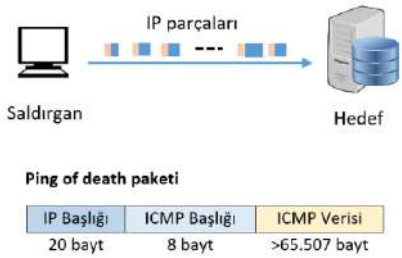
Saldırganların en çok tercih ettikleri DNS saldırı yöntemleri, DNS yansıma/aynalama (reflection), DNS yükseltme (amplification), DNS sahtekarlığı (spoofing)/DNS önbellek zehirlenmesidir (cache poisoning). Örnek bir DNS ön bellek zehirlenmesi saldırısının gerçekleştirilme yöntemi Şekil 5'de (Kendir, 2022) verilmiştir. DNS çözümleyici, istekte bulunan herhangi bir kullanıcıya ad çözümlemesi sağlar. Saldırgan, DNS çözümleyiciden gelen yanıtı taklit eder (DNS önbelleğini zehirler) ve böylece kullanıcılar kötü niyetli sunuculara/sahte web sitelerine yönlendirilir. DNS yükseltme saldırılarında ise saldırgan, DNS sunucularına sahte IP adreslerine (kurbanın gerçek IP adresi) sahip çok sayıda sorgu gönderir ve mümkün olan en büyük yanıtı almaya çalışır. DNS çözümleyici, sahte IP adresine en büyük yanıtı gönderir ve hedef IP adresi yanıtı alır. Böylece bant genişliğinin tükenmesi, normal ağ işlemini çok hızlı bir şekilde etkileyecek ve sonunda sunucu (hedef makine) zayıflayacaktır.

DNS saldırılarını sürekli olarak izleme, tespit etme ve durdurma için dahili bir DNS güvenlik çözümü tercih edilebilir. Dahili bir DNS güvenlik çözümü, kötü amaçlı yazılımların DNS' den yararlanmasını engellemeye, DNS altyapısını korumaya ve veri hırsızlığını önlemeye yardımcı olur. DNS yükseltme saldırılarına karşı savunma için yetkili sunucular, DNS yanıt hızı sınırlaması ile yapılandırılmalıdır (Alieyan vd., 2016).

3.4. Ping of Death

Ping of death (ölüm pingi) saldırısı, ICMP tabanlı bir DoS saldırı türüdür. Ping programı, ana bilgisayara bir ICMP yankı istek (echo request) mesajı göndererek ve ICMP yankı cevabı (echo reply) alarak ana bilgisayarın erişilebilir olup olmadığını test eder. Ayrıca, ana bilgisayara gidiş-dönüş süresini ölçer, böylece

ana bilgisayara olan uzaklığı öğrenmeye ve iletişim kurmak için gerekli yolun (ağın) tıkalı olup olmadığını belirlemeye yardımcı olur. ICMP yankı istek mesajları, IP datagramı içinde bulunur ve veri alanında taşınır. Veri alanının izin verilen maksimum boyutu ise 65.507 bayttır. IP datagramları, başlık uzunluğu (genellikle 20 bayt) ve ICMP başlık bilgisi (8 bayt) dahil olmak üzere maksimum 65.535 bayt boyutunda olabilir.

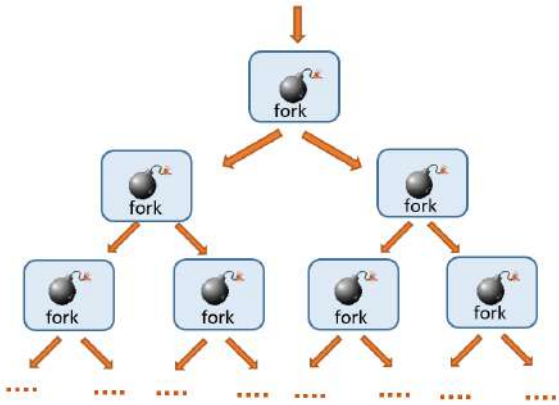


Şekil 6. Ping of death saldırısı

Ağda dolaşırken kendinden daha düşük kapasitede bir ağa geldiğinde IP datagramı, daha sonra alıcı tarafından yeniden birleştirilen daha küçük datagramlara bölünür İşletim sistemleri, tüm parçaları yeniden bir araya getirene kadar datagramı işlememektedir (Harris ve Hunt, 1999). Ping of death saldırısını mümkün kılan ise 65.507 bayt boyutundan büyük veri içeren bir yankı isteği datagramı gönderebilme (bkz. Şekil 6) ve IP parçalamanın gerçekleştirilme şeklidir. Birçok işletim sistemi gelen bu maksimum boyuttaki paketleri anlayamaz, öyle ki cevap veremez duruma gelebilir ve çökebilir. Yeni nesil ağ cihazları tercih edilerek bu saldırılar önlenebilir.

3.5. Fork Bomb

Fork bomb (çatal bombası) saldırısı, sistemi yavaşlatmak veya çökertmek için çok sayıda alt işlemi kısa sürede klonlayan bir DoS saldırı türüdür. Bir fork (çatal), Unix ve Linux sistemlerinde kullanılan mevcut bir işlemi (ebeveyn) alır ve onun bir kopyasını (çocuk) oluşturur (Atasever, Özçelik ve Sağıroğlu, 2019). Şekil 7'de görüldüğü gibi işlemleri sonsuz bir şekilde çatallar/tekrarlar ve böylelikle bellek, işlemci ve diğer sistem kaynaklarının tüketimine neden olur.



Şekil 7. Fork bomb saldırısı

Asıl hedefi sistem kaynaklarından belleği doldurmak olan bu saldırı, belleği doldurana kadar kendini kopyalamaya devam eder (Imperva, 2022). Bu süre içerisinde çalıştırıldığı sistemde diğer görevlerin (task) ve işlemlerin (process) çalışmasını engeller. Sistemde donma ile başlayan durum, sistemin kilitlenmesi sonucu makinenin yeniden başlatılmasına kadar sürer ve bu işlem sonucunda büyük oranda veri kayıpları oluşabilir. Sistemi kilitleyen bu saldırıda, temel donanım giriş birimleri de etkisiz hale gelerek işletim sistemi üzerinden oturum kapatma, sistemi yeniden başlatma vb. işlemler başarısız olmaktadır. Kaynakları tükenen sistem saldırı ile başa çıkamaz ve çökme meydana gelir. Sunucu taraflı yoğun kullanım oranına sahip açık kaynak işletim sistemlerinin çoğu Ubuntu, Debian, AIX veya Red Hat başta olmak üzere fork bomb saldırısına karşı savunmasızdır. Fork bomb saldırısının genel yapısı ile ilgili özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Fork bomb saldırısının genel özellikleri

Özellik	**Açıklama**
Saldırı gerçekleştirme zorluğu	Kolay
Gereksinimler	Linux veya Unix terminali
Saldırı Kategorisi	Linux kabuk (shell) komut dosyası oluşturma
Saldırı Önkoşulu	Linux veya Unix Bash
İşletim Sistemi Uyumluluğu	BSD, Linux, MacOS, Unix
Saldırı komutu Bash Betiği	: ( ) { : | : & } ; :

Fork bomb saldırısının oluşumu oldukça kolaydır. Fork bomb saldırısı için temel bir Linux kabuk (shell) betiğinden faydalanılmaktadır. Tablo 2'de her bir betik komutuna ait açıklamalar verilmiştir.

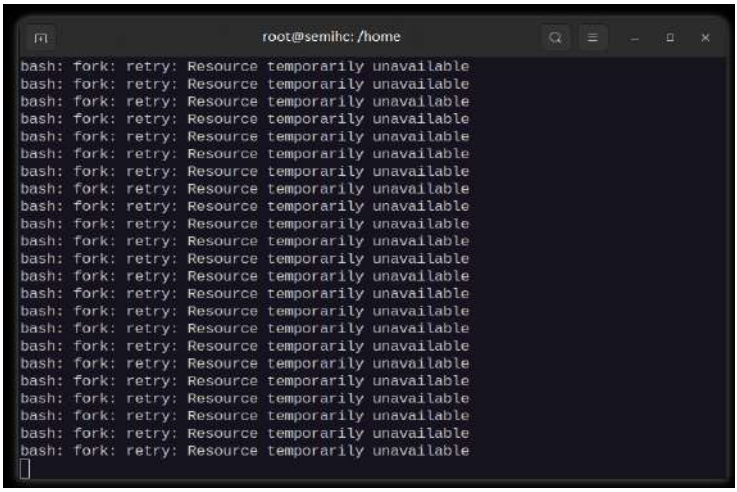
Tablo 2. Betik komutlara ait açıklamalar

Karakter	Açıklama
: ( )	İşlev tanımlanır
{ }	Bir işlevin çalıştıracağı komutlar başlangıç-bitiş
: | :	İşlem kopyasının belleğe yüklenmesi ve yinelemeli olarak komutun çalıştırılması
&	Önceki komutu arka plana gönder ve çalıştır
;	İfade sonu / bitir
:	Fonksiyonu çağırır ve en son yapılan işlev komutunu çalıştırır

Komutun çalıştırılması sonucunda sonsuz bir döngü içerisinde kendini devamlı tekrarlayan bir süreç meydana gelmektedir. İşlevini yitiren bir sistem tüm kaynakları, Tablo 2'de verilen süreçleri gerçekleştirmek için kullanmaktadır. Sonuç olarak taleplere karşılık ver(e)meyen bir sistem ile karşı karşıya kalınmaktadır. Sistemin yeniden başlatılması (reset) sonucu veri kayıpları kaçınılmazdır. Şekil 8'de C programlama dilinde yazılmış "Fork Bomb" saldırısının kod bloğu örneği verilmiştir. Fork bomb saldırısı açık kaynak işletim sisteminde çalıştırıldıktan sonra kaynak tüketimine ait terminal ekranında oluşan ekran görüntüsü ise Şekil 9'da verilmiştir.

```
// C programlama dilinde Fork Bomb saldırısı oluşturma
// Program eğitim ve farkındalık oluşturmak için geliştirilmiştir.
// Çalıştırıldığında sistem yanıt vermeyebilir.
#include <stdio.h>
#include <sys/types.h>
int main ( )
{
        while(1)
            fork( );
      return 0;
}
```

Şekil 8. Fork bomb saldırısı C kodu



Şekil 9. Fork bomb saldırısı sonrası sistemin verdiği yanıt

Fork bomb saldırısını önlemek için kullanıcıların sahip olacağı maksimum işlem sayısı (limit) sınırlandırılabilir. Saldırıyı tespit etmek için, her işlem için çatal işlemlerinin sayısı saklanır, bir işlemin çatallanması üzerine sayaç değeri 1 artırılır, işlemin sonlandırılması üzerine değer 1 azaltılır. Değerin her değişmesinde önceden tanımlı bir limit değeri ile karşılaştırılır, limite ulaşılması halinde sistem izleme modülüne alarm gönderilebilir (Ezzati-Jivan ve Dagenais, 2012). Limit değeri, bir uzman tarafından veya otomatik bir öğrenme tekniği ile belirlenebilir.

4. Tartışma ve Sonuç

İnternet kullanımının yaygınlaştığı, bilişim teknolojilerine erişimin kolaylaştığı günümüzde akıllı nesnelerin kullanımındaki artış, saldırganlar için daha fazla potansiyel erişim noktası ortaya çıkarmış ve siber güvenlik konusu daha önemli hale gelmiştir. Çok çeşitli siber saldırı yöntemleri bulunmakta, her geçen gün sayıları ve verdikleri zararların boyutları artmaktadır. Gittikçe daha karmaşık ve sık hale gelen bu saldırılar, sadece normal hizmetleri aksatmakla kalmayıp bilgi teknolojileri varlıklarına ve altyapısına önemli zararlar vermektedir. Özellikle kritik altyapıların hedef alınması ile halkın büyük çoğunluğunu etkileyecek şekilde ciddi zararlara yol açabilmektedir.

Değişen telekomünikasyon sistemi ile bilgi ve iletişim alt yapılarını, özellikle veri tabanlarının yer aldığı sunucuları hedef alan geniş kitlesel saldırılar, şimdi olduğu gibi gelecekte de ülkelerin büyük sorunu olmaya devam edecektir. Dolaylı yoldan bireylerin can güvenliğini tehdit eder seviyeye ulaşacak siber saldırıların oluşumu ve engellenmesi hususunda birçok yöntem bulunmaktadır.

Geleneksel siber güvenlik sağlayıcıları, genellikle saldırılar ağı/sistemi ihlal ettikten sonra tespit etme, engelleme ve zararı hafifletme imkanı tanır. Saldırıları engelleme ve aynı zamanda saldırılardan kaçınma için saldırı tespit sistemleri ile birlikte saldırı önleme sistemleri tercih edilmelidir. Böylece hizmet akışı kesintiye uğramadan çoğu saldırı önlenebilir.

Güvenlik duvarı yapılandırmasında, gönderim sıklığı ve paket boyutuna göre paket filtrelemesi yapılabilir. Ayrıca güvenlik duvarı yapılandırmalarında saldırı önleme sistemi ile zararlı olabilecek paketlerin tespiti yapılabilir ve bu paketler ve paketlerin geldiği adresler engellenebilir. Uygulama katmanına yönelik hizmet aksatma saldırılarının önlenmesinde, DoS koruma ve web uygulama güvenlik duvarı cihazları kullanılabilir. DoS saldırılarını önlemeye ve etkilerini azaltmaya karşı çeşitli stratejiler önerilmesine rağmen DoS saldırıları büyük bir tehdit olmaya devam etmektedir.

Siber saldırganların hedefi, bilgisayar sistemleri ve alt yapılar gibi görünse de temel hedefleri aslında kullanıcılardır. Çünkü sistemler için gerekli donanım ve korumanın farkında olan saldırganlar, zincirin en zayıf halkası olan kullanıcıları hedef alarak sisteme daha rahat erişim imkânı elde edebilmektedir. Bu yüzden siber saldırılar, siber tehdit ve siber terör konularında kullanıcıların bilgilendirilmesi ve farkındalıklarının oluşturulması son derece önemlidir.

Kaynakça

1. Alieyan, K., Kadhum, M. M., Anbar, M., Rehman, S. U., Alajmi, N. K. A. (2016). An overview of DDoS attacks based on DNS. 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 276-280. https://doi.org/10.1109/ICTC.2016.7763485
2. Atasever, S., Özçelik, İ., Sağıroğlu, Ş. (2019). Siber Terör ve DDoS. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23 (1), 238-244. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.507948
3. Çelikbilek, İ. (2016). TCP SYN seli saldırısının etkilerini azaltmak için yeni SYN çerezleri gerçeklemesi. İstanbul Şehir Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
4. Ezzati-Jivan, N. ve Dagenais, M. R. (2012). A stateful approach to generate synthetic events from kernel traces. Advances in Software Engineering, 2012, 140368 (1-12).
5. Gupta, N., Jain, A., Saini, P., Gupta, V. (2016). DDoS attack algorithm using ICMP flood. 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, IEEE, 4082-4084.
6. Harris, B. ve Hunt, R. (1999). TCP/IP security threats and attack methods. Computer Communications, 22 (10), 885-897. https://doi.org/10.1016/S0140-3664(99)00064-X
7. Harshita, H. (2017). Detection and Prevention of ICMP Flood DDOS Attack. International Journal of New Technology and Research, 3(3), 63-69.
8. Horawalavithana, S., Bhattacharjee, A., Liu, R., Choudhury, N., Hall, L. O., Iamnitchi, A. (2019). Mentions of Security Vulnerabilities on Reddit, Twitter and GitHub. WI '19: IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence, (s. 200-207). Thessaloniki, Greece. https://doi.org/10.1145/3350546.3352519
9. Imperva. (2022). Fork bomb attack (Rabbit virus), https://www.imperva.com/learn/ddos/fork-bomb/, Erişim Tarihi: 08/12/2022
10. Kendir, F. (2022). DNS Güvenlik Açıkları ve DNS Saldırı Türleri. https://gelecegiyazanlar.turkcell.com.tr/blog/dns-guvenlik-aciklari-ve-dns-saldiri-turleri Erişim Tarihi: 07.12.2022
11. Mansfield-Devine, S. (2016). DDoS Goes Mainstream: How Headline-Grabbing Attacks Could Make This Threat an Organisation's Biggest Nightmare. Network Security, 11, 7-13. https://doi.org/10.1016/S1353-4858(16)30104-0

12. Şamlıoğlu, H. (2021). DDOS Saldırıları ve Türleri. Privia Cyber Security Consulting, 1-26. https://www.priviasecurity.com/wp-content/uploads/2021/06/Hizmet-Reddi-DDOS-saldirilari.pdf
13. Yeniman Yıldırım, E., Adalı, E. (2017), The Threats and Risks in Personal Data Security, 2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), IEEE Xplore, 5-8 Oct., Antalya, Turkey, 610-615. https://doi.org/10.1109/UBMK.2017.8093478
14. Yihunie, F., Abdelfattah, E., Odeh, A. (2018). Analysis of ping of death DoS and DDoS attacks. 2018 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), 1-4. https://doi.org/10.1109/LISAT.2018.8378010

EKTRÜZYON İLE ÜRETİLEN DOLGU TAKVİYELİ TERMOPLASTİKLERİN ERİYİK AKIŞ İNDEKSLERİ VE YOĞUNLUK DEĞİŞİMLERİ

Doç. Dr. Yılmaz KISMET[1]
Pamuk AYİKURT[2]

[1]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,
Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye
Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları ABD,
Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye
ORCİD: 0000-0003-3145-6214

[2]Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları ABD,
Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye
ORCİD: 0000-0003-0408-6203

1. GİRİŞ

Polimerlerin önemli bir grubunu oluşturan termoplastikler tekrar kullanıma uygun malzemeler oldukları için günlük yaşantımızda birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Özellikle kolay bulunabilir olmaları ve maliyetlerinin düşük olması termoplastikleri cazip hale getirmektedir. Genellikle saf halde kullanımlarının yerine dolgu takviyeli olarak kullanılarak farklı kompozitler geliştirilmektedir.

Termoplastik kompozitlede farklı türden birçok organik ve inorganik dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Organik olarak lignin, proteinler, yapay lifler ve selülozik birçok madde kullanılırken, inorganik olarak talk, kaolen, bakır, baryum karbonat, magnezyum oksit, silika çinko, çelik, cam lifleri vb. kullanılmaktadır. Bu dolgu maddeleri ile termoplastik malzemenin daha fazla üstün özellik kazanması amaçlanmaktadır. Ayrıca geri dönüşüm termoplastiklerinde de kalsiyum karbonat ve türevleri sıklıkla tercih edilmektedir. Bu dolgu maddeleri termoplastiklere genellikle parçacık şeklinde ilave edilmekte ve karışımlarında ekstrüzyon makinası kullanılarak termoplastik matris ile dolgu maddelerinin homojen yapı oluşturması sağlanmaktadır. Hem ekstrüzyon ile karışımda hem de enjeksiyon ile parça üretiminde karışımı sağlanan malzemelerin akışkanlıkları son derece önemli olup parça kalitesini direk etkilemektedir.

Özellikle inorganik dolgular başta olmak üzere parçacık dolgu takviyeli termoplastiklerde akışkanlıklar olumsuz etkilenmektedir. Termoplastiklerden özellikle mekanik ve termal açıdan daha üstün malzemeler geliştirmek için çok yaygın bir kullanıma sahip olan elyaflar da termoplastiklerin akışkanlıklarını olumsuz etkilemektedir. Elyaf olarak cam elyaf, karbon elyaf en çok tercih edilen elyaf çeşitleri olup bunların dışında aramid ve bazalt elyaflar da termoplastiklerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli termoplastiklerin lif oranının artışına bağlı olarak çekme dayanımlarının arttığı kopma uzaması değerlerinin ise azalarak malzemenin daha rijit bir yapıya büründüğü tespit edilmiştir. Benzer şekilde farklı elyaf uzunluklarına sahip cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli termoplastik kompozitlerin farklı mekanik ve yüksek hızlı darbe tepkileri incelenmiş ve mekanik testlerde yüksek performans iyileşmesi tespit edilirken darbe testleri ile de daha yüksek enerji soğurma kapasitesi elde edilmiştir.

Hidrokarbon gazlarının ya da polimer yapıdaki organik liflerin sıcaklık ve yüksek basınç uygulanarak ayrıştırılması ile üretilen karbon elyafların içerisinde minimum %92 karbon bulunmaktadır. Metal elyaflara göre hafif olmaları termoplastiklerde kullanılmalarında önemli etken olmakla beraber sahip oldukları ağırlıklarına oranla mukavemet ve elastikiyet modülleri çok yüksektir. Yüksek mekanik özelliklere sahip olmaları ve hafif olmaları nedeniyle ileri

polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanılan yüksek performans elyaf malzemesidir. Karbon elyaflar takviyeli kompozitler uzay-havacılıktan savunma sanayine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Termoplastik polimerlerde karbon elyaflar toz halde de kullanılabilmektedir. Fakat termoplastik ile karbon elyaf tozunun karıştırılması akışkanlığı olumsuz etkilemekte ve hatta belirli bir oranın üzerinde karbon elyaf tozu takviye edilen termoplastiklerde hiç akış gerçekleşmediği görülmektedir.

Bu çalışmada karbon elyaf tozu takviyeli termoplastiklerin ekstrüzyonda homojen karışımlarına nadir toprak elementi esaslı geliştirilen bağlayıcı elemanın etkisi incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Kullanılan Malzemeler

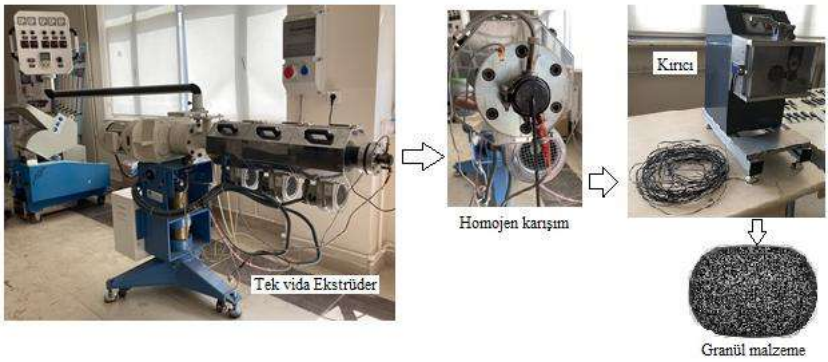
Deneylerde matris malzemesi olarak PETKİM firmasına ait termoplastikler kullanılmıştır. Bu termoplastikler; polipropilen EH-102, alçak yoğunluklu polietilen olarak I-22 19T ve yüksek yoğunluklu polietilen I668 numaralı ürünler kullanılmıştır. Kullanılan karbon elyaf tozları ise 100 ila 400 mikrondan boyutlarında karbon fiberlerin toz formda üretilmiş halleri olup %95 karbon içerikli ve yoğunluğu ortalama olarak 1,78 ila 1,87 g/cm^3 arasında değişmektedir. Nadir toprak elementi olarak ise %90 ve üzeri saflıkta lantan oksit ve seryum oksit kullanılmıştır. Termoplastikleşme için kullanılan AYPE'nin çözülmesinde ise sentetik tiner kullanılmıştır.

2.2 Dolgu Maddesinin Elde Edilmesi

Ekstrüzyon makinasında termoplastikler ile karıştırılacak olan dolgu maddesi için öncelikle bir manyetik karıştırıcıda sentetik tiner içerisinde alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) çözeltisi hazırlandı. Bir başka manyetik karıştırıcıda ise nadir toprak elementi olarak kullanılan lantan oksit saf su içerisinde çözüldü ve karbon elyaf tozu bu çözeltiye takviye edildi. Karbon elyaf tozuna lantan tamamen emdirilene kadar karıştırıldı ve sıcaklık arttırılarak ortamdaki suyun buharlaşması sağlandı. Her iki manyetik karıştırıcıda hazırlanan bu çözeltiler birbirleri ile karıştırıldı. Bu karışım 24 ila 48 saat arasında soğumaya bırakıldı ve daha sonra kırılarak granül hale getirildi. Şayet elde edilen granüllerde nem mevcut ise nem alma fırınlarında 35 ºC'de bekletilerek tamamen kurutulmalıdır. Lantan oksit emdirilerek hazırlanan bu dolgu maddesi benzer şekilde lantan yerine seryum oksit kullanılarak da hazırlanmıştır. Dolayısıyla hem lantan hem de seryum oksit esaslı iki farklı dolgu maddesi kullanılacaktır.

2.3 Ekstrüzyonda Homojen Karışım

Elde edilen dolgu maddeleri ile termoplastiklerin homojen karışımları Şekil 1'de görünen "BES35 LDPVC" model tek vida ekstrüder kullanılarak gerçekleştirildi. Silindirik kesite sahip olan ekstrüzyon kalıbından akan malzeme soğutularak yine Şekil 1'de görünen kırıcıdan geçirilerek granül hale getirildi.



Şekil 1: Tek vida ekstrüder ve ganül eldesi.

Dolgu maddesinin termoplastikler içerisinde ki ağırlıkça oranı %10, %20, %30, %40 ve %50 olacak şekilde toplamda her bir karışım oranı için 500'er g malzeme Tablo 1'de belirtilen sıcaklık ve devirde homojen hale getirildi.

Tablo 1: Ekstrüzyon makinasında çalışma sıcaklıkları

Materials	1.bölge (ºC)	2.bölge (ºC)	3.bölge (ºC)	Kalıp (ºC)	Vida devri (rpm)
AYPE+Dolgu Maddesi	150-130	155-130	155-130	150-130	5-15
YYPE+Dolgu Maddesi	160-130	165-130	165-130	160-130	5-15
PP+Dolgu Maddesi	180-140	185-145	185-145	180-140	5-15

Tablo 1'de termoplastik malzemeler ile dolgu maddesi karışımlarının ekstrüzyon makinasında çalışma sıcaklıkları verilmiş olup hem lantan hem de seryum içerikli olarak kullanılan her iki dolgu maddesi içinde aynı sıcaklık ve vida devir değerleri geçerlidir. Termoplastik içerisinde ağırlıkça artan dolgu miktarı ile karışımın akışkanlığı arttığı için ekstrüzyonda çalışma sıcaklıkları azalmıştır. Örnek olarak AYPE+%10 dolgu içeren karışımların ekstrüyon sıcaklıkları 150 ila 155 ºC iken bu değerler %50 dolgu içeren AYPE karışımlarında bütün bölgeler için 130 ºC'ye düşmüştür. Bu durumda karışım oluşturmada önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır.

2.4 Eriyik Akış Analizi

Bu analiz yönteminde Şekil 2'de görünen "JPT EQUIPMANT" marka "XRL-400A" model (MFI) eriyik akış cihazı kullanılarak termoplastik ve dolgu maddesinden oluşan karışımların kütlesel ve hacimsel akışkanlık değerleri ile yoğunlukları tespit edilmiştir.

Şekil 2: (MFI) Eriyik Akış İndeks Cihazı

Bu işlem için ortalama 8 ila 10 gram arasında malzemeler tartılarak hazırlandı. Öncelikle saf termoplastiklerin akışkanlıkları incelendi ve daha sonra dolgu takviye edilerek ekstrüzyonda üretilmiş karışımların akışkanlıkları analiz edildi. DIN ISO 1133 standartlarına göre gerçekleştirilen deneylerde polietilen matrisli karışımlar için cihaz sıcaklığı 190 ºC ve uygulama ağırlığı 2,16 kg ve polipropilen matrisli karışımlar için ise cihaz sıcaklığı 230 ºC ve 2,16 kg ağırlık tatbik edilmiştir.

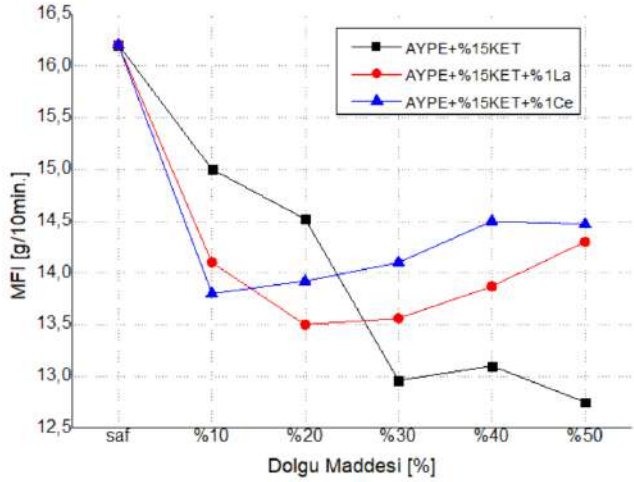
Analizi yapılacak olan malzemeler Şekil 2'de görünen cihazın besleme ağızından cihaza dökülmekte ve daha sonra cihazın ısıtma haznesi içerisinde uygun sıcaklıkta yaklaşık 5 ila 10 dakika bekletildikten sonra bir piston vasıtası ile ağırlık uygulanmaktadır. Öncelikle ön yükleme olarak 0,326 kg tatbik edilmekte ve daha sonra ana yükleme yapılarak toplamda 2,16 kg ağırlık uygulanmaktadır. Sıcaklığın etkisi ile eriyik hale gelen malzeme uygulanan ağırlık etkisi ile cihazın alt kısmında bulunan memeden akmaya zorlanmaktadır. Ölçüm aralığına gelindiğinde cihazın meme kısmında bulunan bir makas ile buradan akan malzeme belirli zaman aralığında kesilmektedir. Kesme süresi olarak nitelendirilen süre bu deneylerde 20 saniye olarak belirlenmiş ve ölçüm aralığında memeden akan malzeme her 20 saniyede bir kesilmiştir. Kesilen bu

parçaların ağırlıkları hassas terazi kullanılarak ölçülmekte ve ortalama ağırlık bulunduktan sonra bu ağırlık değeri cihazın dijital ekranında uygun bölüme girilerek malzemenin kütlesel ve hacimsel akışkanlık değerleri ile yoğunluk değişimleri tespit edilmektedir. Her bir malzeme için bu deney aynı şekilde gerçekleştirilmiş ve elde edilen değişimler grafikler ile gösterilmiştir.

Oluşturulan karışımların yoğunluklarındaki değişimler MFI cihazı dışında RADWAG marka AS220.R2 model yoğunluk ölçme kiti kullanılarak da tespit edildi. MFI cihazından çıkan parçaların ölçme kitinde öncelikle boş bir beher içerisinde normal ortamda ki ağırlıkları ölçüldü. Daha sonra 0,789 g/cm^3 yoğunluğa sahip etanol içeren bir beherin olduğu kabın içerisine aynı parçalar konularak ağırlıkları ölçüldü ve gerçekleşen değişime bağlı olarak cihaz parçalara ait yoğunluk değerini verdi.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda grafikler ile açıklanmıştır.

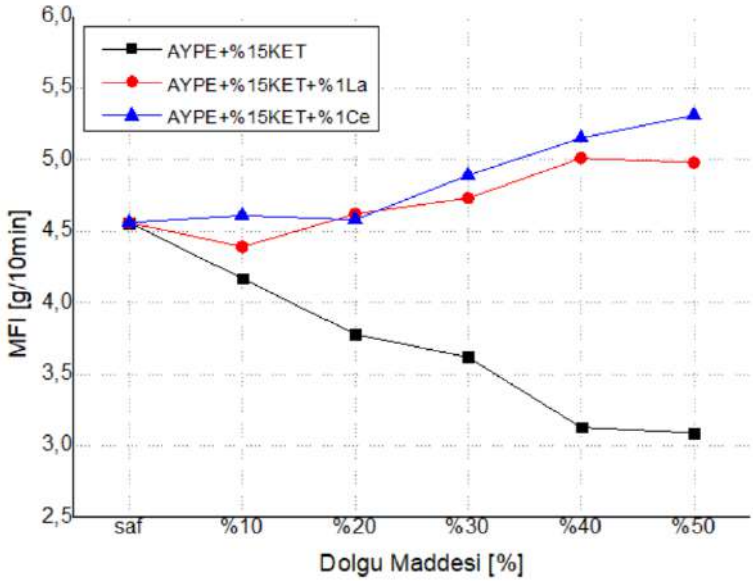


Şekil 3: Dolgu maddesinin çeşidi ve miktarına bağlı olarak AYPE'nin kütlesel akışkanlığındaki değişim.

Şekil 3'de alçak yoğunluklu polietilen içerisinde ki dolgu miktarı ve çeşidine bağlı olarak ekstrüzyon da elde edilen karışımlara ait kütlesel akışkanlık değişimleri görülmektedir. Saf polietilenin akışkanlığı 16,2 g/10.dak. iken bu değer polietilen ile farklı dolgu maddelerinin ekstrüzyonda homojen hale getirilmeleri neticesinde elde edilen karışımlarda azalmıştır. Özellikle dolgu maddesi olarak AYPE ve KET karışımlarının kullanılması ile artan dolgu miktarına bağlı olarak sürekli bir azalma meydana gelmiş ve akışkanlık 12,75 g/10dak. değerine kadar gerilemiştir. Lantan ve seryum takviyeli dolgu

maddelerinde ise bu azalma özellikle %20 dolgu içeren karışımlarda radikal bir şekilde gerçekleştikten sonra artma eğilimi göstermiştir. Ağırlıkça %50 oranında seryum esaslı dolgu maddesi içeren karışımlarda 14,47 g/10dak. olarak ölçülen akışkanlık değeri, ağırlıkça %50 lantan içeren numunelerde 14,3 g/10dak. olarak belirlenmiştir.

Ekstrüzyonda üretilen bu kompoztilerin yoğunluklarında önemli değişimler tespit edilmemiş olup hem MFI cihazının hem de yoğunluk ölçüme kitinin verdiği sonuçlar yakın çıkmıştır. Saf AYPE'nin yoğunluğu 0,862 g/cm^3 değerinden başlayarak artan dolgu miktarına bağlı olarak miktar azalmış olup ağırlıkça %50 dolgu içeren kompozitlerde 0,75 ila 0,78 g/cm^3 olarak ölçülmüştür.

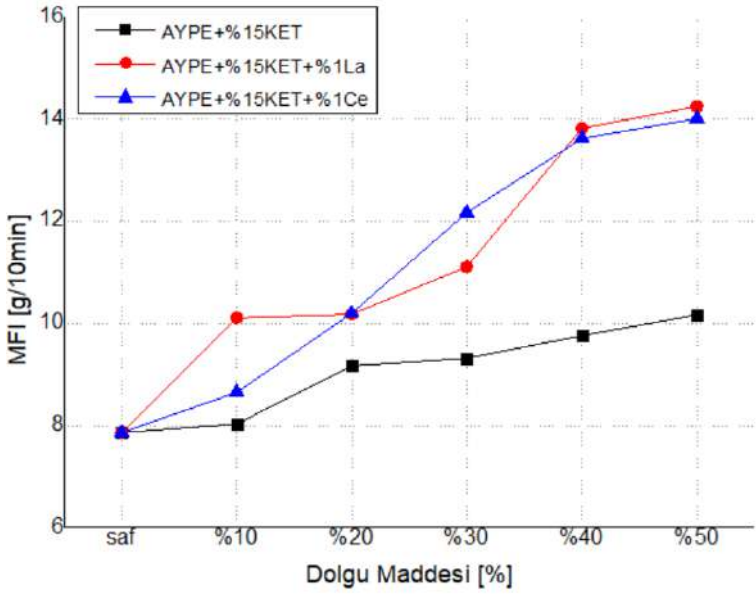


Şekil 5: Dolgu maddesinin çeşidi ve miktarına bağlı olarak YYPE'nin kütlesel akışkanlığındaki değişim.

Şekil 5'de matris malzemesi YYPE olan ekstrüzyondan elde edilen homojen karışımlara ait eriyik akış indeks sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda özellikle AYPE ve KET tozu içeren karışımların akışkanlıklarında önemli ölçüde azalma olduğu görülmektedir. Saf AYPE'nin ağırlığı 4,56 g/10dak. iken bu değer %50 AYPE+KET içeren karışımlarda 3,09 g/10dak. olarak ölçülmüştür. Bu azalmanın aksine lantan ve seryum esaslı dolgu maddesi içeren karışımların akışkanlıklarında artış meydana gelmiştir. Ağırlıkça %50 lantan içeren karışımların akışkanlığı 4,98 g/10dak. bu değer ağırlıkça %50 seryum içeren karışımlarda 5,31 g/10dak. olarak belirlenmiştir.

YYPE ve dolgu maddeleri ile elde edilen kompozitlerin yoğunluk değişimleri ise hem MFI hem de yoğunluk ölçme kiti ile gerçekleştirilmiştir. Artan dolgu

miktarına bağlı olarak YYPE matrisli kompozitlerin yoğunluklarının azaldığı tespit edilmiştir. Saf YYPE'nin yoğunluğu 0,891 g/cm^3 iken bu değer ağırlıkça %50 dolgu içeren numunelerde 0,781 ila 0,834 g/cm^3 arasında değişmektedir.



Şekil 6: Dolgu maddesinin çeşidi ve miktarına bağlı olarak PP'nin kütlesel akışkanlığındaki değişim.

Kullanılan dolgu maddelerinin çeşidine ve karışım içerisindeki ağırlıkça oranlarına bağlı olarak polipropilenin (PP) kütlesel akışkanlığında ki değişim Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafiğe göre her üç dolgu maddesi de polipropilen matrisli karışımların akışkanlığını olumlu yönde etkilemiştir. Ekstrüzyonda homojen olarak karışımları sağlanan kompozitlerin içersinde artan dolgu miktarı ile viskozite azalarak kütlesek akışkanlık artmıştır. Bu artış özellikle lantan ve seryum içerikli karışımlarda çok daha belirgin olarak kendisini göstermiştir. Saf PP'nin kütlesek akışkanlığı 7,86 g/10dak. iken bu değer ağırlıkça %50 lantan ve %50 seryum içeren kompozitlerde sırasıyla 14,25 g/10dak. ve 14,01 g/10dak. olarak ölçülmüştür. Böylelikle saf PP'nin akışkanlığında yaklaşık olarak %75 kadar bir artış olduğu tespit edilmiştir. Nadir toprak elementi içermeyen dolgu maddesi ile de akışkanlığın yaklaşık olarak %30 iyileştiği görülmüştür.

Akış analizi dışında yoğunluk ölçümü sonuçlarına bakıldığında PP'nin yoğunluğunun polietilende olduğu gibi artan dolgu miktarı ile azaldığı belirlenmiştir. Saf PP'nin yoğunluğu 0,863 g/cm^3 iken ağırlıkça %50 dolgu içeren kompozitlerin yoğunlukları 0,759 ila 8,102 g/cm^3 olarak ölçülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ekstrüzyonda homojen hale getirilerek hazırlanan termoplastik esaslı kompozitlerin akışkanlıkları ve yoğunluklarında ki değişimler incelendi. Yapılan analizler neticesinde lantan ve seryum esaslı dolgu maddeleri ile takviye edilen YYPE ve PP nin akışkanlıklarının arttığı ve özellikle PP'nin akışkanlığının önemli ölçüde iyileştiği belirlenmiştir. Bunun en önemli nedeni olarak kullanılan dolgu maddelerinin AYPE içermesi ve aynı zamanda lantan ile seryumun karbon elyaf tozunu ile olan olumlu etkileşimidir denilebilir. Saf AYPE'nin akışkanlığı diğer termoplastiklere göre daha iyi olduğu için artan dolgu miktarına bağlı olarak AYPE esaslı kompozitlerin akışkanlıkları bir miktar azalmıştır.

Elde edilen kompozitlerin yoğunluk değişimlerine bakıldığında ise artan dolgu miktarı ile yoğunluklarda azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu azalmanın en önemli nedeni kullanılan dolgu maddelerinde yer alan AYPE'dir. AYPE'nin yoğunluğu düşük olduğu için oluşturulan kompozit içerisinde dolgu maddesi miktarının artışına bağlı olarak karışımların yoğunlukları da azalmıştır.

SİMGELER VE KISALTMALAR

MFI=Eriyik akış indeksi
AYPE=Alçak yoğunluklu poletilen
YYPE=Yüksek yoğunluklu polietilen
PP=Polipropilen
La=Lantan
Ce=Seryum
KET=Karbon elyaf tozu
NTE=Nadir toprak elementleri
DM=Dolgu maddesi
rpm=Vida devri
mm=Milimetre
cm^3=Santimetre küp

Teşekkürler

Bu çalışma, "Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri" tarafından desteklenen "YLMUB021-06" numaralı proje kapsamında desteklenmiş olup desteklerinden "Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri" MUNİBAP'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

A. Ravve, (2012), Principles of Polymer Chemistry, third ed., Springer, New York, p. 17.

I. Novak, A. Popelka, (2016), z. Spitalsky, et al., "Polyolefin in Packaging and Food Industry", Polyolefin Compounds and Materials, Fundammentals and Indistrial Applications, Springer International Publishing, Switzerland.

1. Uğraşkan, V., Yoruç, A., (2017), Yeşil Polimerler ve Uygulamaları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 318, 337.
2. İlhan, R., Feyzullahoğlu (2019), E., Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaflar Ve Dolgu Maddeleri, El-Cezerî Fen Ve Mühendislik Dergisi, 355, 381.
3. Singh Y, Singh J, Sharma S, Lam DT, Nguyen DN. (2020), Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports-good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties. J Mater Res Technol 9:15593–15603.
4. Guerreiro SD, João IM, (2012), Real LP Evaluation of the influence of testing parameters on the melt flow index of thermoplastics. Polym Test 31:1026–1030.
5. LAFLEUR, Pierre G.; VERGNES, (2014), Bruno (ed.). *Polymer extrusion*. John Wiley & Sons.
6. Wilczyński, K., Nastaj, A., Lewandowski, A., Wilczyński, K. J., & Buziak, K. (2019), Fundamentals of global modeling for polymer extrusion. *Polymers*, *11*(12), 2106.
7. Yılmaz, O. (2007), *Polimer malzemelerin ekstrüzyonunun deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
8. Çetin, M. (2022), *Granül termoplastik malzemelerin ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat şartlarının incelenmesi ve optimizasyonu* (Master's thesis, Eskişehir Teknik Üniversitesi).
9. Hüner, Ü. (2014), *Çeşitli elyaflarla takviye edilmiş termoplastik kompozitlerin levha ekstrüzyonunun ve özelliklerinin incelenmesi* (Master's thesis, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
10. Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T., & Yu, J. (2015), Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber–matrix interphase. *Composites Part B: Engineering*, *69*, 335-341.
11. Karakuş, K., Güleç, T., Kaymakcı, A., Aksu, T., Kırıt, A., Özder, M. E., & Mengeloğlu, F. (2010), Ekstrüzyon Yöntemi Đle Farklı Dolgu Maddeleri

Kullanılarak Üretilen Polimer Kompozitlerin Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Ulusal Polimer Bilim ve Teknolojisi Kongresi ve Sergisi*, *75*.

12. Sezer, H. K., Oğulcan, E. R. E. N., Börklü, H. R., & Özdemir, V. (2019), Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *34*(2), 663-674.
13. TAŞDEMİR, Ş. G. M. (2020), Poliakrilonitril ve karbon elyaf takviyeli geri dönüşümlü polipropilen polimer kompozitlerinin fiziksel özelliklerinin incelenmesi.
14. Baştürkcü, E., Şavran, C., Timur , S., Yüce, E. (2021), Birincil Ve İkincil Mineral Kaynaklarından Nadir Toprak Elementlerinin Fiziksel Ve Fizikokimyasal Yöntemlerle Üretim Proseslerinin İncelenmesi, Araştırma Makalesi, 7(2):276-287.
15. Baştürkcü, E., Şavran, C., Timur , S., Yüce, E. (2021), Birincil Ve İkincil Mineral Kaynaklarından Nadir Toprak Elementlerinin Fiziksel Ve Fizikokimyasal Yöntemlerle Üretim Proseslerinin İncelenmesi, Araştırma Makalesi, 7(2):276-287.
16. Erdem, A., Babuççuoğlu, Y., Güneş, H., Obuz, H. E., Özdemir, E., Çiğdem, K. A. R. A., ... & Akçay, H. (2021), Nadir Toprak Minerallerinin Fiziksel Ayrılması ve Flotasyonu: Derleme. International Journal of Pure and Applied Sciences, 7(2), 321-345.
17. CELEP, O., YAZICI, E. Y., & DEVECİ, H. (2021), Nadir toprak elementlerinin birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(1), 264-280.

RÜZGÂR HIZI POTANSİYEL HESABINDA KULLANILAN DAĞILIM YÖNTEMLERİ

Doç. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ[1]
Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR[2]

[1]Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi
Elektrik - Elektronik Mühendisliği
0000-0002-8394-5362

[2]Akdeniz Üniversitesi,Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
0000-0003-2788-2659

1. GİRİŞ

Enerji, insanlığın ayakta kalması ve gelişimin sürekliliği için vazgeçilmez bir unsurdur (Kerem, 2022). Son yıllarda ortaya çıkan enerji krizi dünya çapında bir sorun haline gelmiştir (Shi vd., 2021). Teknolojideki hızlı ilerleme, sanayideki gelişme ve nüfus artışı ile birlikte ülkelerin enerji talebi her geçen gün artış göstermektedir (Demir Yetiş vd., 2019). Enerji talebini karşılamak için geçmişte yoğun bir şekilde kullanılan fosil yakıtlar atmosfere küresel ısınmadan birinci derecede sorumlu olarak gösterilen sera gazı salınımı yapmakta, iklim değişikliklerine neden olmakta ve ekolojik dengeyi bozmaktadır (Alashan, 2020, Shi vd., 2021). Son yıllara kadar ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıt kaynaklarının rezervleri sınırlıdır ve tükenmektedir. Giderek kirlenen dünyamızın enerji ihtiyacını karşılamak için son yıllarda yoğun olarak tükenmez ve çok az kirliliğe neden olan yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında elektrik enerjisi üretimi için tercih edilen en önemli kaynaklardan birisi de çevre dostu rüzgâr enerjisidir (Görgülü, 2019). Rüzgâr; güneş ışınlarının yeryüzünü farklı olarak ısıtması ve yeryüzünden güneş ışınlarının farklı derecelerde yansıması sonucu oluşan hava sıcaklıklarının artması veya azalması ile dolayısıyla da hava basıncında azalış veya artış sonucu hava kütlelerinde oluşan yatay hava hareketidir. Küresel ısınma nedeniyle ortaya çıkan iklim değişikliği hava sıcaklıklarında ve dolayısıyla da rüzgâr oluşumunda artma veya azalma meydana getirmektedir (Alashan, 2020). Rüzgar enerjisi ekonomik büyümede önemli rol oynamaktadır ve birçok ülke enerji durumunda iyileşme sağlamak ve ekolojik çevreyi korumak için rüzgar enerjisine ağırlık vermektedir (Liu vd., 2019; Kandpal & Dhingra, 2021).

Rüzgâr enerjisinin özelliklerinin ve potansiyelinin değerlendirilmesi, rüzgâr enerjisinin enerjiye etkili bir şekilde dönüştürülmesindeki ilk basamaktır. Rüzgâr enerjisi kaynak değerlendirmesi, rüzgâr çiftliği projelerinin yapılabilirliğinin önemli bir parçasıdır. Değerlendirmenin makul olup olmadığı, enerji üretim maliyetini ve ekonomik faydaları doğrudan etkiler (Mauritzen, 2020). Rüzgârın kontrol edilemiyor olması, sürekli olmaması ve hızının değişken olması gibi nedenlerden dolayı santral yatırımlarının yapılabilirliğinin bazı yöntemler ile araştırılması gerekmektedir (Doğanşahin vd., 2019). Belirli bir konumdaki rüzgâr hızı dağılımı, o konumdaki mevcut rüzgâr enerjisini belirler. Bu nedenle, rüzgâr enerjisi çıktı tahminindeki belirsizliği azaltmak için rüzgâr hızının dağılım özelliklerinin doğru bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir (Çelik, 2003). Rüzgâr hızı dağılımını belirlemek için kullanılan iki yöntem vardır: 1) zaman serisi yöntemi (Katikas vd., 2021) ve 2) istatistiksel analiz yöntemi (Elie Bertrand vd., 2020, Shi vd., 2021). Orijinal rüzgâr hızı verilerine dayanan zaman serisi yöntemiyle elde edilen sonuçlar daha doğru olabilir. Ancak, çok miktarda veri

içeren sistemlerde zaman serisi yöntemi daha karmaşıktır. Uzun vadeli rüzgâr hızı verileri eksik olduğunda, geçmiş rüzgâr hızı verilerinin davranışını, özelliklerini açıklamak ve rüzgâr enerjisini tahmin etmek için istatistiksel analiz yöntemlerini kullanmak daha uygun olur. İstatistiksel analizde etkili ve açık olan rüzgâr hızı dağılımını karakterize etmek için sınırlı sayıda parametre kullanılmaktadır. Geçmiş rüzgâr hızı verileri için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonunu belirlemek çok önemlidir (Alavi vd., 2016, Shi vd., 2021). Rüzgâr hızı modellemesinde kullanılan çeşitli olasılık yoğunluk fonksiyonları vardır.

2. RÜZGÂR HIZI DAĞILIM MODELLERİ

Rüzgârın kinetik enerjisi rüzgâr türbinleri tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür. İstatistiksel özelliklere sahip olan rüzgâr hızı pozitif olarak çarpık bir dağılım sunar. Bununla birlikte rüzgâr çiftliklerinin çıkış gücünün önemli ölçüde dalgalanmasına neden olan rüzgâr enerjisinin rastgeleliği, değişkenliği ve aralıklı olması gibi özellikleri vardır. Rüzgâr çiftliği analizi, planlaması, tasarımı, inşaatı ve işletiminde yaygın olarak kullanılan çeşitli olasılık dağılım modelleri bulunmaktadır (Shi vd., 2021).

Teorik rüzgâr gücü (Usta & Mert Kantar, 2016);

$$P_f = \frac{1}{2}\rho A \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \qquad (1)$$

formülü ile hesaplanır. Burada v rüzgâr hızı, ρ hava yoğunluğu, A türbin süpürme alanı, $f(v)$ ise rüzgâr hızının olasılık yoğunluk fonksiyonudur (Usta & Mert Kantar, 2016). Gözlenen rüzgâr hızı frekansından elde edilen rüzgâr gücü;

$$P_{REF} = \frac{1}{2}\rho A \sum_{i=1}^{n} \frac{v_i^3}{n} \qquad (2)$$

formülü ile bulunur. P_{REF} referans rüzgâr gücü olarak ifade edilmektedir (Usta & Mert Kantar, 2016). Rüzgâr gücü hata kriteri, referans rüzgâr gücü ile teorik rüzgâr gücü arasındaki yüzde hatasıdır (Shi vd., 2021):

$$\varphi = \left| \frac{P_{REF} - P_D}{P_{REF}} \right| \cdot \%100 \qquad (3)$$

Rüzgâr gücünün tahmini esas olarak $f(v)$'ye bağlıdır. Bu nedenle, uygun bir olasılık yoğunluk fonksiyonu seçilmesi daha doğru enerji potansiyeli sonuçları sağlayabilir ve hata kriterini azaltabilir (Shi vd., 2021).

2.1. Weibull Dağılımı

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin hesabı için en sık kullanılan dağılımdır (Wadi vd., 2023). 1930'lu yıllarda İsveçli fizikçi Waloddi Weibull tarafından bulunmuştur (Bulut & Açıkkalp, 2013). İki parametreli Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Usta & Mert Kantar, 2016):

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right) \quad (4)$$

Burada; v rüzgâr hızı (m/s), c ölçek parametresi, k ise şekil parametresidir. Şekil parametresi; ekvator yakınlarında 1 civarında iken, ılıman enlemlerde 2 civarı, sürekli rüzgâr bölgeleri için 3 civarındadır (Usta & Mert Kantar, 2016). Özellikle ılıman iklim bölgelerinde önemli avantajları vardır (Harris & Cook, 2014). İki parametreli Weibull dağılımının basit bir forma, yüksek esnekliğe ve verimli hesaplama parametrelerine sahip olması en yaygın dağılım modeli olmasının sebeplerindendir. Bununla birlikte, doğadaki tüm rüzgâr rejimleri Weibull dağılımı kullanılarak modellenemeyebilir (Akgül vd., 2016). İki parametreli Weibull dağılımı gerçek rüzgâr olasılığını belirleyemez, o nedenle geçersiz rüzgâr hızı verilerinin çıkarılması gerekir, bu da mevcut rüzgâr rejimlerini karakterize etmeyi olanaksız kılar (Shi vd., 2021). Rüzgâr enerjisi değerlendirmesi için iki parametreli Weibull dağılımına alternatif olarak üç parametreli bir Weibull dağılımı önerilebilir (Montoya vd., 2019):

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v-\mu}{c}\right)^{k-1} exp\left(-\left(\frac{v-\mu}{c}\right)^{k}\right) \quad (5)$$

Burada μ, minimum rüzgâr hızını temsil eden konum parametresidir. Üç parametreli Weibull dağılımı geçersiz rüzgâr hızı olasılığını tahmin edebilir ve düşük rüzgâr hızlarına daha fazla ağırlık verebilir. İki parametreli Weibull dağılımının doğruluğunun, yalnızca geçersiz rüzgâr hızı önemsiz olduğunda daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Wais, 2017). Aksi takdirde, üç parametreli Weibull dağılımının göreli hatası küçüktür. Ayrıca, üç parametreli Weibull dağılımı, iki parametreli Weibull dağılımı ile karşılaştırıldığında yüksek rüzgâr hızlarında aynı yüksek değeri elde edememektedir.

2.2. Rayleigh Dağılımı

İki parametreli Weibull dağılımında şekil parametresi 2 alındığında Rayleigh dağılımı elde edilir (Usta & Mert Kantar, 2016):

$$f(v) = \frac{2v}{c^2} exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^{2}\right) \quad (6)$$

Rayleigh dağılımı, rüzgâr hızını modellemek ve rüzgâr türbinlerinin standart performansını değerlendirmek için kullanılır (Shi vd., 2021). Weibull dağılımı ile karşılaştırıldığında, Rayleigh dağılımı sadece bir parametre içerdiğinden, kullanımı daha kolaydır. Sadece ortalama rüzgâr hızının bilinmesi ile dağılımın kolayca belirlenebilmesi en büyük avantajıdır (Usta & Mert Kantar, 2016). Bununla birlikte, Rayleigh dağılımı, uzun dönemli ortalama rüzgâr vektörünün sıfır olduğu varsayımını temel almaktadır. Alize rüzgârı gibi denizde egemen rüzgâr vektörü, sıfırdan önemli ölçüde saparak Rayleigh dağılımının bu rüzgâra uygulanabilirliğini göreceli olarak sınırlandırır (Shi vd., 2021).

2.3. Ekstrem Değer Dağılımı

Aşırı rüzgâr hızlarının Weibull dağılımındaki parametre değerleri üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Rüzgâr hızı eşiği aştığı zaman Weibull modeli artık uygulanamaz. Alternatif olarak ekstrem değer dağılımları kullanılabilir. Rüzgâr hızı modellemesinde kullanılan ekstrem değer dağılımları Gumbel dağılımı, ters Weibull dağılımı, genelleştirilmiş ekstrem değer dağılımı ve Frechet dağılımıdır (Shi vd., 2021, Altın Yavuz vd., 2018). Gumbel dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Shi vd., 2021):

$$f(v) = \frac{1}{c} exp\left[-\frac{v-\mu}{c} - exp\left(\frac{v-\mu}{c}\right)\right] \quad (7)$$

Ters Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Shi vd., 2021):

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{c}{v}\right)^{k+1} exp\left[-\left(\frac{c}{v}\right)^{k}\right] \quad (8)$$

Genelleştirilmiş ekstrem değer dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Shi vd., 2021):

$$f(v) = \frac{1}{c}\left[1 - \frac{k}{c}(v-\mu)\right]^{\frac{1}{k}-1} - exp\left\{-\left[1 - \frac{k}{c}(v-\mu)\right]^{\frac{1}{k}}\right\} \quad (9)$$

Frechet dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Altın Yavuz vd., 2018):

$$f(v) = \frac{k}{v}\left(\frac{c}{v}\right)^{k} exp\left[-\left(\frac{c}{v}\right)^{k}\right] \quad (10)$$

ile ifade edilir. Bu eşitliklerde, c; ölçek parametresi, k; şekil parametresi ve μ konum parametresidir.

Ekstrem değer dağılımı aşırı rüzgâr hızlarının meydana gelme olasılığı tahmin edilirken daha doğru sonuçlar verir. Ekstrem değer dağılımı eşik rüzgâr hızının altında modellemek için uygun değildir. Bununla birlikte, eşik rüzgâr hızının

tahmin sonuçları oldukça farklıdır, bu nedenle ekstrem değer dağılımının uygulanabilir aralığı belirsizdir ve bu da en uygun ekstrem değer dağılımı tipini belirlemeyi zorlaştırmaktadır (Shi vd., 2021).

2.4. Gama Dağılımı

Rüzgâr hızı dağılım modellemesinde yaygın olarak kullanılan dağılımlardan biri de Gama dağılımıdır (Usta & Mert Kantar, 2016). İki parametreli Gama dağılımı Pearson Tip III dağılımı olarak adlandırılır (Shi vd., 2021). Gama dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Usta & Mert Kantar, 2016):

$$f(v) = v^{k-1} \frac{exp\left(-\frac{v}{c}\right)}{c^k \Gamma(k)} \tag{11}$$

Burada; c ölçek parametresi, k şekil parametresi ve Γ ise Gama fonksiyonudur. İki parametreli Gama dağılımının bir genelleştirilmesi olarak ortaya çıkan dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (Usta & Mert Kantar, 2016):

$$f(v) = \frac{p}{c^k} v^{k-1} \frac{exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^p\right)}{\Gamma(\frac{k}{p})} \tag{12}$$

Burada k ve p parametreleri genelleştirilmiş gama dağılımının şekil parametreleri ve c ise ölçek parametresidir. Genelleştirilmiş Gama dağılımı, modelin esnekliğini önemli ölçüde arttıran bir şekil parametresi ekler (Shi vd., 2021). k=p olduğunda genelleştirilmiş Gama dağılımı Weibull dağılımına dönüşürken, p=1 durumunda Gama dağılımı olmaktadır (Usta & Mert Kantar, 2016). Yapılan bir çalışmada genelleştirilmiş özellikle yüksek rüzgâr hızları için Gama dağılımının uydurma etkisinin Weibull dağılımına göre daha iyi olduğu ileri sürülmüştür (Shi vd., 2021).

2.5. Lognormal Dağılımı

c ölçek parametresi, k şekil parametresi olmak üzere normal dağılıma dayalı olarak türetilmiş lognormal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(v) = \frac{1}{vk\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{ln\left(\frac{v}{c}\right)^2}{2k^2}\right) \tag{13}$$

ile ifade edilir (Usta & Mert Kantar, 2016).

2.6. Nakagami Dağılımı

Nakagami Dağılımına sahip rassal değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(v) = \frac{2k^k}{\Gamma(k)c^k} v^{2k-1} exp\left(-\frac{kv^2}{c}\right) \quad (14)$$

Burada c ölçek parametresi, k şekil parametresidir. Rüzgâr alanında ilk kez yapılan uygulamasında Nakagami dağılımının Genelleştirilmiş Gama dağılımı ile birlikte rüzgâr verisini modellemede çalışmada kullanılan diğer dağılımlara göre daha başarılı olduğu ifade edilmiştir (Usta & Mert Kantar, 2016).

2.7. Çok Parametreli Dağılımlar

Üçten fazla parametre içeren çeşitli dağılım modelleri, daha yüksek uydurma doğruluğu elde etmek için önerilmiştir (Shi vd., 2021). Burr dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(v) = \frac{pk\left(\frac{v-\mu}{c}\right)^{pk-1}}{c\left[1+\left(\frac{v-\mu}{c}\right)^h\right]^{k+1}} \quad (15)$$

Johnson SB dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(v) = \frac{ck}{\sqrt{2\pi}(v-\mu)(\mu+c-v)} exp\left(-\frac{p+kln\left(\frac{v-\mu}{\mu+c-v}\right)^2}{2}\right) \quad (16)$$

Kappa dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(v) = \frac{1}{c}\left[1-\frac{k(v-\mu)}{c}\right]^{\frac{1}{k-1}} [F(v)]^{1-p} \quad (17)$$

Burada k ve p parametreleri şekil parametreleri, c ölçek parametresi ve μ konum parametresidir. Kappa dağılımında geçen $F(v)$ ifadesi Kappa dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonudur (Shi vd., 2021).

Çok parametreli olasılık dağılımları daha fazla parametre içerdiğinden dolayı, daha esnek, daha uyarlanabilir ve daha yüksek uydurma doğruluğuna sahiptir. Bu nedenle rüzgâr enerjisi tahmin hatası daha azalır. Bununla birlikte, iki veya üç parametreli dağılım modelleriyle karşılaştırıldığında, karmaşıklığı daha fazladır. Bu nedenle, çok parametreli dağılım modelleri tahmin doğruluğunu önemli

ölçüde iyileştirmedikçe bu tür modellere öncelik verilmesi önerilmez (Shi vd., 2021).

2.8. Karma Dağılımlar

Yukarıda bahsedilen dağılımların tümü tek rüzgâr hızı dağılımlarıdır. Tek dağılımlar iki veya çok modlu karakteristiklere sahip rüzgâr hızı dağılımını tanımlayamaz. Bu nedenle yapılan çalışmalarda karmaşık rüzgâr rejimlerindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için karma dağılımlar kullanılmıştır. Karma dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonu (Shi vd., 2021):

$$f(x) = \sum_{i=1}^{a} \omega_i f_i(x) \qquad (18)$$

Burada a karışım sayısı, ω_i her bir tek dağılım modelinin ağırlığı ve $f_i(x)$ farklı tek dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Genelde; özel rüzgâr rejimleri için karma dağılımların uydurma etkisi, tek dağılımlardan daha iyidir. Bununla birlikte, karma dağılımı oluşturmak için hangi dağılım veya dağılımların kullanılacağını belirlemek gibi zorlukları vardır (Shi vd., 2021).

3. Sonuçlar

Literatürdeki çalışmalarda rüzgâr hızı dağılımının modellenmesi için çeşitli olasılık dağılım modelleri önermiştir. Farklı bölgelerde farklı modellerin uygulanabilirliği farklı farklıdır. Bir model tüm bölgedeki rüzgâr verileri için aynı derecede verimli olmayabilir. Belirli bir alan için dağılım modeli seçilirken tüm potansiyel rüzgâr hızı dağılım modelleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca belirli bir saha için rüzgâr hızı dağılımının aylar, mevsimler ve yıllara göre farklı olabileceği de gözden kaçırılmamalıdır.

KAYNAKLAR

1. Akgül, F. G., Şenoğlu, B., & Arslan, T. (2016). An alternative distribution to Weibull for modeling the wind speed data: Inverse Weibull distribution. Energy Conversion and Management, 114, 234 – 240. Doi:10.1016/j.enconman.2016.02.026.
2. Alashan S. (2020). Bingöl ili rüzgâr potansiyeli ve iklim değişikliğinin etkisi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(1), 1 – 12. Doi:10.21324/dacd.569072.
3. Alavi, O., Mohammadi, K. & Mostafaeipour, A. (2016). Evaluating the suitability of wind speed probability distribution models: A case of study of east and southeast parts of Iran. Energy Conversion and Management, 119, 101 – 108. Doi:10.1016/j.enconman.2016.04.039.
4. Altın Yavuz, A., Gündoğan Aşık, E., Bulut, Y. M. (2018). Frechet dağılımının şekil parametresinin tahmini için alternatif tahmin yöntemi. İstatistikçiler Dergisi: İstatistik & Aktüerya, 11(2), 109-120.
5. Bulut, Y. & Açıkkalp E. (2013). Rüzgâr enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında parametre tahmin yöntemlerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 1(2), 49 – 54.
6. Çelik, A. N. (2003). Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91(5), 693 – 707. Doi:10.1016/s0167-6105(02)00471-3.
7. Demir Yetiş, A., Gazigil, L., Yetiş, R., & Çelikezen, B. (2019). Hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli: Bitlis örneği. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 7(1), 74 – 78. Doi:10.21541/apjes.405308.
8. Doğanşahin, K., Uslu, A. F. & Kekezoğlu, B. (2019). İki bileşenli Weibull dağılımı ile rüzgâr hızı olasılık dağılımlarının modellenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 15, 315 – 326. Doi: 10.31590/ejosat.505723.
9. Elie Bertrand, K. S., Abraham, K. & Lucien, M. A. (2020). Sustainable energy through wind speed and power density analysis in Ambam, south region of Cameroon. Frontiers in Energy Research, 8, 176. Doi:10.3389/fenrg.2020.00176.
10. Görgülü, S. (2019). Atatürk havalimanı verileri kullanılarak Rayleigh dağılım yöntemiyle İstanbul'un rüzgâr karakteristiğinin tahmini. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 103 – 108. Doi:10.31590/ejosat.604739.

11. Harris, R. I., & Cook, N. J. (2014). The parent wind speed distribution: Why Weibull?. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 131, 72 – 87. Doi:10.1016/j.jweia.2014.05.005.
12. Kandpal, D. & Dhingra, T. (2021). Migrating to reverse auction mechanisms in wind energy sector: Status and challenges. Energy Policy, 156, 112352. Doi:10.1016/j.enpol.2021.112352.
13. Katikas, L., Dimitriadis, P., Koutsoyiannis, D., Kontos, T. & Kyriakidis, P. (2021). A stochastic simulation scheme for the long-term persistence, heavy-tailed and double periodic behavior of observational and reanalysis wind time-series. Applied Energy, 295, 116873. Doi:10.1016/j.apenergy.2021.116873.
14. Kerem A. (2022). Assessing the electricity energy efficiency of university campus exterior lighting system and proposing energy-saving strategies for carbon emission reduction. Microsystem Technologies, 28, 2623 – 2640. Doi:10.1007/s00542-022-05268-x.
15. Liu, G., Zhou, J., Jia, B., He, F., Yang, Y. & Sun, N. (2019). Advance short-term wind energy quality assessment based on instantaneous standard deviation and variogram of Wind Speed by a Hybrid Method. Applied Energy, 238, 643 – 667. Doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.105.
16. Mauritzen, J. (2020). Will the locals benefit? The effect of wind power investments on rural wages. Energy Policy, 142, 111489. Doi:10.1016/j.enpol.2020.111489.
17. Montoya, J. A., Díaz-Francés, E., & P, G. F. (2019). Estimation of the reliability parameter for three-parameter Weibull models. Applied Mathematical Modelling, 67, 621 – 633. Doi:10.1016/j.apm.2018.11.043.
18. Shi, H., Dong, Z., Xiao, N. & Huang, Q. (2021). Wind speed distributions used in wind energy assessment: A review. Frontiers in Energy Research, 9, 769920. Doi:10.3389/fenrg.2021.769920.
19. Usta, İ. & Mert Kantar, Y. (2016). Farklı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanarak rüzgâr gücü potansiyelinin tahmini. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 18, 362 – 380. Doi:10.21205/deufmd.2016185407.
20. Wadi, M., Elmasry, W., Tamyiğit, F.A. (2023). Rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirirken önemli hususlar. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, (38)2, 947 – 962. Doi:10.17341/gazimmfd.1066351.
21. Wais, P. (2017). Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis. Renewable Energy, 103, 15 – 29. Doi:10.1016/j.renene.2016.10.041.

ÜRETKEN TASARIM (GENERATIVE DESIGN) YÖNTEMİ

Süleyman KILIÇ

Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü
e-mail: suleymankilic@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1681-9403

Giriş

Küresel ısınmadan dolayı sıcaklıkların artması, buzul erimeleri, ortalama deniz seviyesinin yükselmesi, mevsimlerin değişmesi gibi problemlerle karşılaşılmaktadır. Isınmanın büyük bir bölümü de, havadaki sera gazı dağılımındaki artıştan kaynaklandığı bilinmektedir [1]. Dünyada ülkeler/birlikler sera gazı emisyon miktarların azaltılması üzerine yeni kurallar getirmektedir. Avrupa Birliği Kyoto Protokolü, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi gibi sözleşmelerle üyeler sera gazı salınımlarını düşüreceklerini taahhüt etmektedirler. 2022 yılında AB parlamentosu, 2035 yılından itibaren benzin ve dizel kullanan araç satışını yasaklama kararı almıştır [2].

Bu kararların alınması, elektrikli araçlara yönelmeyi hızlandırmıştır. Fosil yakıtlarla çalışan arabalarda olduğu gibi elektrikli araçlarda da hafiflik sayesinde daha uzun menziller söz konusu olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde hafifletme üzerine çalışmalar artmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde hafifletme işlemlerinde topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım gibi yeni yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır.

Üretken tasarım yöntemi son yıllarda geliştirilmiş bir yöntemdir. Yeni parça tasarımında kullanılacağı gibi eski parçaların tasarım güncellemesi içinde kullanılabilmektedir. Ağırlık azaltımı, emniyet katsayısı artırımı, tasarım yeniden boyutlandırılması, birden fazla parçadan oluşan tasarımların tek parça haline getirilmesi vb. konularında oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Elinizde hiç parça tasarımı olmadan, sınır ve yük koşullarını belirttikten sonra onlarca farklı tasarım örneği otomatik olarak sunulmaktadır. Üretken tasarımın, topoloji optimizasyonundan en büyük avantajlarından birisi de budur. Ayrıca, üretim yönteminin seçimi kullanıcıya bırakılmıştır. İster döküm ister talaşlı imalat isterse eklemeli imalat olsun veya hibrit üretim yöntemi seçilerek farklı tasarım fikirleri oluşturulabilmektedir.

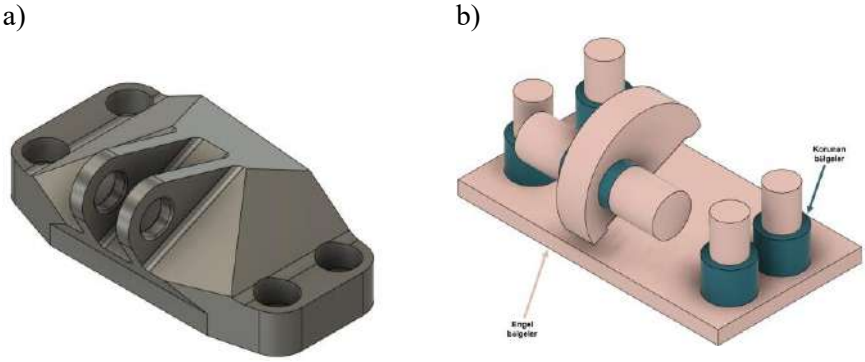
Bu çalışma kapsamında, 2013 yılında General Electric (GE) firması tarafından yapılmış olan bir topoloji optimizasyonu yarışması parçası üzerinden üretken tasarım adımları incelenecektir. Tasarım örneği Autodesk Fusion 360 programının örnek havuzunda GE Bracket ismiyle yer almaktadır (Şekil 1). Konu hakkında uygulama yapmak isteyen araştırmacı ve öğrenciler için de farklı parça örnekleri bulunmaktadır.

Şekil 1. Üretken tasarım örnek parça havuzu

Üretken Tasarım Yöntemi

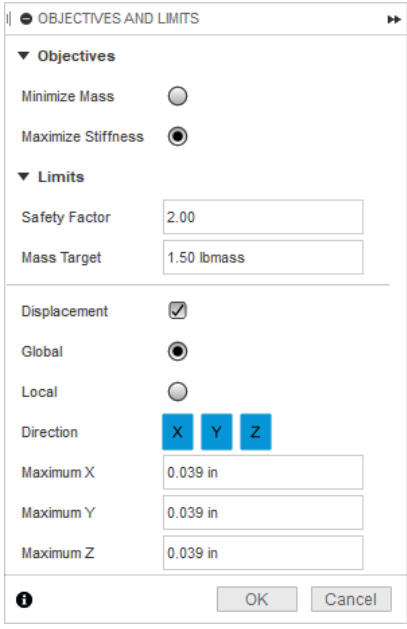
Şekil 2a.'da orijinal parça tasarımı verilmiştir. Üretken tasarım yöntemi, iki farklı yolla yeni tasarımlar oluşturmanıza olanak sağlamaktadır. Birinci yöntemde Şekil 2a.'da verilen orijinal parça tasarımında korunan ve engel bölgeleri tanımlayarak üretken tasarıma devam edilmesidir. İkinci yöntemde ise Şekil 2b.'de gösterildiği gibi orijinal parça tasarımını kullanmadan sadece korunan ve engel bölgeleri tanımlayarak üretken tasarıma devam edilmesidir.

Üretken tasarımda dikkat edilmesi gereken en önemli konuların başında korunan bölgeler ve engel bölgeleri gelmektedir (Şekil 2b). Engel bölgeler; programın seçilen bölgelerde herhangi bir tasarım yapmaması istenilen bölgelerdir. Korunan bölgeler ise parçanın herhangi bir cıvata bağlantı noktası, şaft bölgesi gibi yük ve sınır koşullarının oluşturulduğu bölgelerdir.



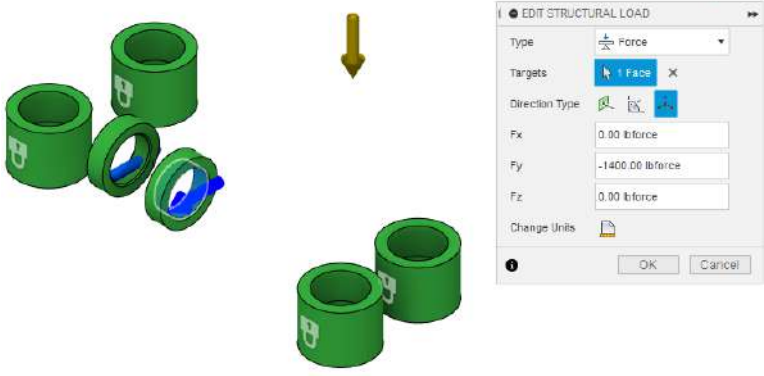
Şekil 2. Orijinal tasarım ve üretken tasarımda önemli bölgeler

Korunan ve engel bölgelerin belirlenmesinden sonra topoloji optimizasyonunda olduğu gibi bu işlemde de ilk olarak hedefler belirlenmektedir. Hedeflerin belirlenmesinde kütle hafifletme, rijitliği artırma, güvenlik katsayısı sınırı belirleme, yer değiştirme miktarını sınırlama gibi işlemler yapılabilmektedir (Şekil 3).



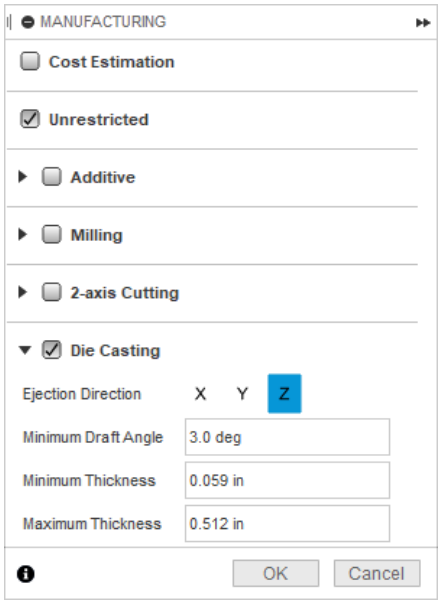
Şekil 3. Hedeflerin ve sınırların belirlenmesi

Daha sonra parça için yük ve sınır koşulları oluşturulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yarışma koşullarında belirtilen yükler ve sınırlamalar uygulanmıştır. Şekil 4.'te mavi ok ile gösterilen bir yük uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 4. Yüklerden bir tanesinin uygulanması

İncelenen çalışmada, sadece katmanlı imalat yöntemi ile üretileceği seçilmiştir. Bu program sadece katmanlı imalat değil diğer üretim yöntemleri içinde tasarım önerilerinde bulunmaktadır (Şekil 5). Şekilde görüldüğü gibi sadece istenilen yöntem seçildiği gibi hibrit olarak da seçim yapılabilmektedir. Hem katmanlı imalat hem de talaşlı imalat yöntemi seçilerek de tasarım öngörüleri oluşturulabilmektedir. Sadece döküm veya talaşlı imalat yöntemi de seçilerek tasarım öngörüleri alınabilmektedir.



Şekil 5. Üretim yönteminin seçilmesi

Malzeme olarak program kütüphanesinde bulunan malzemeler kullanılabildiği gibi yeni malzemelerin eklenmesine izin verilmektedir. Çalışmada AISI 446, 440C, AISI 1045 çelikleri ve titanyum 6Al-4V seçilmiştir.

Uygulama Sonuçları

Program bulut tabanlı bir yapıya sahiptir. Çevrimdışı modunda iken tasarımlar yapılabilmekte, analizler için çevrimiçi moda ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarım için düşük özellikli bir bilgisayar ile çevrimdışı modda rahatlıkla çizim yapılabilmektedir. Analiz için ise çevrimiçi modda bulut sisteminde çözüm sağlanmaktadır. Bulut sisteminde çözümün gerçekleşmesi gerçekten yararlı bir özelliktir. Normalde bu şekilde analizleri ve tasarım önerileri yapabilmek için üst düzey bilgisayarlara sahip olunması gereklidir.

Analiz sonucunda, sistem tarafından yapılmış tasarımlar, kullanıcıya sunulmaktadır (Şekil 6). İstenilen kütle, hacim, gerilme, yer değiştirme, güvenlik katsayısı gibi parametrelere göre önerilen tasarımları tekrar eleme imkânı sunulması da ayrıca önemli bir özelliktir.

Şunu tekrar hatırlatmak isterim ki, burada herhangi bir ön tasarımımız olmadan bu tasarımlar kullanıcıya önerilmektedir.

Şekil 6. Analiz sonucunda önerilen tasarım örnekleri

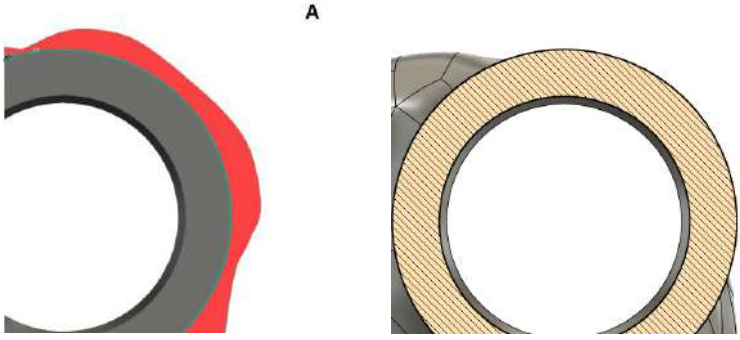
Araştırma örneğinde verilen 2 güvenlik katsayısında 0,68 Kg-0,82 Kg kütle hedefleri (0,039 in yer değiştirme sınırı) ve kütleyi en az yap hedefleri araştırılmıştır. Bu hedeflere en uygun tasarım önerisi 9 numaralı öneridir.

Şekil 7. İstenilen 3 şartı da sağlayan 9 numaralı tasarım önerisi

Şekil 8.'de AISI 1045 çeliğinden elde edilen tasarım fikrinin yeterli görünüşü gösterilmiştir. Parçanın ağırlığı 0,96 Kg gelmektedir. Topoloji optimizasyonunda olduğu gibi buradaki önerilen parçalarda nihai parça olmayıp üzerinde

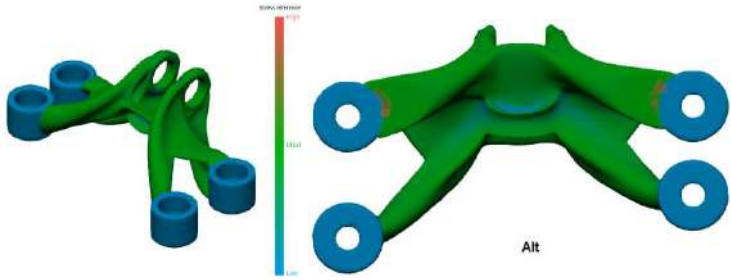
değişiklikler yapılması gereken parçalardır. Örneğin Şekil 9.'da A kesitinde verilen dairesel bölgedeki kırmızı bölgeler istenilmeyen oluşumlardır. Bu kısımdan tasarım kısmında bunların ortadan kaldırılması gerekmektedir. Program bu işlemi de son derece kolay bir şekilde yapmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Şekil 8. Örnek olarak seçilen parçanın yeterli görünüşü



Şekil 9. İstenilmeyen oluşumlar ve düzeltilmiş tasarım

Parçada oluşan gerilme dağılımı Şekil 10.'da verilmiştir. Oluşan en yüksek gerilme yaklaşık olarak 637 MPa'dır. Grafik üzerinde kırmızı ile en yüksek gerilme bölgeleri gösterilmiştir. Emniyet katsayısı 2, maksimum yer değiştirme ise 0,4 mm'dir.



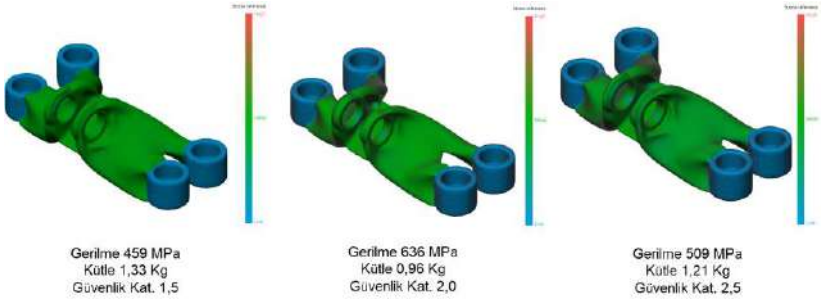
Şekil 10. Parçada meydana gelen gerilme dağılımı ve gerilmelerin en yüksek olduğu bölgeler

Farklı Güvenlik Katsayısı Uygulaması

Sadece katmanlı imalat üretim yöntemi seçilerek farklı güvenlik katsayısındaki tasarımlar incelenmiştir. Kütle hafifletmesine ilave olarak güvenlik katsayısı limit sınırı olarak 1.5-2.0-2.5 değerleri seçilmiştir. İnceleme sonucunda 1, 3 ve 7 numaralı tasarım fikirleri önerilmektedir.

Şekil 11. Farklı güvelik katsayıları için kütle hafifletme işlemi

Güvenlik katsayısının 1,5 olması durumunda önerilen parçanın ağırlığı 1,33 Kg, parçada oluşan maksimum gerilme değeri ise 459 MPa olarak elde edilmiştir. Güvenlik katsayısının 2,0 olması durumunda önerilen parçanın ağırlığı 0,96 Kg, parçada oluşan maksimum gerilme değeri ise 636 MPa olarak elde edilmiştir. Güvenlik katsayısının 2,5 olması durumunda önerilen parçanın ağırlığı 1,21 Kg, parçada oluşan maksimum gerilme değeri ise 509 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 12).



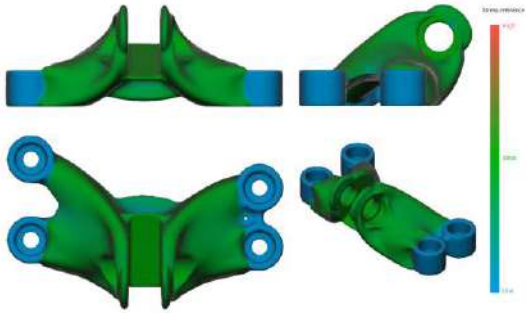
Şekil 12. Farklı güvenlik katsayılarında gerilme ve kütle değişimleri

Farklı Üretim Yöntemleri Uygulaması

2,5 güvenlik katsayı limiti ile kütle hafifletme işleminde üretim yöntemi olarak ise 5 eksenli talaşlı imalat ve döküm yöntemi incelenmiştir. İşlem sonucundaki tasarım öngörüsü Şekil 13.'de verilmiştir. Malzeme olarak ise herhangi bir sınırlama uygulanmamıştır.

Şekil 13. 5 eksenli talaşlı imalat ve döküm yöntemi ile tasarım öngörüleri

Malzeme olarak Ti-6Al-4V malzemesi kullanıldığında 0,96 Kg ağırlığa sahip olduğu ve oluşan en yüksek gerilme değeri ise yaklaşık 353 MPa olduğu görülmüştür. AISI 446 çeliğinde; 1,75 Kg ağırlığa ve yaklaşık 352 MPa gerilme seviyesi oluştuğu görülmüştür. AISI 1045 çeliğinde; 1,17 Kg ağırlık ve yaklaşık 509 MPa gerilme oluşmuştur. 440C paslanmaz çeliğinde; 2,27 Kg ağırlığa ve yaklaşık 275 MPa değerinde gerilme oluşmuştur.



Şekil 14. Ti-6Al-4V malzemesinde oluşan gerilme seviyeleri

Sonuçlar

Üretken tasarım yöntemi son yıllarda geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem temelinde topoloji optimizasyonu yöntemi bulunmaktadır. Özellikle katmanlı imalat yöntemi için oldukça etkili tasarım öngörüleri yapmaktadır. Döküm ve talaşlı imalat bölümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, GE firmasının yapmış olduğu ödüllü bir topoloji optimizasyonu yarışmasının parçası üretken tasarım açısından incelenmiştir. Üretken tasarımın en güzel yönü elinizde herhangi bir parça tasarımı olmadan, yük ve sınır koşullarını belirterek programın size yüzlerce tasarım sunmasıdır. Ayrıca sunmuş olduğu tasarımları gerilme, yer değiştirme, ağırlık, üretim maliyetleri gibi faktörlere göre de sıralamaktadır.

Aynı zamanda mevcut parçalarında hafifletilmesi, güvenlik katsayısının artırılması, yer değiştirme miktarının küçültülmesi, malzeme değişikliği gibi işlemler içinde rahatlıkla kullanılabilen bir yöntemdir.

Kaynaklar

1. A., A. Ç., 202, *Sera gazı emisyonlarının azaltımı* https://www.eea.europa.eu/tr/themes/climate/intro, ['Ziyaret Tarihi:' 26.07.2022].
2. Taşbaşı, D., 2022, *AB Parlamentosu, 2035'ten itibaren gazla çalışan araçların yasaklanmasını onayladı*, https://temizenerji.org/2022/06/10/ab-parlamentosu-2035ten-itibaren-gazla-calisan-araclarin-yasaklanmasini-onayladi/, ['Ziyaret Tarihi:' 26.07.2022].

YENİLİKÇİ TASARIMLAR İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Doç. Dr. Vedat Taşdemir[1]
Doç. Dr. Ömer Seçgin[2]

[1]Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye
vedat.tasdemir@dpu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2375-9525
[2]Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye
omersecgin@subu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-6158-3164

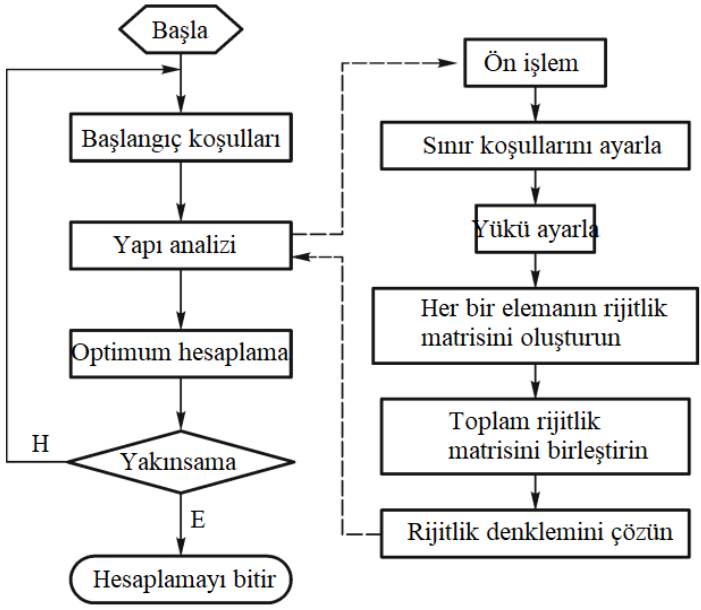
1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte, yüksek performanslı ve hafif ürünlerin tasarım ve üretim süreci büyük önem kazanmıştır (Top, Gökçe, ve Şahin 2019). Özellikle günümüzde artan rekabet koşulları ile birlikte tasarımlar, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) programlarının gelişimi ile çok hızlı değişim göstermiş ve uygulama alanları çok yaygınlaşmıştır. Ancak doğal kaynakların giderek azalması, enerji verimli ürünlerin geliştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu da tasarımcıları ürün tasarımlarında güvenliği elden bırakmadan verimliliği arttırmanın yolları üzerinde çalışmaya sevk etmiştir. Minimum ağırlık ve maksimum dayanım tasarımcıların ve mühendislerin her zaman önceliği olmuştur. Yapısal ağırlığın azaltılması birçok mühendislik uygulamasında önemli faydalar sağlar (Lim, You, ve Dayyani 2020). Tasarım geliştirmenin konsept düzeyinde kullanılan matematiksel yöntemlerinden biri de topoloji optimizasyonudur. Topoloji optimizasyonu, belirtilen yük koşullarını, performansı ve kısıtlamaları karşılayan makul malzeme dağılımı yoluyla optimum yapı konfigürasyonunu elde edebilen gelişmiş bir yapısal tasarım yöntemidir. Topoloji optimizasyonu, geleneksel fikirlerle elde edilmesi zor olan yenilikçi, hafif ve yüksek performanslı konfigürasyonlar oluşturmak için gelişmiş bir yapısal tasarım metodolojisi olarak geliştirilmiştir (Zhu vd. 2021). Amaç, tasarım kuralları içindeki dış kuvvetler, yük koşulları, sınır koşulları, kısıtlamalar ve malzeme özellikleri gibi faktörleri matematiksel olarak modelleyerek ve optimize ederek parça performansını en üst düzeye çıkarmaktır. Başka bir ifade ile mevcut malzeme miktarını modele daha etkin bir şekilde yaymaktır. Üretime hazır modeller oluşturulurken malzeme dağılımının en iyi şekilde sağlanması için optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bir tasarımda optimizasyonunun hedefleri Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Optimizasyonun hedefleri (Kahraman ve Küçük 2020).

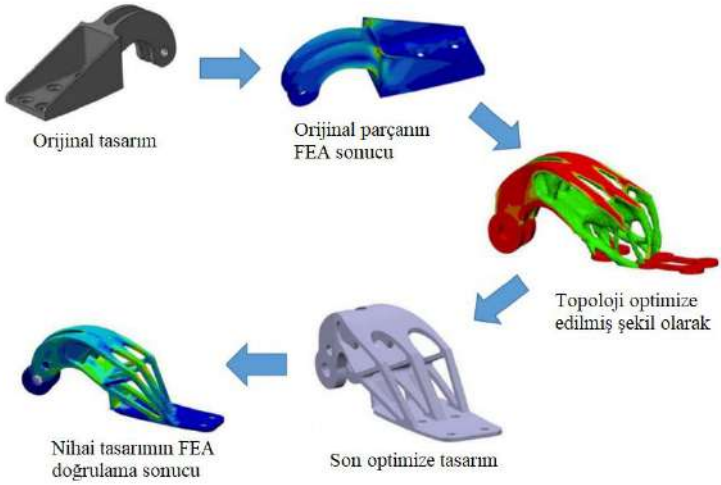
Bir topoloji optimizasyonu için işlem prosedürü Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, çözüm süreci birkaç yineleme adımından oluşmalıdır. Her yineleme adımı, Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) ile bir "Yapı Analizi" ve önerilen yöntemle bir "Optimum Hesaplama" gerektirir. Bunlar arasında

“Optimum Hesaplama” adımı, optimizasyonun etkinliğini ve kalitesini belirleyen en önemli prosedürdür (Liu, Chen, ve Li 2012).



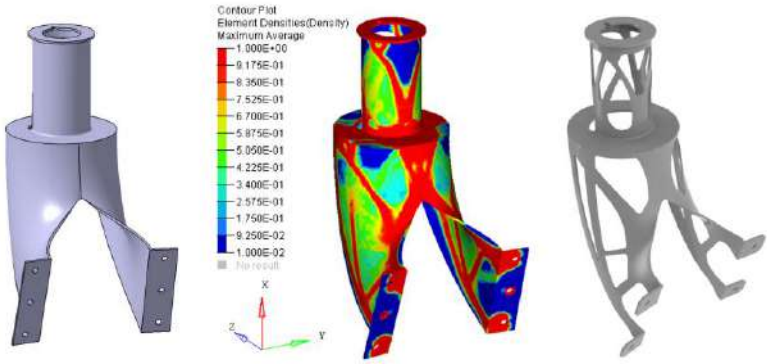
Şekil 2. Topoloji Optimizasyon prosedürü (Liu vd. 2012)

Topoloji optimizasyon tekniklerinin çoğu, Şekil 3'deki topoloji optimizasyon sürecinde gösterildiği gibi, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD), Sonlu Eleman Analizi (FEA) ve farklı üretim teknikleri dikkate alınarak farklı optimizasyon algoritmalarının birlikte kullanımı ile gerçekleştirilir. 3 boyutlu (3B) tasarım işleminden sonra öncelikle tasarımın basit bir ağını oluşturmak için sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanır. Oluşturulan ağ, gerilim dağılımı ve gerinim açısından analiz edilir. Bu, farklı bölümlerin ele aldığı yükleme miktarı hakkında bilgi verir. Ardından tasarım optimize edilerek son şekli verilir. Optimize edilen 3B model yeniden FEA ile analiz edilir. Sonuç tatmin edici ise işlem tamamlanır.



Şekil 3. Topoloji optimizasyonu sürecinde tasarım aşamaları

Topoloji optimizasyonu (TO), günümüzde verimli tasarımlar oluşturmak için kullanılan bilgisayar tabanlı bir tasarım yöntemidir. Havacılık, biyo-kimya, biyo-medikal, tıp ve makine mühendisliği başta olmak üzere birçok mühendislik alanı, klasik tasarımlardan daha iyi performans gösterecek yenilikçi tasarım çözümleri üretmek için bu yöntemi proaktif olarak kullanır. Boyut optimizasyonunun ana prensibi fiziksel ölçülerin optimum hale getirilmesidir. Şekil optimizasyonun da ise tasarım alanının dış çevresi ve/veya iç boşluklar optimize edilir (Göv ve Kütük 2007). Topoloji optimizasyonu, şekil ve boyut optimizasyonundan farklı olarak, tasarımı boyut ve şekil yönünden sınırlamadan yeni topolojiler oluşturan farklı bir yöntem kullanır (Aslan 2019). (Şekil 4) Mekanik tasarım probleminde, bir ürünün boyutunun, şeklinin ve topolojisinin ayrı ayrı veya eş zamanlı olarak optimize edildiği bir yapısal optimizasyon kavramı ortaya çıkmıştır. Bu kavramlar, ürün geliştirme sürecinde optimum boyut, şekil ve malzeme dağılımını bulmak için çok önemlidir.



Şekil 4. Topoloji optimizasyonu kullanılarak optimize edilmiş ürün (Berrocal vd. 2019)

Topoloji optimizasyonu, özellikle tasarım sürecinde birçok avantaj sağlar (Gebisa ve Lemu 2017; Tyflopoulos ve Steinert 2020). Bu avantajlar şöyle sıralanabilir:

- Hafif yapılar oluşturmak
- Üretime hazır tasarım oluşturma
- Pazara çıkış süresinin kısaltılması
- Büyük miktarda malzeme tasarrufu
- Fiziksel testin azaltılması
- Büyük miktarda işlem enerjisinden tasarruf
- Prototip ürün yapımını azaltmak şeklinde sıralanabilir.

2. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri

Topoloji optimizasyonu ortaya çıktığından bugüne çeşitli alt dalları oluşmuştur. En yaygın kullanılan topoloji optimizasyonu yöntemleri şu şekilde gruplandırılabilir:

- Cezalandırmalı katı izotropik malzeme/ (Solid Isotropic Microstructure with Penalization SIMP)
- Seviye kümesi yaklaşımı yöntemi / (Level Set Approach – LSA)
- Evrimsel yapısal optimizasyon yöntemi / (Evolutionary Structural Optimization - ESO) ve (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization - BESO)
- Homojenizasyon yöntemi / (Homogenization method (HM))

Topoloji optimizasyonunun alt dalları şu şekilde açıklanabilir:

2.1 Cezalandırmalı katı izotropik malzeme / (Solid İsotropic Material with Penalization (SIMP))

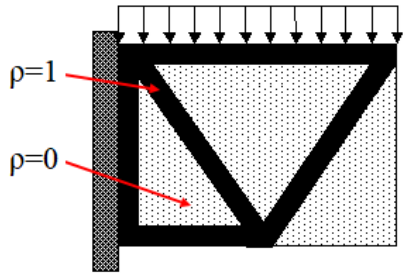
Bu yöntem 1982 yılında Bendsoe ve Kikuchi tarafından ilk kez gündeme getirilmiştir. Daha sonra yapılan akademik çalışmalarla yöntem geliştirilmiştir (Bendsoe ve Kikuchi 1988; Holmberg, Torstenfelt, ve Klarbring 2013; Liu ve Ma 2016). Sonlu elemanlar analizine en uyumlu yöntem olduğu için en popüler topoloji optimizasyon yöntemidir. Birçok tasarım programında (Ansys, Abaqus, SolidWorks vb.) rahatlıkla uygulanabilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde analiz edilen parça için oluşturulan çözüm ağında (mesh), her bir elemana bir yoğunluk değeri ataması yapılır. "0" boş elemanı, "1" ise katı elemanı temsil eder (Yunfei, Ming, ve Yongyao 2016).

Topoloji optimizasyonu aşamasında, matematiksel fonksiyonun hesaplanabilmesi ve analizin çözülebilmesi için yoğunluk değerinin 0'dan farklı olması gerekir. Eleman yoğunluk değeri "ρ" simgesi ile gösterilir. "ρ_{min}" en küçük boş elemanı temsil eder. Bu metodun temel amacı her bir elemanın yoğunluğunu bulmaktır (Yaman 2019). Boş elemana "0" değeri verildiğinde rijitlik matrisini çözmek zorlaşmaktadır. Rijitlik matrisinin formülü Eşitlik 1'de verilmiştir. Malzeme yoğunluğu oluşturulan çözüm ağındaki elemanlar arasında değişiklik gösterir. Bu da elastiklik modülünün değişmesine yol açar. Çözüm ağındaki her bir elemanın elastiklik modülünün Eşitlik 2'de verilen denklemle hesaplanır (Özarpa, Botsalı, ve Kınacı 2021). Bu iki eşitlikten de görüleceği gibi cezalandırma faktörü "p", her bir elemanı boş veya katı olmaya zorlamaktadır.

$$K = \sum_{e=1}^{N} [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (1)$$

$$E = E_0 . \rho^p \quad (2)$$

Sonlu elemanlar analizi esnasında elamanlar "0" ile "1" arasında bir yoğunluk değerlerine sahip olabilmektedir. Cezalandırma faktörü "p" 1'den büyük olarak seçildiğinde, optimizasyon sonrasında modelde yoğunluk değeri sadece "0" ve "1" olan elemanlar bulunur. Daha sonra, yoğunluğu "0" olan elemanlar silinerek topoloji optimizasyonu yapılmış olur. Şekil 5'te, yüklü bir kirişin optimize edilmiş bir malzeme düzeni gösterilmiştir. Yoğunlukları ρ=1 olan katı elemanlar kalırken (siyah), ρ= 0 olan boşluk elemanları (beyaz) çıkarılır.



Şekil 5. Yüklü bir kirişin optimize edilmiş malzeme düzeni (Web_Sitesi)

Literatür incelendiğinde, cezalandırma faktörü "p" için en iyi sonucu "3" değerinin verdiği görülmektedir. Bu metotta daha iyi sonuç alabilmek için eleman boyutu mümkün mertebe küçük olmalıdır. Elemanların en boy oranının da "1,1"'i geçmemesi önerilmektedir (Gebremedhen, Woldemicahel, ve Hashim 2019; Kandemir, Dogan, ve Yaman 2018; Zuo ve Saitou 2017).

2.2 Seviye seti yaklaşımı yöntemi / (Level Set Approach – LSA)

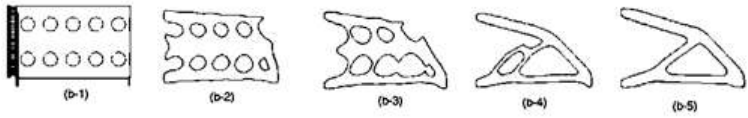
Bu yöntem, sınır bazlı bir optimizasyon metodudur. Osher ve Sethian tarafından geliştirilmiştir (Osher ve Sethian 1988). Bu yöntemde bir sınır, çeşitli parçalara bölünerek birden fazla sınır oluşturulabilir. Ayrıca, birkaç farklı sınır birleştirilerek tek bir sınır oluşturulabilir. Böylece sınır modellerinin optimizasyonu esnasında yapısal topoloji kolayca değiştirilebilir (Sigmund ve Maute 2013). Bu yöntem ile pürüzsüz bir yapısal sınır oluşturulabilir.

Optimum yapısal sınır, $\emptyset$'ye bağlı bir kısmi diferansiyel denklem olarak şöyle ifade edilir (Dai vd. 2013):

$$\frac{\partial \emptyset(x)}{\partial t} = -\nabla \emptyset(x) \frac{dx}{dt} \equiv -\nabla \emptyset(x) \Gamma(x, \emptyset) \qquad (3)$$

Buradaki $\Gamma(x, \emptyset)$, seviye seti yüzeyinin "hız vektörünü" temsil eder.

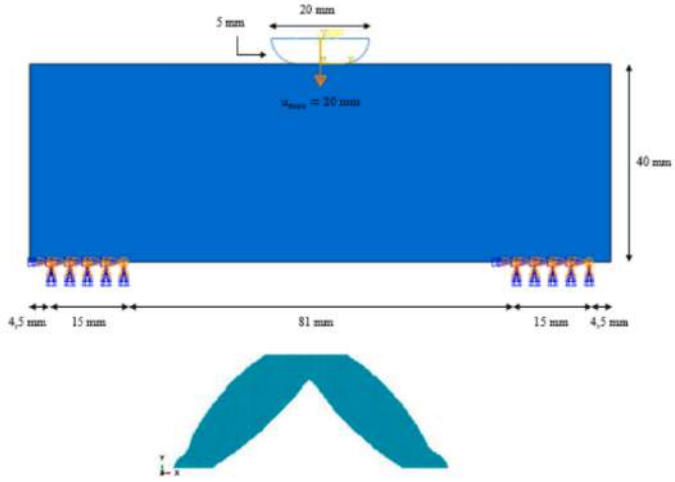
Seviye seti yaklaşımı yönteminin iki ana teorik ve pratik avantajı vardır. Bu yöntemde oluşturulan modeller topolojik olarak esnektir. $\emptyset$ basit bir topolojiye sahip olacak şekilde tanımlanır. Böylece, seviye kümeleri, çeşitli delikler oluşturabilir, bölünebilir veya diğer sınırlarla birleşebilir, yani karmaşık yüzey şekilleri kolayca oluşturulabilir. Modeller çok sayıda serbestlik derecesi içerebilir (Şekil 6).



Şekil 6. Konsol kirişin Seviye seti yaklaşımı yöntemi ile topoloji optimizasyonu (Dai vd. 2013)

2.3 Evrimsel yapısal optimizasyon (Evolutionary Structural Optimization (ESO) ve Bi-directional Evolutionary Structural Optimization - BESO)

Evrimsel yapısal optimizasyon yönteminde tasarım bölgesi "popülasyon" olarak ele alınır. Bu yöntemde minimum ağırlık veya maksimum direngenlik hedeflenerek optimizasyon yapılırken gerekli olmayan elemanlar tasarımdan kaldırılır. En iyi sonuç elde edilinceye kadar bir döngü içerisinde popülasyon geliştirilir. Elemanların gerekli olup olmadığına genellikle Von Mises gerilmeleri değerlendirilerek karar verilir (Şekil 7).



Şekil 7. Evrimsel yapısal optimizasyon yöntemiyle topoloji optimizasyonu (de Andrade ve Magalhães 2022).

2.4 Homojenizasyon yöntemi / (Homogenization method (HM))

Bu yöntemde parça modeli bir tür çelik mikro yapısına benzer şekilde oluşturulur. Bir mikroyapıda sonsuz sayıda küçük boşluklar bulunur. Boşluklar, gözenekler ve katı bölgeler parçanın topolojisini oluşturur. Bu yöntemde mikroyapı şu şekilde gruplandırılır (Göv ve Kütük 2007):

- Malzeme içermeyen yapı (delik büyüklüğü =1)
- İzotropik malzeme içeren yapı (delik büyüklüğü= 0)

- Ortotropik malzeme içeren yapı (0 < delik büyüklüğü < 1)

Homojenizasyon yöntemiyle, sonlu elemanlar analizinde Cezalandırmalı katı izotropik malzeme metoduna benzer bir optimizasyon gerçekleştirmektedir.

Sonuç

Hammadde maliyetlerinin önemli bir gider kalemi olduğu günümüzde endüstriyel parçaların daha hafif üretilmesi temel ihtiyaçlardan biridir. Parçaları hafifletirken yük taşımayan/dayanıma katkısı olmayan kısımların parçalardan çıkartılması gerekir. Aslında kasnak, büyük dişli çark gibi makine elemanlarında yıllardır bu boşaltma işlemi yapılmaktadır. Parçaların belli bölgeleri bir tür delikli bölge (malzemenin bulunmadığı boş bölgeli) olarak tasarlanıp daha sonra dayanım analizleri yapılmaktadır. Bu tasarımlar gerekli yükleri taşıyamıyorsa parça çizimi modifiye edilip yeniden analiz yapılmaktadır. Bu işlem oldukça zaman alıcı olabilmektedir. Bunun yerine topoloji optimizasyonunun yapılması daha uygundur. Topoloji optimizasyonunda kaba kütük parça çizildikten sonra parçanın mesnet bölgeleri ve yük uygulanacak bölgeleri ve yüklerin büyüklükleri tanımlanır. Daha sonra yukarıda açıklanan yöntemlerden biri ile optimizasyon algoritması çalıştırılır. Genellikle gerilmeler dikkate alınıp gerilmenin oluşmadığı veya sıfıra yakın gerilmenin oluştuğu bölgeler silinir. Elde edilen geometri için optimizasyon algoritması tekrar çalıştırılır. Yeni bir geometri elde edilmiş olur. Bu işlem otomatik olarak birkaç defa çalıştırılır. Böylece Şekil 3'te ve Şekil 4'te verilen yük taşımayan bölgelerin tamamen silindiği bir geometri elde edilmiş olur. Topoloji optimizasyonu ile parça ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Topoloji optimizasyonu ağırlık, güvenlik ve performansın büyük önem taşıdığı özellikle uzay ve havacılık gibi alanlarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Kaynaklar

1. de Andrade, Fábio Morais, ve Cristina Almeida Magalhães. 2022. "Evolutionary structural optimization in energy absorption structures". *Advances in Engineering Software* 169(May). doi: 10.1016/j.advengsoft.2022.103145.
2. Aslan, Büşra. 2019. "Yenilikçi tasarim yöntemleri kullanarak eklemeli imalata yönelik optimum ürün geliştirilmesi". Bursa Teknik Üniversitesi.
3. Bendsoe, Martin Philip, ve Noboru Kikuchi. 1988. "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71:197–224.
4. Berrocal, Laura, Rosario Fernández, Sergio González, Antonio Periñán, Santos Tudela, Jorge Vilanova, Luis Rubio, Jose Manuel Martín Márquez, Javier Guerrero, ve Fernando Lasagni. 2019. "Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components". *Progress in Additive Manufacturing* 4(2):83–95. doi: 10.1007/s40964-018-0061-3.
5. Dai, Xiaoxia, Peipei Tang, Xiaoliang Cheng, ve Minghui Wu. 2013. "A variational binary level set method for structural topology optimization". *Communications in Computational Physics* 13(5):1292–1308. doi: 10.4208/cicp.160911.110512a.
6. Gebisa, A. W., ve H. G. Lemu. 2017. "A case study on topology optimized design for additive manufacturing". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 276(1). doi: 10.1088/1757-899X/276/1/012026.
7. Gebremedhen, Hailu Shimels, Dereje Engida Woldemicahel, ve Fakheruldin M. Hashim. 2019. "Three-dimensional stress-based topology optimization using SIMP method". *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization* 10:1–10. doi: 10.1051/smdo/2019005.
8. Göv, İ., ve M. Akif Kütük. 2007. "Topoloji optimizasyonunda eleman silme metodunun uygulanması",. Ss. 437–46 içinde *XV. Ulusal Mekanik Kongresi*. Isparta.
9. Holmberg, Erik, Bo Torstenfelt, ve Anders Klarbring. 2013. "Stress constrained topology optimization". *Structural and Multidisciplinary Optimization* 48(1):33–47. doi: 10.1007/s00158-012-0880-7.
10. Kahraman, Funda, ve Mehmet Küçük. 2020. "Otomotiv Endüstrisinde Topoloji Optimizasyonu ile Ağırlık Azaltma Uygulaması Üzerine Bir Araştırma". *European Journal of Science and Technology* (20):623–31. doi: 10.31590/ejosat.789424.
11. Kandemir, Volkan, Oguz Dogan, ve Ulas Yaman. 2018. "Topology optimization of 2.5D parts using the SIMP method with a variable

thickness approach". *Procedia Manufacturing* 17:29–36. doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.009.
12. Lim, Jarad, Chao You, ve Iman Dayyani. 2020. "Multi-objective topology optimization and structural analysis of periodic spaceframe structures". *Materials and Design* 190:108552. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108552.
13. Liu, Jikai, ve Yongsheng Ma. 2016. "A survey of manufacturing oriented topology optimization methods". *Advances in Engineering Software* 100:161–75. doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.07.017.
14. Liu, Xinjun, Xiang Chen, ve Zhidong Li. 2012. "Modular design of typical rigid links in parallel kinematic machines: Classification and topology optimization". *Frontiers of Mechanical Engineering* 7(2):199–209. doi: 10.1007/s11465-012-0315-6.
15. Osher, Stanley, ve James A. Sethian. 1988. "Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations". *Journal of Computational Physics* 79(1):12–49.
16. Özarpa, Cevat, Hüseyin Botsalı, ve Bahadır Furkan Kınacı. 2021. "Raylı Sistemlerde Kullanılan Cer Kancasının Topoloji Optimizasyonuna Uygunluğunun Değerlendirilmesi". *Demiryolu Mühendisliği* (15):1–12. doi: 10.47072/demiryolu.1016373.
17. Sigmund, Ole, ve Kurt Maute. 2013. "Topology optimization approaches: A comparative review". *Structural and Multidisciplinary Optimization* 48(6):1031–55. doi: 10.1007/s00158-013-0978-6.
18. Top, Neslihan, Harun Gökçe, ve İsmail Şahin. 2019. "Eklemeli imalat için topoloji optimizasyonu: El freni mekanizması uygulaması". *Selçuk-Teknik Dergisi* 18(1).
19. Tyflopoulos, Evangelos, ve Martin Steinert. 2020. "Topology and parametric optimization-based design processes for lightweight structures". *Applied Sciences (Switzerland)* 10(13). doi: 10.3390/app10134496.
20. Web_Sitesi. "SolidWorks web sitesi". 10 Aralık 2022 Tarihinde (https://help.solidworks.com/2019/english/solidworks/cworks/c_simp_method_topology.htm).
21. Yaman, Ulaş. 2019. "Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Parçaların 3B Yazıcılar ile Doğrudan Üretilmesi". *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 7(1):239–47. doi: 10.29109/gujsc.491244.
22. Yunfei, B., C. Ming, ve L. Yongyao. 2016. "Structural Topology Optimization for a Robot Upper Arm Based on SIMP Method". *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II.* 36:725–733.

23. Zhu, Jihong, Han Zhou, Chuang Wang, Lu Zhou, Shangqin Yuan, ve Weihong Zhang. 2021. “A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges”. *Chinese Journal of Aeronautics* 34(1):91–110. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
24. Zuo, Wenjie, ve Kazuhiro Saitou. 2017. “Multi-material topology optimization using ordered SIMP interpolation”. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 55(2):477–91. doi: 10.1007/s00158-016-1513-3.

TÜRKİYE, RUSYA VE İNGİLTERE İÇİN CO2 EMİSYON TAHMİN ANALİZLERİ

Doç. Dr. Zeydin PALA

Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Y
azılım Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-2642-7788

1-Giriş

Karbondioksit gazı (CO_2), literatürde karbon salınımı olarak ifade edilmekte, petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlarından kaynaklandığı gibi (Karaaslan, Abar, & Çamkaya, 2017) hidro elektrik enerjisi ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi (Gümüştekin Aydın & Aydoğdu, 2022) enerjilerin üretim süreçlerinden de ortaya çıkabilmektedir. Atmosfere salınan CO_2 'in %80'den fazlası fosil yakıtlarından geriye kalan kısmı canlı solunumunda, canlıların diğer faaliyetlerinden ve ormanların yakılmasıyla, yok edilmesiyle ortaya çıkmaktadır.

Dünyadaki CO_2 miktarını azaltmak yâda kontrol altında tutmak amacıyla 1960'li yıllarda yeşil düşünce akımı ortaya çıkmış ve 1997 yılında Kyoto protokolü imzalanmıştır. Daha sonraları 5 Ekim 2016 yılında Paris İklim anlaşması imzalanarak yürürlüğe girmiştir. Söz konusu anlaşma, ile küresel sıcaklık artış ortalaması 2°C ile sınırlandırılmaya çalışılmıştır. Türkiye bu anlaşmayı 22 Nisan 2016 yılında imzalamış, ancak 7 Ekim 2021 yılında resmi gazete ile yürürlüğe girmiştir (Varoğlu, 2018).

CO_2 salınımı küresel ısınma ve buna bağlı olarak birçok doğal afeti tetiklediğinden dolayı dünya ülkeleri bunu kontrol altına tutmak için bir kısım önlemler almaktadırlar. Yıllık olarak ülkelerin ürettiği kişi başına düşen CO_2 miktarı birçok şirket tarafından saklanmakta ve bilim insanlarının araştırma yapmaları için kullanıma hazır hale getirmektedirler. Küresel ısınmanın sebeplerini araştırmak, CO_2 gazına sebep olan faktörleri ortaya koymak için bilimin hemen hemen her alanında kullanılan istatistiksel tabanlı modeller (Batmaz & Yürük, 2022; Karaaslan et al., 2017; Z. Pala, Ünlük, & Yaldız, 2019; Varoğlu, 2018), yapay sinir ağları, derin öğrenme modelleri (Z. Pala, Yamli, & Ünlük, 2017; Ünlük & Pala, 2019), makine öğrenmesi(Gümüştekin Aydın & Aydoğdu, 2022), zaman serileri (Z. Pala et al., 2019; Z Pala, 2019a; Zeydin Pala & Atici, 2019; Zeydin Pala & Pala, 2020, 2021), sezgisel yöntemler ve Hibrit modeller (Atici & Pala, 2021; Li, Wu, Tian, & Fan, 2021; Z Pala, 2019b; Zeydin Pala, 2023; Zeydin Pala & Ünlük, 2022) gibi yapay zekânın (Dhillon, Madhu, Kaur, & Singh, 2020; Zeydin Pala & Özkan, 2020) birçok alt alanı burada da kullanılmaktadır.

CO_2 emisyonu noktasında literatürde bir çok çalışma yapılmıştır. Aydın ve ark. (Gümüştekin Aydın & Aydoğdu, 2022) makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak ve 2010-2019 yılları arasındaki verileri kullanarak Türkiye ve AB ülkelerinin CO2 emisyonlarını tahmin etmişlerdir. Karaslan ver ark. (Karaaslan et al., 2017) yaptıkları çalışmada CO2 salınımı üzerinde etkili olan faktörleri araştırmışlardır. Batmaz ve Yürük (Batmaz & Yürük, 2022) Avrasya ekonomik birliğine üye ülkeler ve Türkiye'de CO2 emisyonu belirleyicilerini 200-2018 yılları arasındaki veriler yardımıyla araştırmışlardır. Varoğlu (Varoğlu, 2018)

kişi başına gelir ve fosil yakıt tüketiminin CO2 emisyonu üzerindeki etkisini Gregory-Hansen eşbütünleşme testi ile analiz etmişlerdir. Özdemir ve ark. (Zekai Özdemir & Ayça Doğaner, 2022) Almanya'daki ekonomi büyümesi ve karbon emisyon ilişkisini araştırmışlardır. Bu amaçla 1990-2018 yılları arasındaki karbon emisyonu yoğunluğu endeksi, kişi başına elektrik tüketimi ve kişi başına GSYH verileri ele alınarak birçok analiz yapılmıştır. Topallı (Topallı, 2022) çalışmasında Asya pasifik ülkelerinin verileri kullanarak CO2 emisyonu ve ticari açıklık arasındaki ilişkileri incelemiştir. Ordu (Ordu, 2022) çalışmasında Türkiye için ARDL sınır testi yaklaşımını kullanarak enerji tüketimi, CO2 salınımı ve ekonomik büyümeyi araştırmışlardır. Quader ve ark. (Qader, Khan, Kamal, Usman, & Haseeb, 2022) çalışmalarında 1933-2019 yılları arasındaki verileri kullanarak Bahreyn'de elektrik enerjisi üretimi nedeniyle oluşan karbon emisyonlarını tahmin etmişlerdir. Hwang ve ark. (Hwang & Yoo, 2014) yaptıkları çalışmada Endonezya'da enerji tüketimi, CO2 emisyonları ve ekonomik büyüme arasındaki kısa ve uzun vadeli nedensellik konularını zaman serisi teknikleri kullanarak analiz etmeye çalışmışlardır. Bu amaçla, 1965–2006 dönemini kapsayan yıllık veriler kullanılmış ve birim kök, eşbütünleşme ve hata düzeltme modeline dayalı Granger nedensellik testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, enerji tüketimi ile CO2 emisyonları arasında çift yönlü bir nedensellik olduğunu göstermiştir. Xu ve arkadaşları (Xu & Lin, 2016) yaptıkları çalışmada Çin endüstrisindeki karbondioksit emisyonlarındaki değişimleri etkileyen faktörleri analiz etmek için Vektör Otoregresif modelini kullanmaktadır. Sonuçlar, enerji verimliliğinin karbondioksit emisyonlarının azaltılmasında baskın bir rol oynadığını göstermektedir.

Bu çalışmada Türkiye, Rusya ve İngiltere'nin 1967-2021 yılları arasındaki 55 yıllık kişi başına ton olarak ölçülen ve üretime dayalı olarak düşen CO_2 miktarlarını esas alan veri setleri kullanılarak yıllık bazda gelecek tahminleri yapılmıştır. Tahminler için zaman serileri yaklaşımı ile R ortamında kullanılan NNAR, MLP, ELM gibi derin öğrenme modelleri yanında AUTO. ARIMA (Shaub, 2020), TBATS (Munim, 2022) ve ETS gibi istatistiksel tabanlı modeller kullanılmıştır (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Tahmin sonuçlarını değerlendirmek için de ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) kullanılmıştır.

2-Materyiyal ve Yöntem

Bu bölüm, veri toplama, yapılan analizler ve analizlere dayalı olarak elden edilen sonuçları içermektedir.

2.1 Veri Toplama

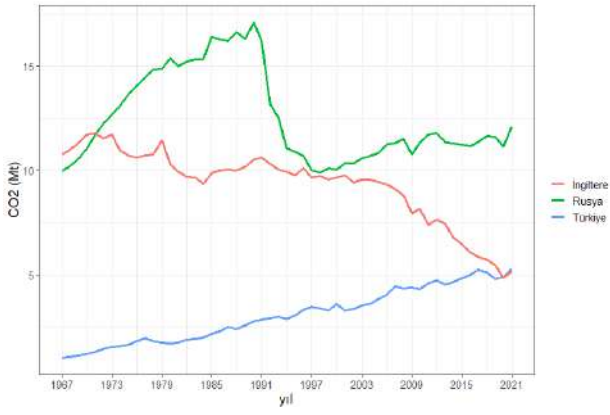
Bu çalışmada Türkiye, Rusya ve İngiltere'nin yıllık olarak kişi bazında salınan CO2 (Mt) gazına ait veriler https://ourworldindata.org/ sitesinden tedarik edilmiştir.

Öncellikle şunu ifade edelim ki burada kullanılan veri seti "üretim" veya 'bölgesel' emisyonlara (yani, bir ülke sınırları içinde fosil yakıtların yakılmasından veya çimento üretiminden kaynaklanan emisyonlar) dayanmaktadır. Veri seti içinde ticareti yapılan malların emisyonlarını, diğer bir ifadeyle tüketime dayalı emisyon bilgileri yer almamaktadır. Yıllık emisyonların büyük ölçüde nüfus büyüklüğünden etkilenebilmektedir.

Türkiye için oluşturulan veri setinde, 1865 ile 2021 yılları arasındaki kişi başına salınan CO_2 (Mt) miktarlarına ait veriler bulunmaktadır. Ancak 1865-1966 yılları arasındaki veriler ondalıklı olduğundan ve sonraki yıllardaki veriler yanından çok küçük olduğundan dolayı zaman serisinde kullanılmamıştır. Farklı üç ülke olan Türkiye, Rusya ve İngiltere için aynı şartlarda gelecek tahminleri yapmak için her üç ülke için de 1967 ile 2021 yılları arasındaki veriler, diğer bir ifadeyle 55-yıllık veriler kullanılmıştır. Ülke bazında kullanılan verilere ait istatistiksel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Veri setlerine ait istatistiksel bilgiler

Veri setleri	Uzunluk	En küçük değer (Mt)	En büyük değer (Mt)	Ortalama (Mt)	Medyan (Mt)
Türkiye	55-yıllık	1,013	5,263	3,051	2,986
Rusya	55-yıllık	9,917	17,120	12,527	11,610
İngiltere	55-yıllık	4,865	11,810	9,351	9,773



Şekil 1:Türkiye, Rusya ve İngiltere için yıllık olarak kişi başına yayılan CO_2 (Mt)

Şekil 1 incelendiğinde, genel anlamda Türkiye'nin CO_2 (Mt) yayılımında bir yükseliş trendiyle devam ettiği gözlenmektedir. 1967 yılında kişi başına yıllık

yayılan CO_2 (Mt) 1,01 Mt iken 2021 yılında bu rakam 5,26 Mt ye çıkmaktadır. Buna mukabil genel anlamda bir iniş trendine giren ve 1967 yılında 10,79 Mt ile başlayan İngiltere, 2021 yılında 5,15 Mt gibi bir değere düşmektedir. Diğer taraftan 1967 yılında 9,99 Mt ile başlayan Rusya 1990 yılında 17,19 Mt ile zirveye çıkmakta ve ardında keskin iniş trendine girerek bunu 1998 yılına kadar devam ettirmektedir. Daha sonra küçük salınmalarla 2021 yılını 12,10 Mt ile tamamlamaktadır.

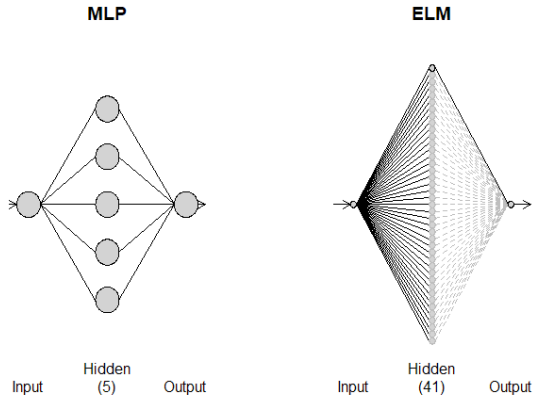
2.2-CO_2 yayılımı için yapılan analizler

Analizlerde kullanılan her bir veri seti için 11 yıllık tahminler yapılmıştır.

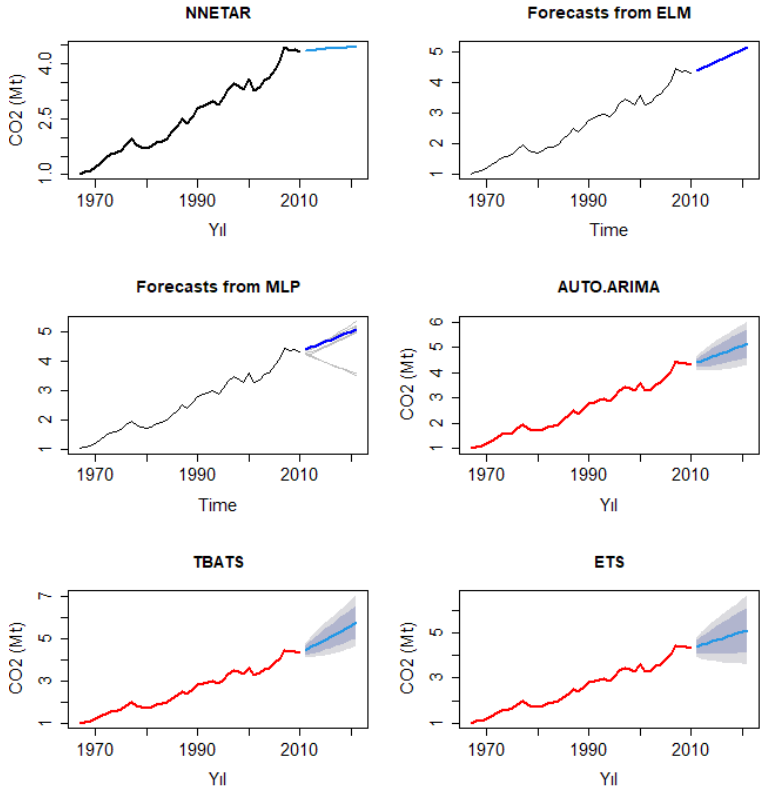
Türkiye, Rusya ve İngiltere için CO_2 yayılımını içeren zaman serilerinin % 80'i eğitim için geriye kalan %20 ise test işlemi için kullanılmıştır. Her bir ülke için altı farklı model kullanılarak yapılan tahmin analizlerinin MAPE test değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca Türkiye'deki CO2 salınımı için kullanılan derin öğrenme modellerinden MLP ve ELM'ye ait giriş, gizli katman ve çıkıştaki nöron sayısını gösteren yapısal grafikler Şekil 2'de 11 yıllık tahmin analizlerini gösteren ve altı modelin kullanıldığı grafikler de Şekil 3'te gösterilmiştir. İngiltere için kullanılan tahmin grafikleri ise Şekil 4'te gösterilmiştir.

Tablo 2: üç farklı ülke için kullanılan altı faklı modelin MAPE değerleri

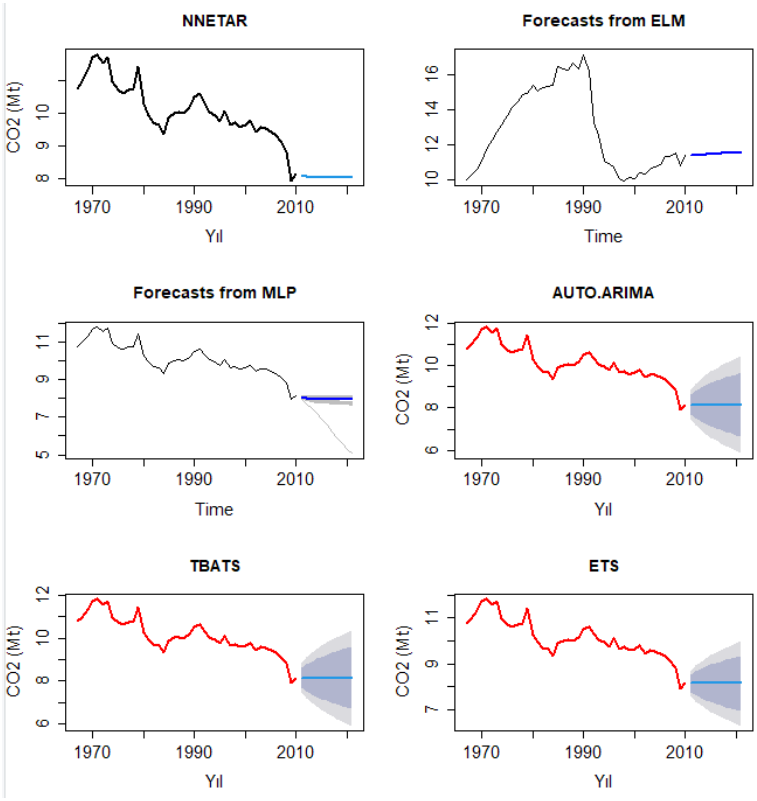
Model Adı	Türkiye CO_2 MAPE test (%)	Rusya CO_2 MAPE test (%)	İngiltere CO_2 MAPE test (%)
NNETAR	9,65	27,51	31,19
MLP	3,78	3,81	30,13
ELM	3,46	2,11	87,20
TBATS	5,46	2,19	33,02
ETS	3,61	2,22	7,26
AUTO.ARIMA	3,48	2,35	7,25



Şekil 2:MLP ve ELM modellerine ait yapısal grafikler



Şekil 3:Üçü derin öğrenme ve üçü de istatistiksel-tabanlı model olmak üzere altı farklı modele ait 11 yılık Türkiye için kişi başına salınan CO2 tahmin grafikleri



Şekil 4:Altı farklı modele ait 11 yılık İngiltere için kişi başına salınan CO2 tahmin grafikleri

Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü gibi, her bir modele ait koyu gölgeli alanlar, tahmin edilen %80 aralıkları göstermektedir. Diğer bir deyişle, her potansiyel değerin %80 olasılıkla koyu gölgeli alanda olduğu tahmin edilmektedir. Açık gölgeli alanlar %95 tahmin aralıklarını gösterir. Bu tahmin aralıkları, tahmindeki değişkenliği göstermenin yararlı bir yoludur. Bu durumda tahminin güvenilir olduğu varsayılır ve bu nedenle tahmin aralıkları çok dardır. Grafiklerin tahmin aralığındaki mavi çizgiler ise nokta tahminleri dediğimiz potansiyel gelecek değerlerin ortalamasını göstermektedir.

Tablo 2'de görüldüğü gibi yapılan analizlerde en iyi tahmin işlemi Türkiye için %3,46 ile ELM, Rusya için %2,11 ile ELM ve İngiltere için %7,25 ile AUTO.ARIMA tarafından yapılmıştır. Zaman serilerinin yapısal olarak farklı olmasından dolayı farklı tahmin sonuçlarına ulaşılmıştır. Her üç ülke için de AUTO.ARIMA modeli daha dengeli sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Buna en yakın model ETS olmuştur. NNETAR modeli her üç ülke için de en fazla hata yapan model olmuştur.

3. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Türkiye, Rusya ve İngiltere için 1967-2021 yılları arasındaki 55-yıllık veri setleri kullanılarak kişi başına yıllık salınan CO_2 verileri için 11-yıllık tahminler yapılmıştır. Tahminler için üçü derin öğrenme olmak üzere altı farklı model kullanılmıştır. Türkiye için model tahminleri MAPE metriğine göre %3,68-%9,65 aralığında değişirken Rusya için bu değerler %2,11-%27,51 arasında değişmektedir. İngiltere için yapılan tahminlerin aralığı ise %7,25-,%87,20 dir. Bu durumda Türkiye, Rusya ve İngiltere için yapılan tahminlerde sırasıyla ELM, ELM ve AUTO.ARIMA modeli ön plana çıkmıştır.

CO_2 salınımının Türkiye için artan, Rusya için salınımlı ve artan ancak İngiltere için azalan olarak değerlendirmek mümkündür. Bu durumda Gerek Türkiye ve gerekse Rusya'nın CO_2 salınımını azaltmak için daha büyük çabaların ortaya koymaları gerektiği açıkça görülmektedir.

Burada oldukça kısıtlı veriler ile tahminler yapılmıştır. Derin öğrenme modelleri için daha fazla verinin daha iyi tahmin anlamına geldiği unutulmamalıdır.

Kaynaklar

1. Atici, R., & Pala, Z. (2021). Prediction of the Ionospheric foF2 Parameter Using R Language Forecasthybrid Model Library Convenient Time. *Wireless Personal Communications*, (doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6 Prediction), 1–20. https://doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6
2. Batmaz, T., & Yürük, B. (2022). Avrasya Ekonomik Birliğine Üye Ülkeler ve Türkiye'de CO2 Emisyonu Belirleyicilerinin İncelenmesi: 2000-2018. *Sosyoekonomi*, *30*(52), 491–504. https://doi.org/10.17233/sosyoekonomi.2022.02.25
3. Dhillon, S., Madhu, C., Kaur, D., & Singh, S. (2020). A Solar Energy Forecast Model Using Neural Networks: Application for Prediction of Power for Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture. *Wireless Personal Communications*, *112*(4), 2741–2760. https://doi.org/10.1007/s11277-020-07173-w
4. Gümüştekin Aydın, S., & Aydoğdu, G. (2022). CO2 Emissions in Turkey and EU Countries Using Machine Learning Algorithms. *European Journal of Science and Technology*, (37), 42–46. https://doi.org/10.31590/ejosat.1129958
5. Hwang, J. H., & Yoo, S. H. (2014). Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth: Evidence from Indonesia. *Quality and Quantity*, *48*(1), 63–73. https://doi.org/10.1007/s11135-012-9749-5
6. Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting : Principles and Practice* (2nd editio). Australia: Monash University.
7. Karaaslan, A., Abar, H., & Çamkaya, S. (2017). CO2 Salınımı Üzerinde Etkili Olan Faktörlerin Araştırılması: OECD Ülkeleri Üzerine Ekonometrik Bir Araştırma. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, *21*(4), 1297–1310.
8. Li, J., Wu, Q., Tian, Y., & Fan, L. (2021). Monthly Henry Hub natural gas spot prices forecasting using variational mode decomposition and deep belief network. *Energy*, *227*, 120478. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120478
9. Munim, Z. H. (2022). State-space TBATS model for container freight rate forecasting with improved accuracy. *Maritime Transport Research*, *3*(November 2021), 100057. https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100057
10. Ordu, S. (2022). Ekonomi , İşletme ve Maliye Araştırmaları Dergisi, 52–63.
11. Pala, Z., Ünlük, İ. H., & Yaldız, E. (2019). Forecasting of electromagnetic radiation time series: An empirical comparative approach. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, *34*(8), 1238–1241.

12. Pala, Z., Yamli, V., & Ünlük, I. H. (2017). Deep Learning researches in Turkey: An academic approach. In *2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings*. https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937546
13. Pala, Z. (2019a). Using Decomposition-based Approaches to Time Series Forecasting in R Environment. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, *1*(1), 231–233.
14. Pala, Z. (2019b). Using forecastHybrid Package to Ensemble Forecast Functions in the R. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, *1*(1), 45–47.
15. Pala, Zeydin. (2023). Comparative study on monthly natural gas vehicle fuel consumption and industrial consumption using multi-hybrid forecast models. *Energy*, *263*(PC), 1–21. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125826
16. Pala, Zeydin, & Atici, R. (2019). Forecasting Sunspot Time Series Using Deep Learning Methods. *Solar Physics*, *294*(5). https://doi.org/10.1007/s11207-019-1434-6
17. Pala, Zeydin, & Özkan, O. (2020). Artificial Intelligence Helps Protect Smart Homes against Thieves. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, *11*(3), 945–952. https://doi.org/10.24012/dumf.700311
18. Pala, Zeydin, & Pala, A. F. (2020). Perform Time-series Predictions in the R Development Environment by Combining Statistical-based Models with a Decomposition-based Approach. *Journal of Muş Alparslan University Faculty of Engineering and Architecture*, *1*(1), 1–13.
19. Pala, Zeydin, & Pala, A. F. (2021). Comparison of ongoing COVID-19 pandemic confirmed cases / deaths weekly forecasts on continental basis using R statistical models. *Dicle University Journal of Engineering*, *4*, 635–644. https://doi.org/10.24012/dumf.1002160
20. Pala, Zeydin, & Ünlük, İ. H. (2022). Comparison of hybrid and non-hybrid models in short-term predictions on time series in the R development environment. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, *2*, 199–204. https://doi.org/10.24012/dumf.1079230
21. Qader, M. R., Khan, S., Kamal, M., Usman, M., & Haseeb, M. (2022). Forecasting carbon emissions due to electricity power generation in Bahrain. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(12), 17346–17357. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16960-2
22. Shaub, D. (2020). Fast and accurate yearly time series forecasting with forecast combinations. *International Journal of Forecasting*, *36*(1), 116–120. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.03.032

23. Topallı, N. (2022). Co2 Emisyonu ve Ticari Açiklik Arasindak İlişki: Asya Pasifik Ülkeleri örneği. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, *21*(83), 1109–1130. https://doi.org/10.17755/esosder.1014984
24. Ünlük, İ. H., & Pala, Z. (2019). Prediction of monthly electricity consumption used in Mu ş Alparslan University Complex by means of Classical and Deep Learning methods. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, *1*(1), 237–239.
25. Varoğlu, N. (2018). The Impact of Per Capita Income and Fossil Fuel Consumption on Co2 Emissions: Cointegration Analysis for Turkey. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ECONOMIC STUDIES*, *4*(3), 23–41. Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/792932
26. Xu, B., & Lin, B. (2016). Assessing CO2 emissions in China's iron and steel industry: A dynamic vector autoregression model. *Applied Energy*, *161*, 375–386. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.039
27. Zekai Özdemir, & Ayça Doğaner, G. Ç. (2022). RELATIONSHIP BETWEEN ECONOMIC GROWTH AND CARBON EMISSIONS : THE EXAMPLE OF GERMANY, 509–521.

DeepAR İLE SICAKLIK TAHMİNİ

Doç. Dr. Zeydin PALA

Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Yazılım Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-2642-7788

1-Giriş

Zaman serileri tahmin analizi geçmiş verilere dayanarak geleceği kestirmeye dayanmaktadır.

Zaman serisi tahmini, büyük veri analizinin en önemli dallarından biri olarak ortaya çıkmıştır. Zaman serilerinin en önemli hedef motivasyonu geçmiş ve şimdiki verilere dayalı olarak geleceği tahmin etmektir [1]. Zaman serileri zamansal bağımlılık ve yüksek boyutluluk gibi özelliklere sahip bulunmakla birlikte kronolojik olarak oluşturulmaktadır.

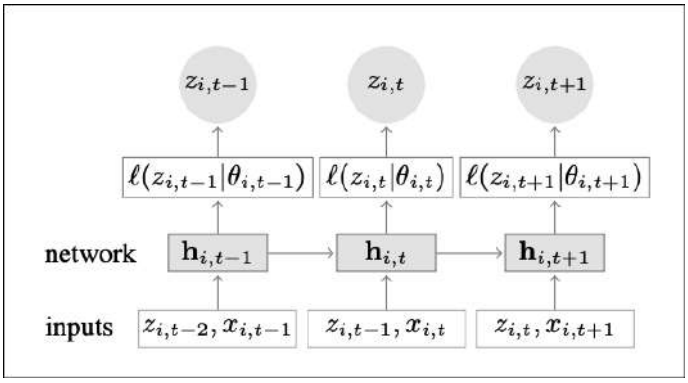
Son zamanlarda tahmin işlemlerinde istatistiksel tabanlı modeller [2]–[5], yapay sinir ağları, derin öğrenme modelleri [6], [7], makine öğrenmesi [8], zaman serileri [5], [9]–[12], sezgisel yöntemler ve Hibrit modeller [13]–[17] gibi yapay zekânın [18], [19] birçok alt alanı yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca son yıllarda, makine öğrenimi, özellikle derin öğrenme, derin öğrenmenin temel bileşeni olan derin sinir ağları (DNN'ler) başta bilgisayar görüsü olmak üzere birçok alanda; hem endüstriden hem de akademiden önemli ilgi gördü [20].

Bir hibrit model olarak *DeepAR*, hem noktasal hem de olasılıksal tahminler üretmek için tekrarlayan sinir ağlarını (RNN) kullanan, zaman serisi tahmini için denetimli bir öğrenme algoritmasıdır [21]. Bu model birçok araştırmada kullanılmıştır [22]–[25]. *DeepAR*, dünyanın en büyük çevrimiçi perakendecisi ve önde gelen bir bulut hizmeti sağlayıcısı olan Amazon (amazon.com) araştırmacıları tarafından geliştirilen bir modeldir. *DeepAR*, *RNN*'lere dayalı bir derin öğrenme mimarisi kullanarak zaman serisi modelleri oluşturmak için bir arayüz sağlar. *DeepAR* kullanmanın avantajı, model oluşturma için makine öğrenimi platformu *TensorFlow* üzerinde çalışan, Python'da yazılmış bir derin öğrenme API'si olan *Keras'a* kıyasla kullanımı daha kolay bir arayüz sunmasıdır.

DeepAR, RNN'leri kullanarak tek değişkenli veya çok değişkenli [26][27] zaman serilerini tahmin eder. *DeepAR*'ın teorik katma değeri, aynı anda tüm zaman serilerine tek bir model sığdırmasıdır. Birden çok zaman serisi arasındaki korelasyonlardan yararlanmak için tasarlanmıştır ve bu nedenle çok değişkenli tahmin için oldukça iyi bir modeldir. Ancak tek bir zaman serisine de uygulanabilir.

DeepAR, birden çok mevsimsellik değişkeni türünü modeller. Ayın günü, yılın günü ve diğer türetilmiş değişkenler için değişkenleri de tanımlar. *DeepAR* olasılıksal tahminler yapabilme yeteneğine de sahiptir [28].

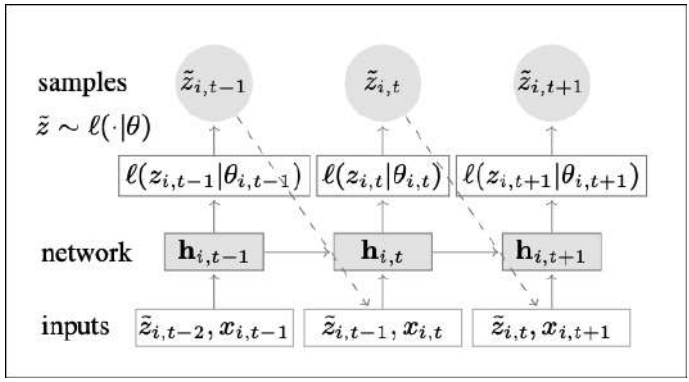
DeepAR modeli, tahminleri doğrudan hesaplamak için *LSTM′* leri kullanmak yerine, bir Gauss olasılık fonksiyonunu parametreleştirmek için *LSTM′* leri kullanır. Yani, Gauss fonksiyonunun $\theta = (\mu, \sigma)$ parametrelerini (ortalama ve standart sapma) kullanır [24]. Sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de *DeepAR* modelinin eğitim sırasında ve eğitim çıkarımındaki matematiksel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1: Eğitim sırasında *DeepAR'da* matematiksel işlemler [29].

Şekil 1'de gösterildiği gibi i zaman serisinin t zaman adımında olduğumuzu varsaydığımızda *DeepAR* algoritması aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

1. İlk olarak, *LSTM* hücresi, geçerli zaman adımı t'nin ortak değişkenlerini $x_{i,t}$ ve önceki zaman adımı $t-1$'in hedef değişkeni $z_{i,t-1}$ yi girdi olarak alır. Ayrıca, *LSTM* önceki zaman adımının $h_{i,t-1}$, gizli durumunu alır.
2. Ardından, *LSTM* hücresi, bir sonraki adıma beslenen gizli durumu $h_{i,t}$'yi verir.
3. μ ve σ değerleri dolaylı olarak $h_{i,t}$'den hesaplanır ve bir Gauss olasılık fonksiyonunun $p(y_i|\theta_i) = l(z_{i,t}|\Theta_{l,t})$ parametreleri haline gelir. Burada θ = (μ, σ) olarak tanımlandığı varsayılmıştır.
4. Başka bir deyişle, model şu soruyu yanıtlamaya çalışır: $z_{i,t}$ hedef değişkenine olabildiğince yakın tahminler veren bir gauss dağılımı oluşturan en iyi μ ve σ parametreleri nelerdir?
5. Bu, t eğitim adımını tamamlar. Mevcut hedef değer z_i ve gizli durum $h_{i,t}$ bir sonraki zaman adımına geçirilir ve eğitim süreci devam eder. *DeepAR* her seferinde tek bir veri noktasını eğittiği ve tahmin ettiği için modele *otoregresif* denir.



Şekil 2: *DeepAR* eğitim çıkarımında matematiksel işlemler [29].

Çıkarım için adımlar hemen hemen aynıdır. Yine de değişen bir şey var: Şimdi, her t çıkarım adımında, yeni tahmin $\tilde{z}_{i,t}$'yi hesaplamak için önceki zaman adımında $t-1$ örneklenmiş olan tahmin edilen değişken $\tilde{z}_{i,t-1}$'i kullanıyoruz. Burada $\tilde{z}_{i,t}$, artık modelimizin eğitim sırasında öğrendiği Gauss dağılımından örneklendiği unutulmamalıdır. Ancak modelimiz μ ve σ parametrelerini doğrudan öğrenmez.

DeepAR'ın otoregresif doğasının nasıl çalıştığını incelemeden önce, olasılık fonksiyonunun nasıl çalıştığını anlamak önemlidir. Maksimum olabilirlik tahmininin amacı, örnek verilerimizi daha iyi açıklayan bir dağılımın en uygun parametrelerini bulmaktır.

Verilerimizin Gauss (normal) dağılımını takip ettiğini varsayalım. Her Gauss dağılımı, ortalama μ ve standart sapma σ, yani θ = (μ, σ) ile parametreleştirilir. Bu nedenle, θ = (μ, σ) verildiğinde Gauss olasılığı ℓ şu şekilde tanımlanır:

$$l_G(z|\mu,\sigma) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{1}{2}}\exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Daha resmi olarak verilere en uygun şekilde uyan iki dağılımın en iyi μ ve σ'sini bulmaktır (*DeepAR* yalnızca bir dağıtım varsayar). İstatistikte, bu görev aynı zamanda Gauss log-olasılık fonksiyonunu maksimize etme olarak da adlandırılır:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{t=t_0}^{T} log\ell(z_{i,t}|\theta(h_{i,t})) \quad (2)$$

Burada fonksiyon, tüm zaman adımları t∈ [t…τ_{max}] ve i∈ [1…N] için maksimize edilmiştir, N, veri kümemizdeki toplam zaman serisi sayısıdır.

İstatistikte μ ve σ parametreleri normalde olabilirlik fonksiyonunun farklılaştırılmasıyla türetilen MLE formülleri (maksimum log-olabilirlik tahmin edicileri) kullanılarak tahmin edilir. Bunun yerine, LSTM ve 2 yoğun katmanın, modelin girdisine dayalı olarak bu parametreleri türetmesine izin verilmektedir.

Bu çalışmadaki amacımız, 1981-1991 yılları arasındaki Melbourne şehrinde ölçülen en düşük sıcakları dikkate alarak *DeepAR* ile tahminler yapmaktadır. Sıcaklık tahmini, hava tahmininin en temel görevlerinden biridir. Burada 3647 günlük en düşük sıcaklık gözlem verisi esas alınarak 61 günlük tahminler yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2-Materyiyal ve Yöntem

Bu bölüm, veri toplama, yapılan analizler ve analizlere dayalı olarak elden edilen sonuçları içermektedir.

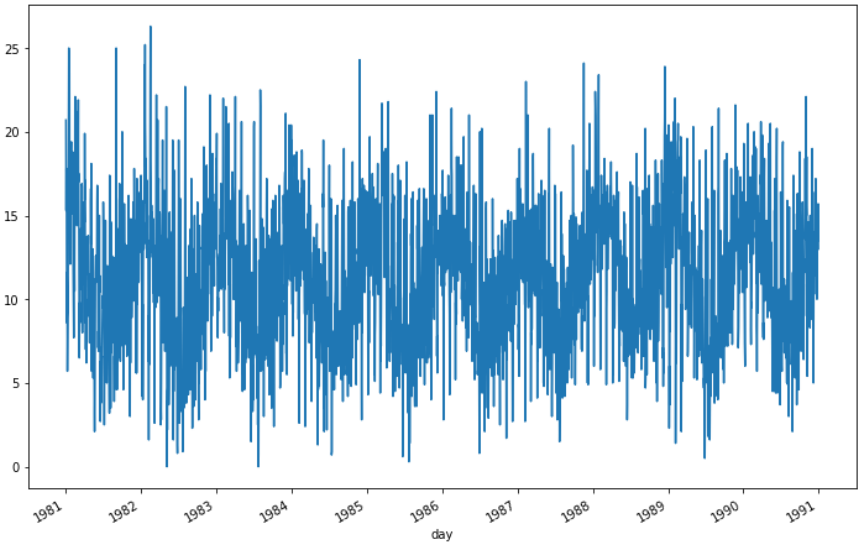
2.1 Veri Toplama

Burada kullanılan veriseti *Kaggle* sitesinden indirilmiştir. *CSV* formatında ve "Daily minimum temperatures in Melbourne" ismiyle dağıtılan veriseti 1981-1990 yılları Avustralya'nın Melbourne şehrine ait günlük en düşük sıcaklık değerlerini içermektedir. Veri seti ile ilgili istatistiksel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Yatay eksende günler, dikey eksende 3647 gözlem verisine dayanan günlük en düşük sıcaklıkların görsel olarak ifade edildiği grafik Şekil 3'de verilmiştir.

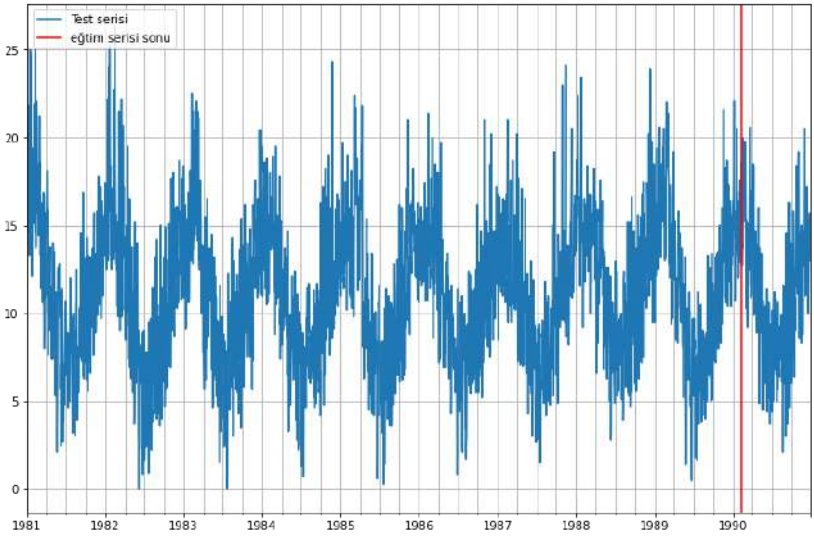
Veri setinin 01.01.1981 ile 31.10.1990 tarihleri arasındaki veriler eğitim için, 01.11.1990 ile 31.12.1990 arasındaki veriler tahmin uzunluğu için, 01.01.1981 ile 31.12.1990 tarihleri arasındaki veriler (veri setinin tamamı) test için ayrılmıştır. Eğitim ve test verilerinin görsel olarak gösterildiği grafik Şekil 4'de verilmiştir.

Tablo 1: Veri kümesine ait istatistiksel bilgiler

Gözlem sayısı	En küçük değer (°C)	En büyük değer (°C)	Ortalama (°C)
3647-günlük	0.0	26.30	11.18



Şekil 3: 1981-1990 yılları arasındaki Avustralya'nın Melbourne şehrine ait günlük en düşük sıcaklık değerleri



Şekil 4: Verisetine ait eğitim ve test serileri

2.2-Yapılan analizler

Burada, *PyTorch* ve *MXNet* tabanlı, derin öğrenmeye dayalı modellere odaklanan, olasılıksal zaman serisi modellemesi için bir Python paketi olan *GluonTS* kullanılmıştır. *GluonTS* paketi yarımıyla *DeepAR* modeli oluşturulmuştur. Bunun için bir eğitmen kullanan *DeepAREstimator* adlı bir tahmin aracı oluşturulmuştur. *DeepAREstimator* içerisinde birden fazla

parametre kullanılmaktadır. Bunlardan *tahmin_uzunluğu* tahmin edilmek istenen gün sayısını gösterirken, *ctx* eğer varsa sistemdeki GPU yâda CPU'yu kullanmayı sağlamaktadır. Ayrıca epoch (döngü) sayısı, eğitim sırasında tüm eğitim verilerinin ağa gösterilme sayısını gösterirken, *öğrenme_hızı*, sinir ağı optimize edici için adım boyutunu göstermektedir. Daha büyük bir öğrenme hızı, daha büyük adımlar atmanıza imkan tanır, ancak optimum noktasını kaçırabilir, oysa daha düşük bir öğrenme oranı, optimum noktasını daha rahat yakalayabileceği gibi optimizasyonu yavaşlatabilir. Bu modelde frekans, tahmin uzunluğu, öğrenme oranı, döngü sayısı, katman sayısı ve hücre sayısı parametrelerine sırasıyla "D", 61, 0.001,10, 2 ve 40 değerleri atanmıştır.

Modelin aylık (61 günlük) tahmin grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi veri kümesindeki zaman serisinin tahmini ve gerçekte gözlemlenen değerleri görselleştirilmiştir. Potansiyel sonuçların aralığını göstermek için ortalama tahminin yanı sıra %50 ve %90 tahmini dilimler de çizilmiştir.

Literatürde modellerin performanslarını değerlendirmek için çok farklı metrikler kullanılabilmektedir [30][31]. Bu çalışmada doğruluk değeri diğerlerine nazaran daha iyi olan simetrik ortalama mutlak yüzde hatası (sMAPE), ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) ve karekök ortalama hatası(RMSE) metrikleri kullanılmıştır.

$$\boldsymbol{sMAPE} = \frac{\boldsymbol{2}}{\boldsymbol{h}} \sum_{t=n+1}^{n+h} \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{|y_t||\hat{y}_t|} x100\ (\%) \tag{3}$$

MAPE metriği, meydana gelen ortalama mutlak hatanın yüzdesini temsil eder. Ölçüm ölçeğinden bağımsızdır, ancak veri dönüşümünden etkilenir.

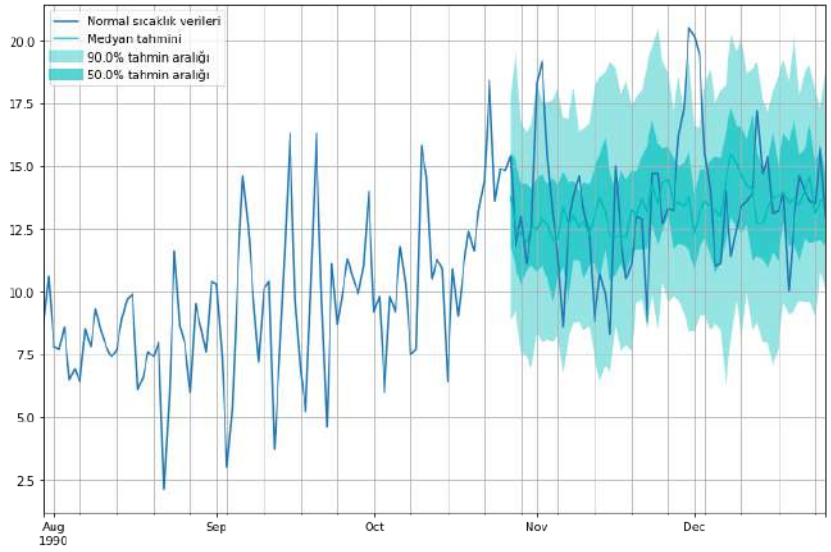
$$\boldsymbol{MAPE} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{N}} \sum_{n=1}^{N} \left|\frac{O_i}{P_i}\right| x100 \tag{4}$$

Burada n, gözlem sayısıdır. Tahmindeki aşırı hatalarla sınırlı olan RMSE, modelleri değerlendirmek için kullanılır:

$$\boldsymbol{RMSE} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{N}} \sum_{i=1}^{N} (O_i - P_i)^2} \tag{5}$$

Tahmin işlemi sonucunda MAPE, sMAPE ve RMSE metrik değerleri sırasıyla 0.145, 0.144 ve 2.684 olarak bulunmuştur.

MAPE metriğine göre yapılan hata %14.50 ve buna karşılık sitemin başarımı ise %85.50 dir.



Şekil 5: Modelin 61 günlük ve %50-%90 olasılık değerlerine bağlı olarak tahmin grafiği

3. Sonuçlar

Burada *DeepAR* kullanılarak örnek olarak kullanılan zaman serisi için gelecek tahminleri yapılmıştır. *DeepAR* modeli, birçok zaman serisinden eğilimleri aynı anda öğrenebilmekte ve birden fazla zaman serisinin tahminlerini yapabilmektedir. Doğru tahmin için modelin değişkenliğini iyice analiz etmek gerekmektedir. Tahmin ederken, çok sayıda potansiyel yörüngeyi tahmin edebilmekte ve bu yörüngelerin medyanını tahmin olarak kullanabilmektedir.

Kaynaklar

1. A. Homburg, C. H. Weiß, L. C. Alwan, G. Frahm, and R. Göb, "A performance analysis of prediction intervals for count time series," *J. Forecast.*, vol. 40, no. 4, pp. 603–625, 2021.
2. A. Karaaslan, H. Abar, and S. Çamkaya, "CO2 Salınımı Üzerinde Etkili Olan Faktörlerin Araştırılması: OECD Ülkeleri Üzerine Ekonometrik Bir Araştırma," *Atatürk Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 21, no. 4, pp. 1297–1310, 2017.
3. N. Varoğlu, "The Impact of Per Capita Income and Fossil Fuel Consumption on Co2 Emissions: Cointegration Analysis for Turkey," *Int. J. Econ. Stud.*, vol. 4, no. 3, pp. 23–41, 2018.
4. T. Batmaz and B. Yürük, "Avrasya Ekonomik Birliğine Üye Ülkeler ve Türkiye'de CO2 Emisyonu Belirleyicilerinin İncelenmesi: 2000-2018," *Sosyoekonomi*, vol. 30, no. 52, pp. 491–504, 2022.
5. Z. Pala, İ. H. Ünlük, and E. Yaldız, "Forecasting of electromagnetic radiation time series: An empirical comparative approach," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 34, no. 8, pp. 1238–1241, 2019.
6. Z. Pala, V. Yamli, and I. H. Ünlük, "Deep Learning researches in Turkey: An academic approach," in *2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings*, 2017.
7. İ. H. Ünlük and Z. Pala, "Prediction of monthly electricity consumption used in Mu ş Alparslan University Complex by means of Classical and Deep Learning methods," *Int. Conf. Data Sci. Mach. Learn. Stat. - 2019*, vol. 1, no. 1, pp. 237–239, 2019.
8. S. Gümüştekin Aydın and G. Aydoğdu, "CO2 Emissions in Turkey and EU Countries Using Machine Learning Algorithms," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 37, pp. 42–46, 2022.
9. Z. Pala and A. F. Pala, "Perform Time-series Predictions in the R Development Environment by Combining Statistical-based Models with a Decomposition-based Approach," *J. Muş Alparslan Univ. Fac. Eng. Archit.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, 2020.
10. Z. Pala, "Using Decomposition-based Approaches to Time Series Forecasting in R Environment," *Int. Conf. Data Sci. Mach. Learn. Stat. - 2019*, vol. 1, no. 1, pp. 231–233, 2019.
11. Z. Pala and A. F. Pala, "Comparison of ongoing COVID-19 pandemic confirmed cases / deaths weekly forecasts on continental basis using R statistical models," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 4, pp. 635–644, 2021.
12. Z. Pala and R. Atici, "Forecasting Sunspot Time Series Using Deep

Learning Methods," *Sol. Phys.*, vol. 294, no. 5, 2019.
13. R. Atici and Z. Pala, "Prediction of the Ionospheric foF2 Parameter Using R Language Forecasthybrid Model Library Convenient Time," *Wirel. Pers. Commun.*, no. doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6 Prediction, pp. 1–20, 2021.
14. Z. Pala, "Comparative study on monthly natural gas vehicle fuel consumption and industrial consumption using multi-hybrid forecast models," *Energy*, vol. 263, no. PC, pp. 1–21, 2023.
15. J. Li, Q. Wu, Y. Tian, and L. Fan, "Monthly Henry Hub natural gas spot prices forecasting using variational mode decomposition and deep belief network," *Energy*, vol. 227, p. 120478, 2021.
16. Z. Pala, "Using forecastHybrid Package to Ensemble Forecast Functions in the R," *Int. Conf. Data Sci. Mach. Learn. Stat. - 2019*, vol. 1, no. 1, pp. 45–47, 2019.
17. Z. Pala and İ. H. Ünlük, "Comparison of hybrid and non-hybrid models in short-term predictions on time series in the R development environment," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 2, pp. 199–204, 2022.
18. Z. Pala and O. Özkan, "Artificial Intelligence Helps Protect Smart Homes against Thieves," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 11, no. 3, pp. 945–952, 2020.
19. S. Dhillon, C. Madhu, D. Kaur, and S. Singh, "A Solar Energy Forecast Model Using Neural Networks: Application for Prediction of Power for Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 112, no. 4, pp. 2741–2760, 2020.
20. Y. Huang, F. Wang, F. Wang, and J. Liu, "DeePar: A Hybrid Device-Edge-Cloud Execution Framework for Mobile Deep Learning Applications," *Infocom 2019 - IEEE Conf. Comput. Commun. Work.*, pp. 892–897, 2019.
21. J. Korstanje, *Advanced Forecasting with Python*. 2021.
22. Y. Di Xu, "Research on Forest Carbon Sequestration Based on FSC Model and DeepAR Algorithm," *J. Math.*, vol. 2022, 2022.
23. J. Zhang, X. Zuo, M. Xu, J. Han, and B. Zhang, "Base Station Network Traffic Prediction Approach Based on LMA -DeepAR," *2021 IEEE 6th Int. Conf. Comput. Commun. Syst. ICCCS 2021*, pp. 473–479, 2021.
24. D. Salinas, V. Flunkert, J. Gasthaus, and T. Januschowski, "DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks," *Int. J. Forecast.*, vol. 36, no. 3, pp. 1181–1191, 2020.
25. M. Dong *et al.*, "Deformation prediction of unstable slopes based on real-time monitoring and deepar model," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 1, pp. 1–18, 2021.

26. S. tuğberk Topallar, “Probabilistic forecasting of multiple time series with single recurrent neural network,” 2022.
27. E. Engineering, A. Physics, E. By, and O. Nordstr, “Multivariate Short-term Electricity Load Forecasting with Deep Learning and exogenous covariates,” 2020.
28. Y. Liao and C. Liang, “A Temperature Time Series Forecasting Model Based on DeepAR,” *2021 7th Int. Conf. Comput. Commun. ICCC 2021*, pp. 1588–1593, 2021.
29. D. Salinas, V. Flunkert, J. Gasthaus, and T. Januschowski, “DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks,” *Int. J. Forecast.*, vol. 36, no. 3, pp. 1181–1191, 2020.

BİYOKOMPOZİTLERİN TERMAL ÖZELLİKLERİ

Ali AVCI[1],
Ayşegül AKDOĞAN EKER[2],
Mehmet Safa BODUR[3]

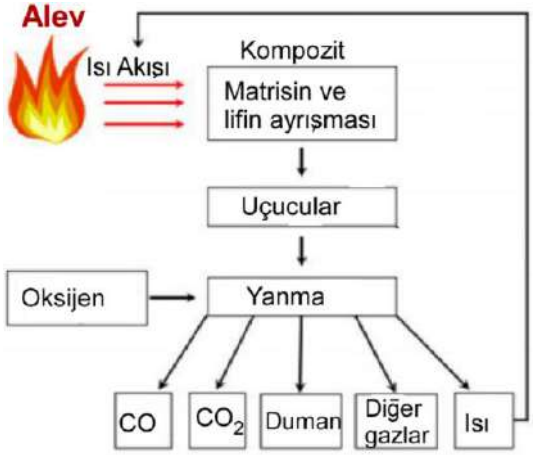
[1]Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
ORCID: 0000-0003-3901-6248
[2]Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID2:0000-0003-0212-9230
[3]Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
ORCID3:0000-0001-5976-0256

Biyokompozitlerin yanma dayanımı

Bilindiği üzere inşaat, uçak, otomotiv, plastik endüstrisi gibi farklı alanlarda lif takviyeli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapıyı desteklemek ve güçlendirmek amacıyla kullanılan takviye lifleri çoğunlukla cam, boron, karbon, aramid gibi insan yapımı malzemelerdir ve düşük yoğunlukta sağladıkları yüksek performans ile oldukça geniş kullanım alanları vardır. Geçtiğimiz son on yıl içerisinde doğal ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen takviye elemanlarının polimer matris içerisinde kompozit malzeme üretimine yönelik çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Çalışmaların ortak gayesi biyobozunabilirliği düşük olan yapay takviyeler yerine biyobozunabilirliği yüksek takviyeler kullanarak, kullanım sonrası çevresel problemlere neden olmayacak yeni kompozit malzemeler geliştirmek ve yenilenebilir kaynakların kullanımına yönelmektir. Biyokompozitler, daha sürdürülebilir yeni malzemeler oluşturmak için biyoesaslı lifleri ve diğer biyoesaslı malzemeleri plastik reçinelerle birleştirir. Biyoesaslı matrisler genellikle, buğday samanı, mısır kabuğu ve soya ve mısır işleme yan ürünleri dahil olmak üzere yenilenebilir kaynaklardan gelir.

Biyokompozitlerin başlıca kısıtları yanmaya ve suya karşı dayanımlarının düşük olmasıdır. Polimer matris genellikle ısıya maruz kaldığında hızla bozunur. Sentetik lif takviyesi, polimerin yüksek sıcaklıklarda ısıl kararlılığını artırabilir, ancak, doğal lifler sentetik liflere göre daha yanıcı olduğundan bu durum biyokompozitlerde geçerli değildir (Fathi vd. 2019; Shah, Prabhakar,ve Song 2017). Şekil 1'de polimer matrisli kompozitlerin yanma aşamaları verilmektedir. İlk olarak kompozit malzeme alevden gelen ısıya maruz kalarak ayrışmaya başlar. Sonra uçucu gazların bazıları reaksiyona girerek atmosferik oksijen ve yanma sürecini daha da ileri götürerek duman ve ısı ortaya çıkarır. Mevcut yangın geciktirici yöntemlerin çoğu yanma sırasında kömür katmanları ekleyerek ısı akışının durdurmayı hedefler. Alev geciktiriciler fiziksel seyreltme, kimyasal etkileşim, soy gaz seyreltme, ısıl söndürme ve koruyucu kaplamalar olmak üzere beş özel mekanizma şeklinde etkili olurlar (Prabhakar, Shah,ve Song 2015). Biyokompozitlerin tutuşabilirliği alev almaya eğilimi yüksek olmasından dolayı kullanım yerine göre alev geciktirici takviyesi güvenlik açısından son derece önemlidir. Polimerlerin ve biyokompozitlerin yanıcılık özellikleri UL 94 yanma, koni kalorimetresi ve sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) gibi çeşitli yanıcılık testleri ile belirlenir (Mochane vd. 2019; Prabhakar vd. 2015). Genel olarak, daha yüksek bir LOI değerine sahip bir malzeme, daha düşük LOI değerine sahip olan malzemeye göre daha düşük bir yanıcılığa sahiptir. Koni kalorimetresi, bir yanma performans testi sırasında malzemenin oksijen tüketimine dayanan bir prensibe dayanır. PLA'nın LOI

değeri %20 iken sıklıkla kullanılan ticari polimerlerin LOI değeri ise %18-26, PVC ve PTFE'nin LOI değerleri ise sırasıyla %47 ve %95 civarındadır (Alfredo Campo 2008). Koni Kalorimetresi, birim alandaki ısı yayma hızı, açığa çıkan toplu ısı, etkin yanma ısısı, tutuşma süresi, kütle kaybı oranı ve duman karartması gibi temel yangın özelliklerini belirlemek için kullanılır. Diğer önemli tespitleri ise tutuşmanın hızı, alev yayılma hızı, çıkan gazların zehirliliği ve üretilen duman miktarıdır. Genellikle polimerde gaz kinetiğinin hızı bozunma kinetiğinden daha hızlı olduğundan ısı salınım hızı, gaz kinetikleriyle değil, alevle uçucu maddelerin akış hızıyla kontrol edilir (Van Krevelen ve Te Nijenhuis 2009). Doğal lif takviyeli kompozitlerinin farklı uygulamalarda kullanılması nedeniyle yanıcılık davranışlarının iyileştirilmesi son yıllarda en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Doğal lifler selüloz, hemiselüloz ve linyinden oluştuğu için cam ve karbon lifleriyle karşılaştırıldığında oldukça yanıcıdır. Dahası, poli(vinil klorür) ve politetrafloroetilen gibi önemli miktarda klor veya flor içeren polimerler hariç hem petrol türevli ve hem de biyoesaslı matris malzemelerinin çoğu saf haliyle yanıcıdır. Sıklıkla kullanılan biyopolimer matris olan PLA, mükemmel özelliklere sahiptir, ancak yüksek yanıcılık ve düşük termo-mekanik özellikleri petrol türevli polimerlere alternatif olmasının önünde bir engeldir. Dolayısıyla, hali hazırda kompozitlerde kullanılan sentetik lifler yerine doğal lifler kullanılacaksa yanma dayanımlarının artırılması şarttır. Özellikle otomotiv, havacılık, inşaat, demiryolları ve denizcilik endüstrilerinde yangın düzenlemelerinin sıkı olduğundan bu alanlarda kullanılacak kompozitlerin yanma dayanımı mutlaka artırılmalıdır (Pornwannachai, Ebdon,ve Kandola 2018).



Şekil 1. Polimer kompozitlerin ısıl ayrışması (Shah vd. 2017)

UL-94 (Underwriters Laboratories) testi, plastik malzemelerin tutuşabilirlik oranlarını görsel gözlemlerle belirlemek için laboratuvar ölçekli bir testtir. Testte numune yatay ve dikey olmak üzere iki farklı konumda kola yerleştirilir. Yatay yanma testi esas olarak 30 s boyunca yangın uygulamasından sonra numunenin 100 mm uzunluğundaki yanma oranını ölçer. Dikey yanma testi, dikey konumda tutulan bir numunenin tutuşma ve yanma eğilimi gibi farklı yanma özelliklerini ölçer. Dikey yanma testinde numune 10 s süreyle 20 mm (50 W) aleve maruz bırakılır. İlk uygulamadan sonra yangın çıkması durumunda süre kaydedilir ve ardından 10 s daha alev uygulanır. UL-94 testinde numuneler elde edilen süre değerlerine bağlı olarak V0, V1, V2 olarak sınıflandırılırlar. V0 yanma dayanımı iyi V2 yanma dayanımı düşük malzeme olarak sınıflandırılır (Van Krevelen ve Te Nijenhuis 2009).

Doğal lifler ve polimerler organik malzemelerdir ve kendilerine alev verildiğinde mekanik ve ısıl özellikleri düşer. Doğal lifler her biri farklı sıcaklıklarda bozunan, selüloz, hemiselüloz, pektin, balmumu, linyin gibi yapılardan meydana geldiği için farklı bozunma sıcaklıkları ve ağırlık kaybı gösterirler. Son yıllarda biyokompozitlerin farklı otomotiv parçaları (Li vd. 2020; Wu vd. 2018), yapı malzemelerinde (Joseph vd. 1999; Mohammed vd. 2015) ve havacılık (Balla vd. 2019; Rajmohan, Vinayagamoorthy ve Mohan 2019) uygulamalarda kullanılması nedeniyle yanma dayanımlarının arttırılması en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Doğal lifin selüloz içeriğini azaltarak, kristaliteyi artırarak, kompozitlerin polimerizasyonunu azaltarak veya kompozit yapıya alev geciktirici ilavesi ile biyokompozitlerin yanma direnci iyileştirilebilir (Gholampour ve Ozbakkaloglu 2020). Sıklıkla kullanılan matris malzemesi olan PLA'nın yanıcılığı diğer liflerin çoğuna kıyasla daha yüksek bir LOI değerine sahiptir, yani daha fazla oksijen gerektirdiğinden tutuşması zordur. Alev geciktiriciler tutuşmayı geciktirmek, yanma sürecini yavaşlatmak, duman oluşumunu azaltmak ve hatta malzemenin kendi kendine sönmesini sağlayarak suretiyle hayati bir işlevi yerine getirirler. Bu nedenle, sadece yangının başlama riskini değil, aynı zamanda yangının yayılma riskini de azalttıklarından olası bir durumda insanların kaçması için zaman tanırlar. Alev geciktirici seçimi, kullanılan matris malzemesinin türüne ve kompozitin üretim yöntemine bağlıdır. Doğal lifler de yaygın olarak kullanılan, yoğunlaştırılmış fazda işlev gören ve lif yapısını kömüre dönüştüren fosfor ve nitrojen esaslı alev geciktiricilerdir. Termoplastik polimerler için en yaygın olarak kullanılan alev geciktiriciler ise, nanokiller, metal hidroksitlerdir (alüminyum hidroksit/magnezyum hidroksit), grafit, amonyum polifosfattır. Metal hidroksitler, yüksek sıcaklıklarda ekzotermik reaksiyonlara girerek, yangın oluşmasını yavaşlatan buhar salınımı yaparlar. Metal hidroksitlerin yüksek

yüklemelerde kullanılması gerekir ve genellikle mekanik özellikler üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Fosfat esaslı sistemler, polimerin ayrışmasına müdahale eder ve kömür oluşumunu destekler. Alev geciktirici kaplamalar, bir bariyer kaplama görevi görerek yanmayı yavaşlatırlar. Yanma esnasında şişen kaplamalar, ısıl olarak işlev gören karbonlu bir tabaka oluşturur (Koronis ve Silva 2018). Katkı maddesi, alev geciktiriciler genellikle ABS plastikler, polikarbonatlar, yüksek etkili polistiren, poliolefinler, poliamidler veya polibütilen tereftalat gibi termoplastiklere uygulanır. Bileşenlerin doğrudan karıştırılmasıyla veya alev geciktirici bir masterbatch ile karıştırılarak eklenirler. Reaktif alev geciktiriciler genellikle bir reçine öncüsü ile kimyasal bir reaksiyonla eklenir. Genellikle epoksi, poliüretan gibi termoset plastikler için kullanılırlar (Höfer 2012). Biyokompozitlerin ısıl özellikleri, polimer malzeme tipine, lif-matris ara yüzey bağının kuvvetine, lifin kompozit yapıdaki ağırlıkça yüzdesine ve lifin şekline bağlıdır.

Tablo 1. Doğal liflerin ve cam lifinin ısıl bozunma sıcaklıkları (Asim vd. 2020; Barkoula vd. 2008; Monteiro vd. 2012; Poletto, Ornaghi Jnior,ve Zattera 2015; Zakikhani vd. 2016)

Lif Türü	Başlangıç Bozunma Sıcaklığı (°C)	Isıl Bozunma Sıcaklığı (°C)
Keten	200	310-323
Selüloz	290	300-367
Hint keneviri	215-262	340-365
Hindistan cevizi	228	384
Kenevir	250	390
Sisal	209	345-347
Rami	221	357
Kenaf	229-238	364
Pamuk	232	330
Ananas	128	320-344
Cam	586	--

Tablo 1'de görüldüğü üzere, doğal liflerin ısıl bozunma başlangıç sıcaklıkları yaklaşık olarak 200 °C'den başlar ve 310-390 °C arasında azami ısıl bozunma sıcaklığına ulaşırlar. Cam lifinin ısıl bozunma sıcaklığı doğal liflere göre çok daha yüksek olup 500 °C'nin üzerindedir. Doğal liflerin ısıl bozunması 50–100 °C arasında nemin uzaklaşması, 200–300 °C arasında hemiselülozun ayrışması ve 400–500 °C arasında linyin ve selüloza bağlı kilo kaybının meydana gelmesi şeklindedir. Bazen lif içerisinde çok düşük oranda nem olduğundan ilk aşama görülmeyebilir. Tablo 2'de biyokompozitlerde sıklıkla

kullanılan polimer matrislere ait farklı kaynaklardan derlenen camsı geçiş, erime sıcaklıkları ve LOI değerleri verilmektedir. İlave edilen doğal liflerin ısıl bozunma başlama sıcaklığı polimer matrislerden düşük olduğundan, biyokompozitlerin içerisindeki doğal lif takviye miktarı arttıkça ısıl kararlılığı azalır ve ısıl bozunması da artar (Ali vd. 2018). Netnapa ve arkadaşları (Netnapa vd. 2016), PLA/kenaf biyokompozite fosfor esaslı halojen içermeyen alev geciktirici (NP-100) ilave etmişlerdir. NP-100 alev geciktirici ilavesi ile PLA matrisin tutuşabilirliği iyileşirken kompozitlerin eğme dayanımının ve eğme modülünün azaldığı belirtilmiştir. Kandola ve arkadaşları (Baljinder K. Kandola, Pornwannachai,ve Ebdon 2020), PLA/keten ve PP/keten kompozitler hazırlamadan önce doğal liflere amonyum sülfamat, amonyum bromür, guanidin dihidrojen fosfat, bir fosfor ve nitrojen içeren organofosfat ve son olarak guanilüre metilfosfonat olmak üzere 4 farklı alev geciktirici işlem uygulamışlar. Yapılan UL-94 testi sonuçlarına göre tüm alev geciktirici uygulamaları PLA/keten kompozitin yanma dayanımını artırarak V2'den V0'a düşürmüştür. Ancak, PP/keten kompozitte sadece organofosfonat alev geciktirici ile V0 değeri elde edilebilmiştir. PLA/keten kompozitte, ketenin dehidrasyon ayrışması esnasında açığa çıkan su, PLA'yı hidrolize edip daha az yanıcı malzeme üretilmesini sağlayarak PLA'nın ayrışmasını ve alevlenebilirliğini yavaşlatmıştır. Alev geciktirici ilavesi ile PP matrisin ısı yayımı %30 oranında azalmıştır. Matris malzemelerinin TGA grafiklerinde alev geciktirici ilavesi ile kütle kaybının ve bozunma sıcaklığının arttığı görülmektedir.

Genellikle, yanma geciktiriciler, kompozit üretiminden evvel eriyik termoplastik matrise ilave edilir. Alternatif yöntem ise yanma geciktiricilerin liflere uygulanmasıdır. Tekstil uygulamasında kullanılan geleneksel yöntem, kumaşların ped / kuru sertleştirme tekniği kullanılarak yangın geciktirici solüsyonlar ile işlenebilir. Bu yöntem, liflere ve kumaşlara alev geciktiriciler uygulamak için yaygın olarak kullanılan tekstil terbiye işlemlerinden biridir. İşlemde, lifler veya kumaşlar alev geciktirici çözeltiye batırılır, ardından fazla çözeltiyi sıkıştırmak için silindirlerden geçirilir. Sonrasında, lifler veya kumaşlar çözücüyü buharlaştırmak için bir fırında kurutulur. Alev geciktirici ile arasında daha yüksek bir etkileşim elde etmek için lifler veya kumaşlar 1–3 dakika süreyle daha yüksek sıcaklıkta (genellikle 160–180 ° C) başka bir fırında kurutulur(Pornwannachai, Ebdon,ve Kandola 2020).

Tablo 2. Polimerlerin oksijen sınır endeksleri (LOI) ve geçiş sıcaklıkları (Alfredo Campo 2008; Avci, Eker ve Bodur 2020; Bhattacharyya, Subasinghe ve Kim 2015; Gholampour ve Ozbakkaloglu 2020; Van Krevelen ve Te Nijenhuis 2009; Lin, Lou ve Lin 2017; Liu, Ran ve Gu 2019; Mochane vd. 2019; Tawiah vd. 2019; Van De Velde ve Kiekens 2002; Wu vd. 2009; Yu vd. 2019)

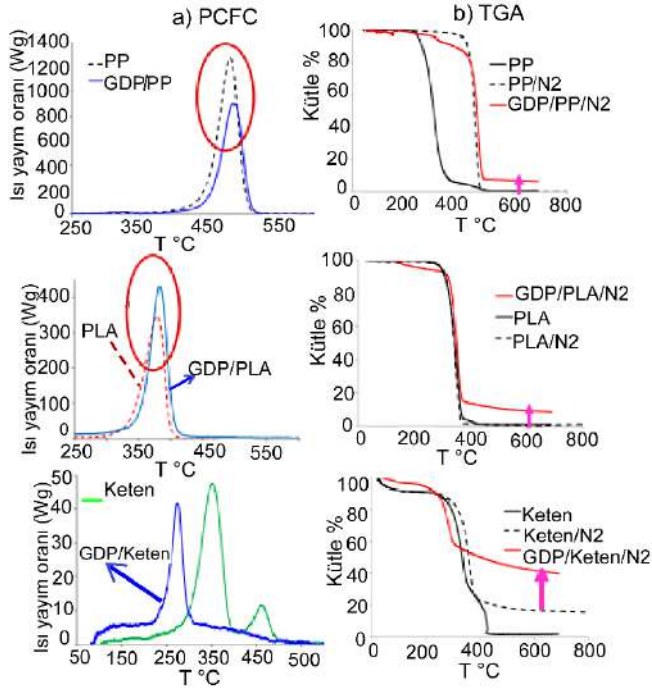
Polimer Malzeme	Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) (°C)	Erime Noktası (T_m) (°C)	LOI (%)
PLA	45-60	150-162	20-32
PLA+%25 keten	63.9	155	28
PLLA	55-65	170-200	---
PHB	5-15	168-182	31
TPU	-10-(-50)	145	Yanıcı
Nişasta	60	110-115	23
Epoksi	70-167	--	23
ABS	122	190-270	25
ABS+%30 cam	122	190-270	28
Naylon 6/6,	50	250-269	20-29
Polietilen	120	110	17.4
Polipropilen	-15	160-176	17.4-18.6
Polistiren	95	--	18.3
Polikarbonat	150	100-110	25-27
PVC	87	100-260	37-47

İnorganik, organofosfor, nitrojen esaslı ve halojen esaslı olmak üzere dört ana alev geciktirici kimyasal vardır. Bununla birlikte, geleneksel alev geciktiricilerin çoğu, üretim, uygulama, yanma sırasında ve imha edildiği esnada çevresel zehirli tehditler oluşturmaktadır. Sonuç olarak, daha çevre dostu alev geciktirici katkılılar veya yangına dayanıklı sistemler bulmak için yeni yollar aranmaktadır. Örneğin, yeni inorganik esaslı, nano killer ve zehirli olmayan yeşil kimyasal katkılar üzerine çalışmalar devam etmektedir. Çoğu durumda, alev geciktirici malzemelerin kullanılması kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Bu nedenle, yapılan çalışmalar genelde alev geciktiricinin oranın optimize edilerek ilave edilmesi yönündedir. Alev geciktirici olarak kullanılan borlu bileşikler zehirli gaz salınımı yapmadıkları ve doğal kaynaklardan elde edildikleri için çevre dostudurlar. Borlu bileşikler, yanma sırasında polimer zincirin oksidasyonunu engelleyen camsı bir tabaka oluşturarak, polimerin oksijen ile temasını keserler. Böylece yanmanın oluşmasını engellerler (Kiliaris ve Papaspyrides 2014). Bor bileşikleri (çinko borat, amonyum borat, metal boratlar veya boraks) ve silikon (silikalar ve organosilanlar) camsı bir bor veya silikat bariyeri oluşturur (Sienkiewicz ve

Czub 2020). Bor bileşikleri özellikle çinko borat polimerik malzemelerin yanma dayanımının artırılmasında kullanılan inorganik bir katkı maddesidir. Genellikle oksitler ve su, $(x)ZnO\cdot(y)B_2O_3\cdot(z)H_2O$'nun bir kombinasyonu olarak tasvir edilirler ve çok farklı bor bileşiği vardır. Ancak, bunların çok azı polimerde alev geciktirme etkinliği ve ısıl kararlılık sağlar. Özellikle kömür oluşumunu sağlayan, duman ve parlama önleyici olarak da işlev gören çinko borat alev geciktirici olarak en çok kullanılan bor bileşiklerinden birisidir. Bor bileşikleri sadece alev geciktirici veya duman bastırıcı olarak değil aynı zamanda, korozyon önleyici, aşınmaya karşı dayanım artırıcı, zirai gübre ve temizlik ürünü olarak farklı alanlarda kullanılır (Kiliaris ve Papaspyrides 2014). Borik asit ve bor oksit, yanıcı uçucuları da seyrelten bir soğutucu görevi görür. Ayrıca bor oksit (B_2O_3), alttaki malzemeyi daha da koruyan yüzeysel bir bariyer oluşturur. Ayrıca, polimerlere eklenen ve yangın gazlarının etkisi altında radikal tuzaklar olarak hareket eden serbest bırakan dolgu maddeleri de vardır. Aynı zamanda, yanıcı ve zehirli gaz halindeki yanma ürünlerinin ve ayrıca yanma hızını ve sıcaklığı azaltan oksijenin seyrelmesine neden olan büyük miktarlarda yanıcı olmayan gazların (örnek; N_2, NH_3, SO_2 veya CO_2) salınması da faydalıdır. Bir malzemenin ısı kapasitesini artıran dolgu maddeleri de örneğin, antimon, çinko veya demir oksitler ilavesi yanma dayanımı artırır. Doğal lif takviyeli kompozitlerin yanmazlık özellikleri ve yanma hızları UL 94 koni kalorimetresi ve sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır.

Netnapa vd. (Netnapa vd. 2016), PLA/kenaf biyokompozite fosfor bazlı halojen içermeyen alev geciktirici (NP-100) ilave etmişlerdir. NP-100 alev geciktirici PLA matrisin tutuşabilirliği iyileştirirken kompozitlerin eğilme mukavemetini ve eğilme modülünü düşürmüştür. Kandola vd. (Kandola vd., 2020), PLA/keten ve PP/keten kompozitler hazırlamadan önce doğal liflere amonyum sülfamat, amonyum bromür, guanidin dihidrojen fosfat, bir fosfor ve nitrojen içeren organofosfat ve son olarak guanilüre metilfosfonat olmak üzere 4 farklı alev geciktirici işlem uygulanmışlar. Yapılan UL-94 testi sonuçlarına göre tüm alev geciktirici uygulamaları PLA/keten kompozitin yanma dayanımını artırarak V2'den V0'a düşürmüştür. Ancak, PP/keten kompozitte sadece organofosfonat alev geciktirici ile V0 değeri elde edilebilmiştir. PLA/keten kompozitte, ketenin dehidrasyon-ayrışması esanasında açığa çıkan su, PLA'yı hidrolize edip daha az yanıcı malzeme üretilmesini sağlayarak PLA'nın ayrışmasını ve alevlenebilirliğini yavaşlatmıştır. Şekil 2'de organofosfat alev geciktiricinin PLA, PP ve ketenin hava ve azot ortamında (N_2) yapılan TGA ve piroliz deneylerinin sonuçları verilmektedir. Alev geciktirici ilavesi ile PP matrisin ısı yayım oranı %30 oranında azalmıştır. PLA'da küçük

bir artış varken ve ketende yaklaşık %10 azalma görülmüştür. Matris malzemelerinin TGA grafiklerinde alev geciktirci ilavesi ile kütle kaybının ve bozunma sıcaklığının arttığı görülmektedir. Zhang vd. (Zhang vd. 2018), Demir fosfat ile modifiye edilen keten lifini PLA matrise ilave ederek yanma dayanımı artırılmış kompoz malzemeler üretmişler. Biyokompozitin yanma testi sonuçlarında LOI değerini %26 ve V2 yanma derecesine sahipken alev geciktirici ilave edildikten sonra, Biyokompozitin LO değeri %16 ve %21 oranında düşmüştür. Alev geciktirici biyokompozitlerin termal ayrışması sırasında yanıcı gaz salınımını azaltmış ve yanma dayanımlarını artırmıştır. Modifiye edilmiş biyokompozit, UL-94 testinde V-0 derecesini geçmemiş olsa dahi, bu çalışma, biyokompozitin yüksek performanslı alev geciktirici ile yanma dayanımının artıdığını göstermiştir. Tek keten lifinin T_{max} bozunma sıcaklığı demir fosfat ile yıkanmış life göre daha yüsek iken PLA/demir fosfat keten kompozitin yanma dayanımı PLA/keten kompozitne göre iyileşmiştir. Saf PLA'nın yanma testi sonrası değeri LOI değeri %20 olarak bulunmuştur. Ayrıca PLA/keten kompozitin LOI değeri ise çok az bir azalma ile %19.1 olarak ölçülmüştür.



Şekil 2. Organofosfat alev geciktiricinin kompozitlerin TGA ve piroliz akış kalorimetrisi sonuçları (Kandola vd., 2020).

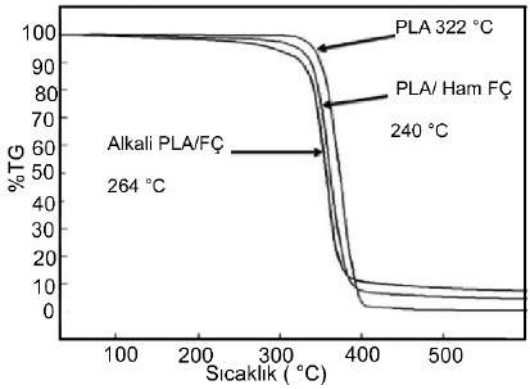
Biyokompozitlerin termal analiz ve diferansiyel tarama kalorimetri sonuçları

Biyokompozitlerin termal davranışları genelde termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ve diferansiyel termal analiz (DTA) gibi yöntemler ile tesbit edilir. Biyokompozitin TGA analizi ile lifin ve polimerin bozunma sıcaklığı, sıcaklıkla ilgili ağırlık kaybı ve azami sıcaklıkla ısıtıldıktan sonra kalan kalıntı malzeme miktarının ağırlığı ile belirlenir. DSC analizi ile biyokompozitin erime, camsı geçiş ve kristalleşme sıcaklığı ve kristalite oluşumu hakkında bilgi sağlar. DTA yöntemi, ısıtma veya soğutma sırasında, kompozit ve bir referans malzeme arasındaki sıcaklık farkını ve kompozitin hal değişimi veya kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan enerji değişimlerini belirler. TGA analizi sonrasında lif takviyeli kompozitlerde üç aşamada bozunma gözlemlenir. İlk olarak 50-100 °C (Siakeng vd. 2018) nemin uzaklaştırılmasından dolayı oluşan nem kaybı, ikincisi takviyenin bozunması nedeniyle ağırlık kaybı ve polimer matrisin de-polimerizasyonu nedeniyle ağırlık kaybıdır. Biyokompozitlerin termal özellikleri, polimer malzeme tipine, lif-matris ara yüzey bağının kuvvetine, lifin kompozit yapıdaki ağırlıkça yüzdesine ve lifin şekline bağlıdır.Tablo 2'te biyokompozitlerde sıklıkla kullanılan polimer matrislere ait farklı kaynaklardan derlenen camsı geçiş, erime sıcaklıkları ve LOI değerleri verilmektedir. İlave edilen doğal liflerin termal bozunma başlama sıcaklığı polimer matrislerden düşük olduğundan biyokompozitlerin lif miktarındaki artışla termal kararlılığını düşürüp ve termal bozunmasını hızlanır (Ali vd. 2018).

Tablo 3. Polimerlerin oksijen endekslerinin (LOI) sınırlandırılması ve farklı ısı akışında koni kalorimetresi ile elde edilen ısı salım hızları(Alfredo Campo, 2008; Avci vd., 2020; Bhattacharyya vd., 2015; Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020; Lin vd., 2017; Liu vd., 2019; Mochane vd., 2019; Tawiah vd., 2019; Van De Velde & Kiekens, 2002; Van Krevelen & Te Nijenhuis, 2009; Wu vd., 2009; G. Yu vd., 2019).

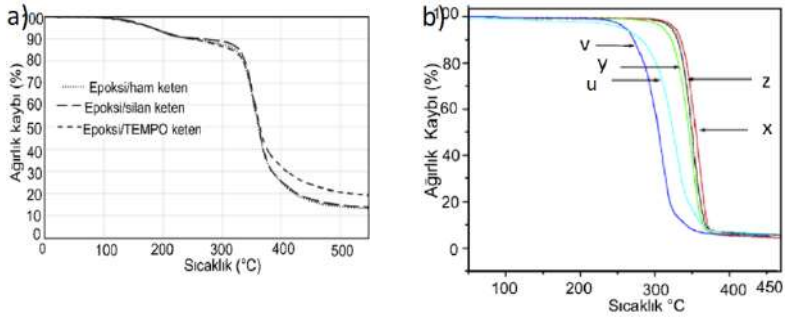
Polimer malzeme	Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) (°C)	Erime noktası (T_m) (°C)	LOI (%)
PLA	45-60	150-162	20-32
PLA+%25 keten	63.9	155	28
PLLA	55-65	170-200	
PHB	5-15	168-182	31
TPU	-10-(-50)	145	Yanıcı
Nişasta	60	110-115	23
Epoksi	70-167	--	23
ABS	122	190-270	25
ABS+%30 cam	122	190-270	28
Naylon 6/6,	50	250-269	20-29
Polietilen	120	110	17.4
Polipropilen	-15	160-176	17.4-18.6
Polisitren	95	--	18.3
Polikarbonat	150	100-110	25-27
PVC	87	100-260	37-47

Gunti vd. (Barkoula vd., 2008), alkali işlemine tabi tutulmuş fil çimeni lifini ve ham fil çimeni lifini PLA içerisine takviye ederek kompozit üretmişlerdir. Şekil 3'te PLA matrisin ve kompozitlerin termal bozunma analizi (TGA) sonuçları verilmektedir. Doğal lif takviyesinin PLA matrisin bozunma sıcaklığını 322 °C'den 265 °C'ye düşürdüğü görülmektedir. Fathi vd.(Fathi vd. 2019), biyoepoksi matrise TEMPO (tetrametilpiperidin-1-oksi radikal aracılı oksidasyon) işlemi uygulanmış keten lifi takviye ederek biyokompozit üretmişler. Üretilen kompozitn TGA sonuçlarına bakıldığında (Şekil 4) 360 °C'nin üzerinde, oksidasyon ve silan muamele edilmiş kompozitin ağırlık kaybının, ham keten takviyeli kompozite göre daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Çalışmada, TEMPO işleminin PLA/keten kompozitin termal davranışından olumsuz etkilenmediğini bildirilmiştir.

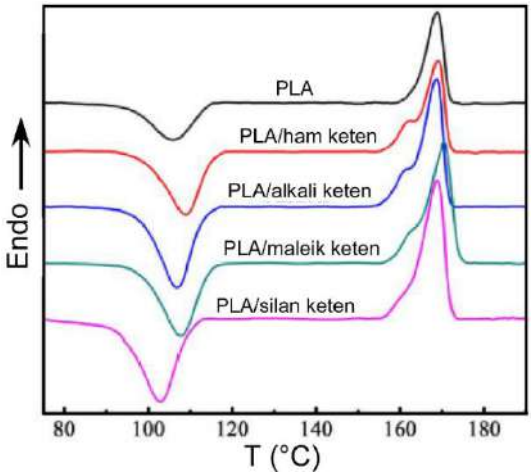


Şekil 3. PLA ve PLA/fil çimeni kompozitlerin TGA verileri (Barkoula vd., 2008).

Yu vd.(Yu vd. 2010), PLA matrise alkali, %1 silan, %2 silan işlenmiş rami lifleri ve ham rami liflerini takviye ederek kompozit üretmişlerdir. Kompozitlerin ve PLA matrisin termal bozunma grafiği Şekil 4 b)'de verilmektedir. PLA'nın termal bozunması tek bir aşamada meydana gelmiş olup ve 328 °C olarak ölçülmüştür. Ham rami takviyeli PLA kompozitin termal bozunma sıcaklığı PLA'nın termal bozunma sıcaklığından daha düşük olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni, kompozitler iki merdaneli değirmen tarafından işlendiğinde PLA'nın moleküler ağırlığının azalması olabilir ve doğal lifin PLA matrise takviye edilirken termal bozunma sıcaklığının etkilemiş olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Kimyasal işlem uygulanmış kompozitin termal bozunma sıcaklığı, işlem uygulanmamış kompozit ile karşılaştırıldığında daha yüksek olarak ölçülmüştür (Yu vd. 2010).



Şekil 4.a)PLA/keten, PLA/silan vePLA/TEMPO kompozitlerin TGA sonuçları (Fathi vd. 2019), **b)** PLA ve PLA esaslı kompozitlerin TGA eğrileri: (u) PLA, (v) PLA/ham rami, (y) PLA/alkali rami, (z) PLA/%1 silan rami ve (x) PLA/%2 silan rami kompozit (Yu vd. 2010).

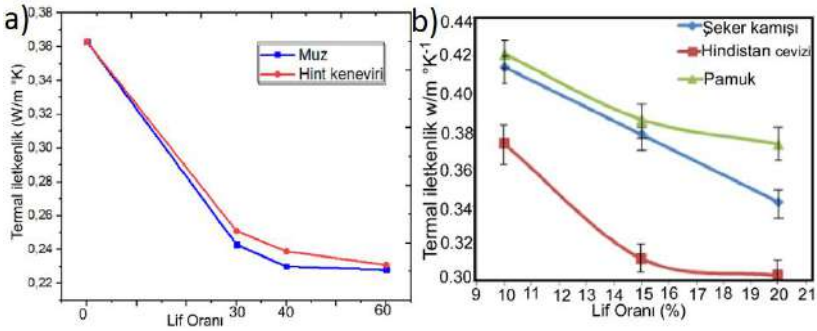


Şekil 5. PLA ve PLA/keten kompozitlerin DSC sonuçları (Xia vd. 2015).

Xia, vd. (Xia vd. 2015), kimyasal işlem uygulanmış ve polimer kaplanmış keten liflerini PLA matrise takviye ederek kompozit üretmişlerdir. Çalışmada silan ilavesi soğuk kirstalleşme sıcaklığı (T_{cc}) sıcaklığını yaklaşık 4 °C azaltırken keten ilaveli diğer kompozitlerin T_{cc} sıcaklığı artmıştır (Şekil 5).

Termal iletkenlik

Termal iletkenlik, bir malzemenin ısı taşıma kabiliyetinin bir ölçüsüdür, sıcaklığın yüksek olduğu bir ortamdan sıcaklığın daha düşük olduğu bir ortama taşınması anlamına gelir. Bu süreç, belirli bir zamanda birim yüzeyden geçen ısı miktarına eşit bir sıcaklık gradyanından etkilenir. Isıl iletkenlik, yoğunluk, gözeneklilik, nem içeriği veya sıcaklıktan etkilenen her malzemenin bir özelliğidir. Bir malzemenin ısı yalıtım kapasitesi, ısıl iletkenliği ile ters orantılıdır. Dolayısıyla bir malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı ≤0,10 W/mK olduğunda ısı yalıtımı için uygun olduğu söylenebilir. Isı yalıtım malzemelerinin kullanımı, otomotiv, inşaat ve paketleme gibi endüstrilerde enerji maliyetlerini düşürmek ve üretim verimliliğini artırmak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Doğal lifler tabiatı gereği lümenlerin içerisinde tuttukları hava boşluğundan dolayı doğal yalıtım malzemeleridir. Böylece, kompozit yapıdaki doğal lif oranının artması termal iletkenliği azaltmaktadır.



Şekil 6. a) Muz ve hint keneviri lifi takviyeli epoksi matrisli kompozitin termal iletkenlik sonuçları, **b)** Şeker kamışı, hindistan cevizi ve pamuk takviyeli biyoeopksi matrisin termal iletkenlik sonuçları

Pujari vd. (Pujari, Ramakrishna ve Balaram Padal 2017), epoksi matrise farklı oranlarda muz ve hint keneviri lifleri takviye edilerek üretilen biyokompozitin termal iletkenlikleri test edilmiştir. Şekil 6 a)'da görüldüğü üzere lif oranının artması termal iletkenliği azaltmıştır. En düşük termal iletkenlik seviyesi %60 muz lifi takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Hassan vd. (Hassan vd. 2020), pamuk, hindistancevizi ve şeker kamışı takviyeli yeşil epoksi matrsili kompozitler üreterek akustik ve termal iletekenlik testleri yapmışlardır. 3 mm'lik bir kompozit kalınlıkla her bir lif için farklı lif hacim fraksiyonları, yani%10, %15 ve%20 kullanılmıştır. Termogravimetrik analiz sonuçları, tüm doğal lif takviyeli kompozitlerin küçük bir ağırlık kaybıyla 300 °C'ye kadar dayanabileceğini göstermiştir. Şekil 6 b)'de hindistan cevizi takviyeli kompozitin termal iletkenliği diğer biyokompozitlere göre çok daha düşüktür. Lif oranı artıkça termal iletkenliği düştüğü görülmektedir. Lif oranı arttıkça ses yutma katsayısının da arttığı tespit edilmiştir. Hindistan cevizi lifi bazlı kompozitler, diğer lif takviyeli kompozitlere göre daha yüksek bir ses yutumu katsayısı gösterir. Pamuk elyaf takviyeli kompozit numunelerin darbe ve eğilme mukavemeti diğer numunelere göre daha yüksektir. Pamuk lifi bazlı kompozitin ısıl genleşme katsayısı da diğer kompozitlerden daha yüksektir.

Sonuç

Biyokompozitler yapı, otomotiv sektörü başta olmak üzere geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Ayrıca, CO_2 salınımı düşürme gereksinimleri, çevre kirliliğinin düşürülmesi, ekonomiklik ve hafiflik gibi üstün özellikleri nedeniyle önümüzde yıllarda uygulama alanlarının daha da genişleyeceği kaçınılmaz bir gerçektir.Ancak, biyokompozitlerin su tutma ve yanmaya karşı dayanımlarının düşük olması doğrudankullanım alanını sınırlamaktadır. Mühendislik uygulamaları için biyokompozitlerin öncelikle yanma dayanımlarının iyileştirilmesi can güvenliği ve insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, farklı biyokompozitler için sıklıkla uygulanan yangın geciktirme yöntemleri ve biyokompozitlerin ısıl özellikleri hakkında kısaca bilgilendirme yapılmıştır.

Teşekkürler

Bu çalışma Ali AVCI'nın doktora tezinden türetilmiştir. Yıldız Teknik Üniversitesi BAP birimi, FDK_3401_2018 numaralı ve Otomotiv Sektöründe Kullanılmak Üzere Çevre Dostu Yeni Nesil Doğal Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi, başlıklı proje ile çalışmayı desteklemiştir.

REFERANSLAR

1. Alfredo Campo, E. 2008. "3 Thermal Properties of Polymeric Materials." *Selection of Polymeric Materials* 103–40. doi: 10.1016/B978-0-8155-1551-7.50005-X.
2. Ali, Azam, Khubab Shaker, Yasir Nawab, Madeha Jabbar, Tanveer Hussain, Jiri Militky, and Vijay Baheti. 2018. "Hydrophobic Treatment of Natural Fibers and Their Composites—A Review." *Journal of Industrial Textiles* 47(8):2153–83. doi: 10.1177/1528083716654468.
3. Anon. n.d. "Thermal Properties of Natural Fiber Sisal Based Hybrid Composites – A Brief Review _ Enhanced Reader.Pdf."
4. Asim, Mohammad, Mohd T. Paridah, M. Chandrasekar, Rao M. Shahroze, Mohammad Jawaid, Mohammed Nasir, and Ramengmawii Siakeng. 2020. "Thermal Stability of Natural Fibers and Their Polymer Composites." *Iranian Polymer Journal (English Edition)* 29(7):625–48.
5. Avci, Ali, Aysegul Akdogan Eker, and Mehmet Safa Bodur. 2020. "Effect of Coupling Agent and Alkali Treatment on Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Flax Fiber-Reinforced PLA Composites." *Green Materials* 1–14. doi: 10.1680/jgrma.20.00062.
6. Balla, Vamsi Krishna, Kunal H. Kate, Jagannadh Satyavolu, Paramjot Singh, and Jogi Ganesh Dattatreya Tadimeti. 2019. "Additive Manufacturing of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Processing and Prospects." *Composites Part B: Engineering* 174(May):106956. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106956.
7. Barkoula, N. M., B. Alcock, N. O. Cabrera, and T. Peijs. 2008a. "Flame-Retardancy Properties of Intumescent Ammonium Poly(Phosphate) and Mineral Filler Magnesium Hydroxide in Combination with Graphene." *Polymers and Polymer Composites* 16(2):101–13. doi: 10.1002/pc.
8. Barkoula, N. M., B. Alcock, N. O. Cabrera, and T. Peijs. 2008b. "Flame-Retardancy Properties of Intumescent Ammonium Poly(Phosphate) and Mineral Filler Magnesium Hydroxide in Combination with Graphene." *Polymers and Polymer Composites* 16(2):101–13. doi: 10.1002/pc.
9. Bhattacharyya, Debes, Aruna Subasinghe, and Nam Kyeun Kim. 2015. *Natural Fibers: Their Composites and Flammability Characterizations*. Elsevier Inc.
10. Fathi, Babak, Mohammadreza Foruzanmehr, Saïd Elkoun, and Mathieu Robert. 2019. "Novel Approach for Silane Treatment of Flax Fiber to Improve the Interfacial Adhesion in Flax/Bio Epoxy Composites."

Journal of Composite Materials 53(16):2229–38. doi: 10.1177/0021998318824643.
11. Gholampour, Aliakbar, and Togay Ozbakkaloglu. 2020. *A Review of Natural Fiber Composites: Properties, Modification and Processing Techniques, Characterization, Applications*. Vol. 55. Springer US.
12. Hassan, Tufail, Hafsa Jamshaid, Rajesh Mishra, Muhammad Qamar Khan, Michal Petru, Jan Novak, Rostislav Choteborsky, and Monika Hromasova. 2020. "Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural Fiberswaste." *Polymers* 12(3).
13. Höfer, R. 2012. *Processing and Performance Additives for Plastics*. Vol. 10. Elsevier B.V.
14. Joseph, Kuruvilla, Romildo Dias Tolêdo Filho, Beena James, Sabu Thomas, and Laura Hecker de Carvalho. 1999. "A Review on Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 3(3):367–79. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p367-379.
15. Kandola, Baljinder K., Wiwat Pornwannachai, and John Russell Ebdon. 2020. "Flax/PP and Flax/PLA Thermoplastic Composites: Influence of Fire Retardants on the Individual Components." *Polymers* 12(11):1–19. doi: 10.3390/polym12112452.
16. Kandola, Baljinder K, Wiwat Pornwannachai, and John Russell Ebdon. 2020. "Flax/PP and Flax/PLA Thermoplastic Composites: Influence of Fire Retardants on the Individual Components." 12. doi: 10.3390/polym12112452.
17. Kiliaris, P., and C. D. Papaspyrides. 2014. *Polymers on Fire*. Elsevier B.V.
18. Koronis, Georgios, and Arlindo Silva, eds. 2018. *Green Composites for Automotive Applications*. 1st ed. Kidlington,: Woodhead Publishing.
19. Van Krevelen, D. W., and K. Te Nijenhuis. 2009. "Product Properties (II)." *Properties of Polymers* (Ii):847–73. doi: 10.1016/b978-0-08-054819-7.00026-1.
20. Li, Mi, Yunqiao Pu, Valerie M. Thomas, Chang Geun Yoo, Soydan Ozcan, Yulin Deng, Kim Nelson, and Arthur J. Ragauskas. 2020. "Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber–Reinforced Composites and Their Applications." *Composites Part B: Engineering* 200.
21. Lin, Ting An, Ching Wen Lou, and Jia Horng Lin. 2017. "The Effects of Thermoplastic Polyurethane on the Structure and Mechanical Properties

of Modified Polypropylene Blends." *Applied Sciences (Switzerland)* 7(12). doi: 10.3390/app7121254.

22. Liu, Yu, Qichao Ran, and Yi Gu. 2019. "Preparation and Properties of Benzoxazine Blends with Intumescent Flame Retardancy." *Polymer Degradation and Stability*163:15–24.
23. Mochane, M. J., T. C. Mokhena, T. H. Mokhothu, A. Mtibe, E. R. Sadiku, S. S. Ray, I. D. Ibrahim, and O. O. Daramola. 2019. "Recent Progress on Natural Fiber Hybrid Composites for Advanced Applications: A Review." *Express Polymer Letters* 13(2):159–98.
24. Mohammed, Layth, M. N. M. Ansari, Grace Pua, Mohammad Jawaid, and M. Saiful Islam. 2015. "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications." *International Journal of Polymer Science* 2015. doi: 10.1155/2015/243947.
25. Monteiro, Sergio N., Veronica Calado, Rubén Jesus S. Rodriguez, and Frederico M. Margem. 2012. "Thermogravimetric Behavior of Natural Fibers Reinforced Polymer Composites-An Overview." *Materials Science and Engineering A*557:17–28. doi: 10.1016/j.msea.2012.05.109.
26. Netnapa, E., M. Mariatti, Z. A. A. Hamid, M. Todo, and L. Banhan. 2016. "Dielectric Breakdown Strength and Flammability Properties of Flame Retardant Filler/PLLA-PLA Microsphere/Kenaf Fiber Composites." *Procedia Chemistry*19:290–96. doi: 10.1016/j.proche.2016.03.010.
27. Poletto, Matheus, Heitor L. Ornaghi Jnior, and Ademir J. Zattera. 2015. *Thermal Decomposition of Natural Fibers: Kinetics and Degradation Mechanisms*.
28. Pornwannachai, W., J. R. Ebdon, and B. K. Kandola. 2018. "Fire-Resistant Natural Fibre-Reinforced Composites from Flame Retarded Textiles." *Polymer Degradation and Stability*. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.019.
29. Pornwannachai, Wiwat, John Russell Ebdon, and Baljinder K. Kandola. 2020. "Fire-Resistant Flax-Reinforced Polypropylene/Polylactic Acid Composites with Optimized Fire and Mechanical Performances." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 33(7):898–914. doi: 10.1177/0892705718815538.
30. Prabhakar, M. N., Atta Ur Rehaman Shah, and Jung-Il Song. 2015. "A Review on the Flammability and Flame Retardant Properties of Natural Fibers and Polymer Matrix Based Composites." *Composites Research* 28(2):29–39. doi: 10.7234/composres.2015.28.2.029.

31. Pujari, Satish, Avasarala Ramakrishna, and Korabu Tulasi Balaram Padal. 2017. “Investigations on Thermal Conductivities of Jute and Banana Fiber Reinforced Epoxy Composites.” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D* 98(1):79–83.
32. Rajmohan, T., R. Vinayagamoorthy, and K. Mohan. 2019. “Review on Effect Machining Parameters on Performance of Natural Fibre–Reinforced Composites (NFRCs).” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 32(9):1282–1302. doi: 10.1177/0892705718796541.
33. Shah, Atta Ur Rehman, M. N. Prabhakar, and Jung Il Song. 2017. “Current Advances in the Fire Retardancy of Natural Fiber and Bio-Based Composites – A Review.” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 4(2):247–62. doi: 10.1007/s40684-017-0030-1.
34. Siakeng, R., M. Jawaid, H. Ariffin, and S. M. Sapuan. 2018. “Thermal Properties of Coir and Pineapple Leaf Fibre Reinforced Polylactic Acid Hybrid Composites.” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 368. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 239th ECS Meeting.
35. Sienkiewicz, Anna, and Piotr Czub. 2020. “Flame Retardancy of Biobased Composites—Research Development.” *Materials* 13(22):1–30. doi: 10.3390/ma13225253.
36. Tawiah, B., B. Yu, S. Ullah, R. Wei, R. K. K. Yuen, J. H. Xin, and B. Fei. 2019. “Flame Retardant Poly(Lactic Acid) Biocomposites Reinforced by Recycled Wool Fibers - Thermal and Mechanical Properties.” *Express Polymer Letters* 13(8):697–712. doi: 10.3144/expresspolymlett.2019.59.
37. Van De Velde, K., and P. Kiekens. 2002. “Biopolymers: Overview of Several Properties and Consequences on Their Applications.” *Polymer Testing* 21(4):433–42. doi: 10.1016/S0142-9418(01)00107-6.
38. Wu, Kun, Yuan Hu, Hongdian Lu Lei Song, and Zhengzhou Wang. 2009. “Flame Retardancy and Thermal Degradation of Intumescent Flame Retardant Starch-Based Biodegradable Composites.” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 48(6):3150–57. doi: 10.1021/ie801230h.
39. Wu, Yingji, Changlei Xia, Liping Cai, Andres C. Garcia, and Sheldon Q. Shi. 2018. “Development of Natural Fiber-Reinforced Composite with Comparable Mechanical Properties and Reduced Energy Consumption and Environmental Impacts for Replacing Automotive Glass-Fiber Sheet

Molding Compound." *Journal of Cleaner Production*184:92–100. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.257.

40. Xia, Xuelian, Wentao Liu, Liyong Zhou, Hao Liu, Suqin He, and Chengshen Zhu. 2015. "Study on Flax Fiber Toughened Poly (Lactic Acid) Composites." *Journal of Applied Polymer Science* 132(38):1–10. doi: 10.1002/app.42573.
41. Yu, Guomin, Meng Song, Shuyan Jiao, Xu Jia, and Yinghua Li. 2019. "Flame Retardancy of Thermoplastic Polyurethane Using Phosphorus-Containing Flame Retardants." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 585(1). doi: 10.1088/1757-899X/585/1/012038.
42. Yu, Tao, Jie Ren, Shumao Li, Hua Yuan, and Yan Li. 2010. "Effect of Fiber Surface-Treatments on the Properties of Poly(Lactic Acid)/Ramie Composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41(4):499–505. doi: 10.1016/j.compositesa.2009.12.006.
43. Zakikhani, Parnia, Rizal Zahari, Mohamed T. H. Sultan, and Dayang L. Majid. 2016. "Thermal Degradation of Four Bamboo Species." *BioResources* 11(1):414–25. doi: 10.15376/biores.11.1.414-425.
44. Zhang, Lu, Zhi Li, Ye Tang Pan, Adriana Pérez Yáñez, Shuang Hu, Xiu Qin Zhang, Rui Wang, and De Yi Wang. 2018. "Polydopamine Induced Natural Fiber Surface Functionalization: A Way towards Flame Retardancy of Flax/Poly(Lactic Acid) Biocomposites." *Composites Part B: Engineering*154:56–63. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.07.037.

ENDÜSTRİYEL NANOMALZEMELER: KARAKTERİZASYON, BİYOLOJİK AKTİVİTE VE YASAL DÜZENLEMELER

Dr. Öğr. Üyesi Ceyda ÖKSEL KARAKUŞ

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi,
Biyomühendislik Bölümü, İzmir, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5282-4114

1. Giriş

Nano boyutlu malzemeler tabiatın varoluşundan bu yana doğada bulunmalarına rağmen, mühendislik ürünü olarak üretimlerinin temeli ünlü fizikçi Richard Feynman'ın 1959 yılında Amerikan Fizik Cemiyeti'nin toplantısında yaptığı "Aşağıda Daha Çok Yer Var (Ing. There's Plenty of Room at the Bottom)" başlıklı konuşmasıyla atılmıştır (Feynman, 1960). Feynman'ın atom ve molekül boyutunda imalat yapılabileceğine ve bunun insanlık tarihine yön verebilecek pek çok keşfin ilk nüvelerini oluşturacağına ilişkin öngörüleri, 1974 yılında Japon bilim insanı Norio Taniguchi'nin nanoteknoloji terimini ilk kez kullanmasıyla somut bir bilimsel alana dönüşmüş ve 1986 yılında Eric Drexler tarafından çeşitli kitap isimlerinde ("Keşif Motorları: Nanoteknolojinin Yaklaşan Devri", "Nanosistemler: Moleküler Mekanizmalar, Üretim ve Hesaplama") kullanılmasıyla popülerlik kazanmıştır (Stix, 2001). Takip eden yıllarda, maddelerin atomik ya da moleküler düzeyde işlenmesi sonucu insan yaşamını kolaylaştıran ve iyileştiren yeni malzemeler üretilmiş ve bu malzemeler pek çok endüstriyel alanda kullanım için özelleştirilmiştir. 2015 yılında yayınlanan tüketici ürünleri envanterinde (Vance vd., 2015) piyasada %42'si sağlık kategorisinde olmak üzere 1814 nanomalzeme bulunduğu rapor edilmiş olsa da güncel kaynaklar bu sayının 5000'nden fazla olduğunu işaret etmektedir (https://nanodb.dk/ en/, Erişim Tarihi:10.09.2022). Çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan nanomalzeme grupları ve spesifik kullanım alanları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Yaygın olarak kullanılan endüstriyel nanomalzemeler

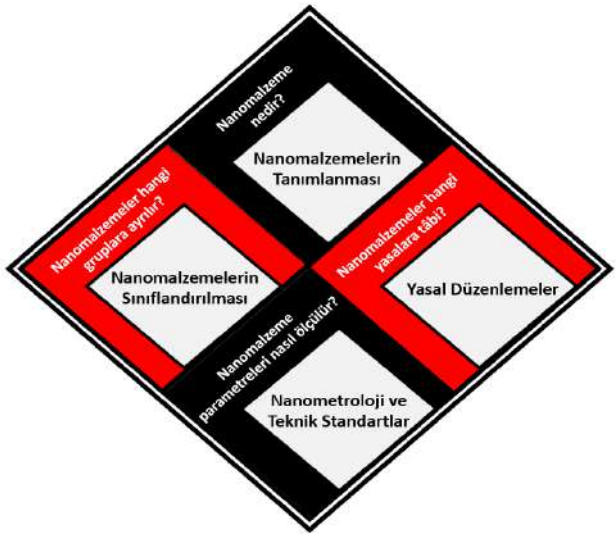
Nanomalzeme	***Endüstri***	***İşlev***
Metalik ve polimerik nanomalzemeler,	Gıda	Gıda güvenliği, işleme ve paketleme
Karbon nanotüp, dendrimerler, Nano-gümüş, Nano-altın	İlaç	Yeni ilaç/aşı geliştirme, kontrollü ilaç salım sistemleri
Polimerik, Manyetik ve Metalik nanomalzemeler, Karbon nanotüp	Biyomedikal	Doku mühendisliği, implant, biyogörüntüleme, biyosensör
Karbon nanotüp, Nanolif, Nano-gümüş, Manyetik nanomalzemeler	Çevre	Endüstriyel atık suların temizlenmesi ve organik kirleticilerin biyodegredasyonu
Kil, Metalik nanomalzemeler, Karbon nanotüp, Nanolif	Tekstil	Antimikrobiyal, kir tutmayan, UV-korumalı kumaşlar
Karbon nanotüp, Nano-gümüş, Nano-çinko, Nano-demir	Tarım	Pestisit ve gübre formülasyonları geliştirme
Nanogümüş, Nano-altın, Nano-titanyum dioksit, Nano-çinko oksit	Kozmetik	Güneş kremlerinde ve kozmetik ürünlerde koruyucu madde
Nano-silika, Nano-titanyum, Nano-alüminyum, Kil, Karbon nanotüp	İnşaat	Fotokatalitik, kendini temizleyen beton ve boyalar
Kuantum noktaları, Karbon nanotüp, Nano-gümüş	Elektronik	Transistörler, manyetik bellek, akıllı telefonlar, yüksek çözünürlüklü ekranlar
Karbon siyahı ve seramik nanotoz, Nano-bakır, Nano-alüminyum, Nano-paladyum	Otomotiv	Otomotiv parçaları, lastik üretimi, temiz egzoz, yakıt katkı maddeleri, yüzey kaplama
Nano-alüminyum, Nano-kadmiyum, Nano-bakır, Karbon nanotüp	Enerji	Gelişmiş piller, güneş hücreleri

Giderek yaygınlaşan kullanımlarına karşın, nanomalzemelere uzun süreli maruziyetin neticesinde oluşabilecek sağlık problemlerinin ne zaman, nerede ve nasıl test edilmesi ve bu testlerin hangi mevzuatlara tabi tutulması gerektiğine yönelik yaygın olarak kabul görmüş ilkeler bulunmamaktadır. Bu malzemelerin canlılar ve çevre üzerindeki olumsuz ve çoğunlukla benzersiz etkilerine yönelik endişeler yaklaşık 20 yıldır dile getiriliyor olmasına rağmen, pazarda bulunan nano-yapılı ürünlerin %70'inden fazlasının içeriğine ilişkin teknik bilgiler (parçacık boyutu, morfoloji, konsantrasyon vb.) üreticileri tarafından sunulmamaktadır ve bu durum hızla gelişen nanoteknoloji alanındaki düzenlemelere ilişkin önemli sıkıntı ve belirsizliklere neden olmaktadır(Vance vd., 2015).

Bu bölümde nanomalzemelere ilişkin kavramsal ve yönetimsel belirsizlikler, üretim ve karakterizasyon süreçlerine ilişkin teknik zorluklar ve nanomalzemelere uzun süreli maruziyetin olası etkileri ele alınacak ve nihayetinde bu olumsuzlukların giderilmesi için atılması gereken adımlar üzerinde durulacaktır.

2. Nanomalzemelere İlişkin Belirsizlikler

Nanomalzemelere ilişkin uzun süredir bilinen ancak henüz üzerinde fikir birliğine varılamayan belirsizlikler dört ana başlıkta toplanabilir: tanımlama, sınıflandırma, nanometroloji ve yasal düzenlemeler (Şekil 1). Nanoteknoloji ile ilgili süregelen bu belirsizlikler alanda üretilen bilginin kollektif kullanımını ve nano-ölçekte gerçekleşen olayların izahını önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Tüm bu belirsizliklerin giderilmesi, alanın sürdürülebilir biçimde gelişimi ve üstün özellikler taşıyan nanomalzemelerden farklı sektörlerde maksimum verimle faydalanılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Nanomalzemelere ilişkin belirsizlikler

2.1. Nanomalzemelerin tanımlanması

Nanomalzemelere ilişkin belirsizlikler nasıl tanımlanmaları gerektiği ile başlar. Yaygın olarak kullanılan tanımların pek çoğu nano ölçeği (1-100 nm) işaret ediyor olsa da nanomalzemelere ilişkin yasal mevzuatların doğru uygulanabilmesi ancak bir malzemenin ne zaman '*nanomalzeme*' olarak kabul edilebileceğine ilişkin kriterlerin açık ve net olarak belirlenmesi ile mümkündür.

2011 yılında Avrupa komisyonu nanomalzemelerin "Bağlanmamış halde, agrega veya aglomera partiküller içeren ve sayı boyutu dağılımındaki partiküllerin en az %50'sinin 1-100 nm aralığında en az bir dış boyuta sahip olduğu doğal, tesadüfi veya imal edilmiş malzemeler" olarak tanımlanmasını önermiştir (Rauscher, Sokull-Klüttgen, & Stamm, 2012). Yaklaşık 10 yıl süren revizyon sürecinin sonrasında nanomalzemelerin tanımlanmasına ilişkin yeni bir komisyon tavsiyesi yayınlanmış(Hansen vd., 2022) ve bir malzemenin nanomalzeme olarak tanımlanabilmesi için içerisinde bulunan nanopartiküllerin %%50'sinin aşağıda sıralanan üç koşuldan birini sağlamasının yeterli olacağına karar verilmiştir:

- En az bir dış boyutun 1-100 nm aralığında olması,
- Çubuk, fiber veya tüp şekline sahip olması ve en az iki boyutu 1 nm'den küçükken diğer boyutunun 100 nm'den büyük olması,
- Plaka benzeri bir şekle sahip olması ve bir boyutu 1 nm'den küçükken diğer boyutlarının 100 nm'den büyük olması.

Bununla birlikte spesifik yüzey alanının hacme oranı 6 m^2cm^{-3}'den küçük olan malzemeler kapsam dışı tutulmuştur. Tanımlarını temel olarak nanomalzemelerin dış boyutlarına dayandıran Avrupa Komisyonu'nun aksine, Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO) nanomalzemelerin iç yapılarını da dahil ederek nanomalzemeleri "en az bir dış boyutu 1-100 nm aralığında olan VEYA nano-ölçekli iç yapıya veya yüzey yapısına sahip olan malzemeler" olarak tanımlar (Hatto, 2011). Avrupa Kozmetik Yönetmeliği, çözünmezlik veya biyopersistan yapı gibi kavramları da nanomalzeme tanımına ekler (Bowman, Van Calster, & Friedrichs, 2010; Fytianos, Rahdar, & Kyzas, 2020).

Nanomalzemelere ilişkin farklı tanımların ortaya çıkmasının ve üzerlerinde fikir birliğine varılamamasının en büyük sebebi farklı paydaşların (örn., akademi, endüstri ve yasa düzenleyiciler) ve sektörlerin (örn., kozmetik, biyomedikal ve gıda endüstrisi) farklı hassasiyetleri ve öncelikleri oluşudur. Bunun yanı sıra nanomalzemeler basit bir kimyasal formülle ifade edilemeyecek ve tek bir parametreyle temsil edilemeyecek kadar karmaşık

özelliklere sahiptirler. Tüm bu karmaşık özellikler aynı zamanda parçacık boyutuna ve içinde bulundukları ortamın koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişebilmekte ve dinamik bir karakter sergilemektedir. Bu durum nanomalzemelere ilişkin evrensel bir tanımın kabulünü zorlaştırmaktır. Mevcut tanımlar farklı uygulama ve amaçlar için faydalı olmakla birlikte, bilimsel makalelere bakıldığında 100 nm'den büyük yapıların da yaygın olarak nanomalzeme olarak nitelendirildiği görülmektedir. Pek çok durumda 101 nm'den 99 nm'ye düşüldüğünde sihirli bir değişim olmadığı göz önünde bulundurulursa, literatürdeki bu yaklaşımın yanlış olmadığı anlaşılabilir. Nanomalzemelerin tanımına ilişkin kavramsal belirsizlikler ve fikir ayrılıkları bilimsel çalışmalar açısından önemli bir sorun oluşturmamakla birlikte yasal düzenlemeler ve mevzuatlar açısından ciddi bir problemdir. Bu noktada farklı paydaşların (bilimsel camia, özel sektör ve yasa düzenleyiciler) ihtiyaçlarını ve beklentilerini ana hatlarıyla karşılayan ortak bir terminoloji geliştirilmesi, nanomalzemelere ilişkin bilgi ve tecrübelerin sektörler arası paylaşımını kolaylaştıracak ve alandaki iletişimi kuvvetlendirecektir.

2.2. Nanomalzemelerin sınıflandırılması

Nanomalzemelere ilişkin pek çok konuda olduğu gibi sınıflandırılmaları konusunda da farklı yaklaşımlar önerilmiş ancak gruplandırmada temel alınabilecek genel kriterler konusunda fikir birliğine varılamamıştır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan nanomalzemeler genel olarak boyutlarına (0B, 1B, 2B veya 3B), bileşimlerine (metalik, polimerik, karbon-tabanlı, peptid-tabanlı vb) veya formlarına (nanoparçacık, nanoküre veya nanokapsül) göre gruplandırılabilmektedir.

Benzer yapıya veya biyoaktiviteye sahip nanomalzemelerin gruplandırılması risk değerlendirme süreçlerini ve deneysel kaynakların optimum kullanımını kolaylaştırmaktadır. Örneğin yüksek risk grubuna dahil nanomalzemeler için daha kapsamlı risk ölçüm testleri tavsiye edilirken düşük risk kategorisindeki nanomalzemeler için test gereksinimleri esnetilebilmekte ve maliyetli hayvan deneyleri yerine alternatif hücre kültür test bulguları da kabul görebilmektedir.Buna rağmen halen nanomalzemelerin risk potansiyellerine göre nasıl gruplandırılacağına ilişkin evrensel olarak kabul görmüş bilimsel ölçütler bulunmamaktadır. Bu durumun en büyük sebeplerinden biri olarak nano-ölçekte biyolojik aktiviteyi kontrol eden faktörlerin tam olarak aydınlatılamamış olması gösterilmektedir(Oksel, Ma, Liu, Wilkins, & Wang, 2015). Bir başka deyişle, nanomalzemeleri *toksik* yapan yapısal, fiziksel ve kimyasal özellikler tam olarak bilinmemekte ve aynı nanomalzeme grubuna ilişkin elde edilen toksikolojik bulgular tutarsızlık gösterebilmektedir.

Nanomalzemelerin risk potansiyelleri baz alınarak doğru bir biçimde gruplandırılabilmesi ancak aşağıda hususlara dikkat edilmesiyle mümkün olabilmektedir:

- ✓ Benzerlik hipotezinin birden çok mekanistik temele dayandırılması ve bu hipotezlerin çeşitli bilimsel kanıtlarla desteklenmesi,
- ✓ Oluşturulan kategorilerin mümkün olan en yüksek sayıda nanomalzeme grubunu içermesi,
- ✓ Kategorizasyon sonuçlarının deterministik olarak değil de olasılıksal olarak sunulması (örn., A malzemesinin B kategorisinde yer alma ihtimali %80 iken C kategorisinde bulunma ihtimali %20'dir).

Moleküler nitelikler (örn. yapısal, kimyasal ve fiziksel özellikler) ile biyolojik aktivite arasında bir ilişki olduğu hipotezine dayanan kimyasal benzerlik ilkesi yasa düzenleyici kurumlar tarafından benzer risk profiline sahip malzemelerin belirlenmesi için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Her ne kadar nanomalzeme özelinde bu ilkenin risk kategorileri oluşturmak için kullanımı henüz birkaç örnekle sınırlı olsa da (Puzyn, Leszczynska, & Leszczynski, 2009; Puzyn vd., 2011; Singh & Gupta, 2014; Tantra vd., 2015) nanomalzemelerin fizikokimyasal karakterizasyonuna ilişkin gelişmelerin ve modelleme yöntemlerinin (örn. kantitatif yapı-etki ilişki analizleri ve çapraz-okuma yöntemi) göreceli başarısının yakın gelecekte nanomalzemelerin risk potansiyellerine göre etkin bir biçimde sınıflandırılmasına katkı sağlayacağı ve bu sayede tehlike riski yüksek nanomalzemelerin öncelikli olarak analiz edilmesininmümkün olabileceği düşünülmektedir.

2.3. Nanometroloji

Nanometroloji kavramı nano ölçekte yapılan ölçümlere ilişkin tüm deneysel ve teorik standartları, yöntemleri ve araçları kapsamaktadır. Nanomalzemelerin sentezinden fizikokimyasal karakterizasyonuna ve biyoaktivite testlerine kadar nano boyutta ölçüm içeren pek çok çalışma nanometrolojinin kapsamına girmektedir. Her ne kadar tanınmış uluslararası standart enstitüleri ve sistemsel standartlar oluşturan organizasyonlar nano ölçekte ölçümlere ilişkin tavsiye niteliğinde raporlar ve dokümanlar yayınlamış olsa da(Emily, Ioanna, Scott, & Beat, 2018; Hansen, Sørensen, Skjolding, Hartmann, & Baun, 2017; Petersen, Goss, von der Kammer, & Kennedy, 2021), deneysel prosedürlere ilişkin standardizasyon eksikliği, alanda çelişkili ve tutarsız sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Nanoölçekte ölçümlere ilişkin zorluklar şu şekilde özetlenebilir:

- Bazı nanomalzeme gruplarının sahip olduğu yüksek agregasyon eğilimi dolayısıyla örnek hazırlama süreçlerinde karşılaşılan zorluklar,
- Nanomalzemelerin boyut ve şekil gibi fiziksel özelliklerinin ve yüzey kimyasının içerisinde bulundukları ortama ve süreye göre değişen dinamik bir yapı sergilemesi,
- Mevcut standartların ve metodolojilerin nanomalzemelerin karmaşık yapısını ve özgüllüğünü kapsayacak kadar detaylı olmaması,
- Nanomalzemelerin makromoleküller (örn. protein) ile etkileşimleri sonucu kazandıkları biyolojik kimliğeve bu değişimin hücresel davranışlar (örn. hücre içine alım ve toksisite) üzerindeki etkisine ilişkin belirsizlikler,
- Çevresel etki ve yaşam döngüsü analizlerinin geleneksel yığın formundaki malzemelere kıyasla çok daha karmaşık olması,
- Makro ve mikro ölçekte kullanılan teknolojilerin nano ölçeğe taşınması sırasında karşılaşılan problemler.

Tüm bu teknik zorluklar ve onların neden olduğu standardizasyon eksikliği nano ölçekte gerçekleşen olayların detaylı ve tutarlı olarak aydınlatılamamasına ve gözlemlenen davranışların mekanistik bulgularla desteklenememesine neden olmaktadır. Çözüm yolunda atılması gereken en önemli adım, tercihen *in situ* (yerinde) ölçüm yapabilen yeni tekniklerin ve cihazların geliştirilmesi ve var olan yöntemlerin kullanımına ilişkin farklı nanomalzeme gruplarına özgü standartlar geliştirilmesidir. Geliştirilen yöntem ve prosedürler daha sonra yasal mevzuat ve yönergelere dönüştürülerek bilimsel camianın da faydalanabileceği pratik dokümanlar haline getirilmelidir. Bu sayede nano ölçekte yapılan ölçümlerin daha hassas, doğru ve güvenilir hale gelmesi ve nanomalzemelerin farklı sektörlerdeki öneminin artmasını sağlanabilir.

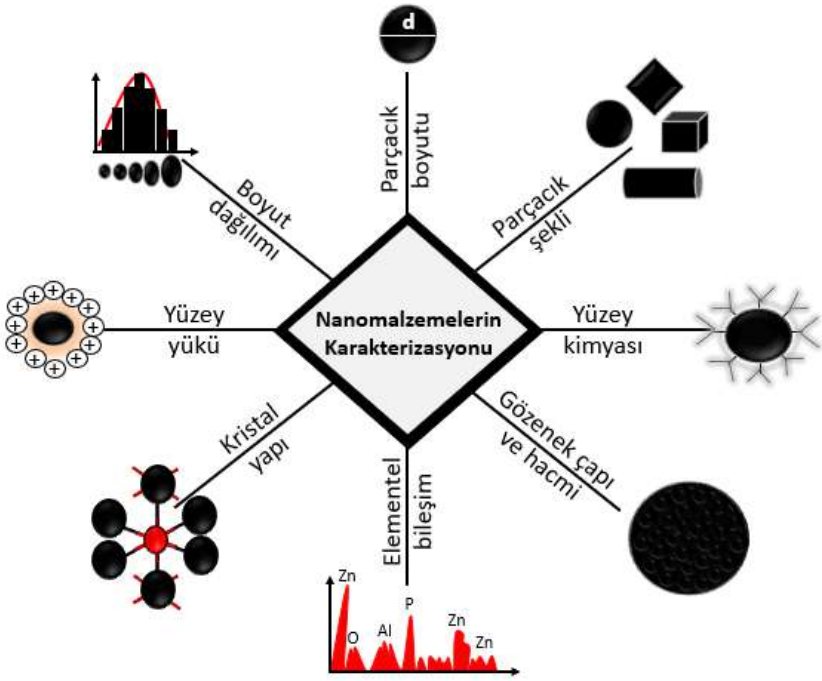
2.4. Yasal düzenlemeler

Avrupa Birliği (AB) pazarına belli bir miktarın (1 tonyıl^{-1}) üzerinde ithal edilen kimyasal malzemelerin kayıt, değerlendirme, izin ve kısıtlama prosedürlerini belirleyen REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) tüzüğünün yürürlüğe girdiği 2007 yılında nanoteknoloji henüz gelişme aşamasındaydı. Takip eden yıllarda nanoteknolojideki hızlı gelişimler mevcut malzemelerin güvenli üretim, kullanım ve ithalatını amaçlayan AB mevzuatlarının nano ölçekli farklı malzeme formlarını da kapsayacak şekilde güncellenmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaç, REACH tüzüğü ekleri (Nielsen vd., 2021) ve Avrupa Kimyasallar Ajansı'nın (ECHA) bilgilendirme kılavuzlarıyla(Gottardo vd., 2021) kısmi olarak karşılanmış olsa da bu değişiklikler göreceli olarak basit yapılı nanomalzemeleri (örn. metalik nanoparçacıklar) kapsamakta ve

fonksiyonelleştirilmiş nanomalzeme gruplarına (örn. manyeto-polimerik nanohidritler) ilişkin yükümlülükleri belirlemede yetersiz kalmaktadır. Nanomalzemelerin tanımlanmasına ve sınıflandırılmasına yönelik süregelen tutarsızlıklar ve deneysel süreçlere ilişkin metodolojik belirsizlikler yasal mevzuatların nano-adaptasyon süreçlerini zorlaştırmaktadır. Yasal düzenlemelerdeki bu boşluklar nanomalzemelerin çevre ve sağlık risklerine ilişkin belirsizlikleri arttırmakta ve alanın sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Nanoteknolojinin ve ürünlerinin sürdürülebilir üretimi için şeffaf risk değerlendirme ve yönetim araçlarına ve farklı nanomalzemelere özgü parametreleri kapsayan ve "her soruna uygun tek bir çözüm" (one-size-fits-all) anlayışından uzak, özelleştirilmiş yönergelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Nanomalzemelerin Karakterizasyonu

Nanomalzemelerinfizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesi nanomalzeme içeren tüm çalışmaların ilk adımını oluşturmaktadır. Her ne kadar farklı uygulamalar farklı fizikokimyasal özelliklerin ölçümünü gerektirebiliyor olsa da (örn. biyo-görüntüleme çalışmalarında kullanılan demir oksit nanoparçacıklarının manyetik özelliklerinin analizi veya ısıl işlem içeren uygulamalarda kullanılan nano-hibritlerin termal kararlılığı) minimum standart olarak kabul edilebilecek karakterizasyon analizleri şu ölçümleri içermektedir: ortalama parçacık çapı ve boyut dağılımı, morfoloji, elementel bileşim, kristal yapı, yüzey özellikleri (yüzey alanı, yüzey yükü ve yüzey kimyası) ve gözeneklilik (Şekil 2). Günümüzde nanomalzemelerin karakterizasyonu için farklı yaklaşımlar ve çok sayıda analitik yöntem kullanılmaktadır (Tantra, 2016).



Şekil 2. Nanomalzemelere ilişkin belirsizlikler

Nanomalzeme içeren çalışmalara bakıldığında birbiriyle uyuşmayan karakterizasyon sonuçlarının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu tutarsız sonuçların oluşumunda nanomalzemelerin nasıl tanımlanacağı konusundaki süregelen belirsizliklere ek olarak başta örnek hazırlama ve fizikokimyasal karakterizasyon olmak üzere nano-yapılı sistemlerin analizlerine ilişkin yöntem ve stratejilerin farklı nanomalzeme grupları için spesifik olarak bilinmemesi ve uygulanmaması gibi etmenler rol oynamaktadır.

Nano-boyutlu malzemelerin yapısal özelliklerindeki ufak değişimlerin biyolojik aktiviteleri üzerinde büyük etkiler yarattığı bilinmektedir (Sharifi vd., 2012). Aktiviteyi etkilediği düşünülen en önemli yapısal parametreler arasında parçacık boyutu, şekli, spesifik yüzey alanı, yüzey yükü ve kristalografik özellikleri yer almaktadır. Yapı-aktivite arasındaki ilişki uzun yıllardır biliniyor olmasına rağmen nanomalzeme içeren çalışmalara bakıldığında fizikokimyasal karakterizasyonun çoğunlukla yeterince kapsamlı olarak yapılmadığı görülmektedir. Dahası bu çalışmalarda takip edilen örnek hazırlama ve fizikokimyasal karakterizasyon metot ve stratejilerine ilişkin uluslararası kabul görmüş teknik kriterlerin azlığı birbiriyle uyuşmayan sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Farklı çalışmalarda elde edilen karakterizasyon

verisindeki tutarlılığı arttırmak için dikkat edilmesi gereken noktalar şu şekilde özetlenebilir:

*Örnek hazırlama süreçlerinin iyileştirilmesi ve standartlaştırılması:*Bazı fizikokimyasal karakterizasyon testlerinden önce (örn., Dinamik Işık Saçılımı), kuru toz olarak üretilen nanomalzemelerin sıvı dispersiyon formuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Ancak nanoparçacıkların yüksek topaklanma eğilimi nanoparçacık içeren örneklerin tek-dağılımlı (monodispers), homojen ve küçük boyutlu bir biçimde hazırlanmasını zorlaştırmaktadır. Farklı AB projeleri kapsamında geliştirilen nano-dispersiyon hazırlama protokolleri (Tablo 2) belirli nanomalzeme (metal oksitler ve karbon yapılı nanomalzemeler) ve test türleri (örn., toksisite testleri) göz önünde bulundurularak hazırlandıkları için farklı nanomalzeme gruplarına ve testlere uygulanabilirlikleri sınırlıdır. Bu noktada farklı laboratuvarlar nanomalzemenin kullanım alanını ve uygulanacak testin ortamını göz önünde bulundurarak numune hazırlama sürecini iyileştirmeli, farklı ortam parametrelerinin etkisini çapraz olarak değerlendirmeli ve takip edilen adımları net ve kapsamlı bir biçimde rapor etmelidir.

Tablo 2. Mevcut nano-dispersiyon hazırlama protokolleri(Hartmann vd., 2015)

Protokol	***Kons.***	***Ortam***	***Ajan***	***Ön-ıslatma***	***Sonikasyon***
Enpra	2,56 mg/mL	Deiyonize su	%2'lik Serum	Var	400 W, %10 genlik, 16 dk
Prospect	1-2,56 mg/mL	Deiyonize su	%2'lik Serum	Var	130 W, %90 genlik, 16 dk
Nanogenotox	2,56 mg/mL	Ultrasaf su	%0,05'lik Serum	Var	400 W, %10 genlik, 16 dk
Nanommune	1 mg/mL	Ultrasaf su	---	Yok	---
CEINT/NIST	0,5-20 mg/mL	Deiyonize su	---	Yok	50 W, %80 genlik, 15 dk

*Fizikokimyasal parametrelerin birden çok teknikle ölçülmesi:*Nanomalzemelerin boyutu başta olmak üzere aynı fiziksel parametrelerin ölçümü için kullanılan teknikler farklı prensiplere dayanmakta ve farklı ön hazırlık adımları (örn. kurutma, kaplama, gazsızlaştırma) içermektedir. Örneğin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) her parçacığı ayrı ayrı ele alırkenDinamik Işık Saçılımı (DLS) metodu yüzey aktif maddeler ve stabilizatörler de dahil olmak üzere tüm numuneyi birlikte ele alır ve parçacıklardan saçılan ışınların yoğunluğuna bağlı boyut tahminlerinde bulunur. Her ne kadar iki teknik de boyut analizi için kullanılıyor olsa da SEM ile elde edilen boyut tek tek görüntülenen parçacıklarla eşdeğer dairelerin çapını temsil ederken DLS ile ölçülen boyut parçacıkla aynı difüzyon katsayısına sahip kürenin çapını (hidrodinamik çap) ifade eder(Babick, Mielke, Wohlleben, Weigel, & Hodoroaba, 2016). Boyut dağılımın homojen olduğu sistemlerde DLS ve SEM yakın sonuçlar verirken, geniş boyut dağılımlı sistemlerde DLS sonuçları yanıltıcı olabilmektedir.Bu durum ölçülmek istenen parametrelerin birden çok teknikle eş zamanlı olarak analiz edilmesinin ve sonuçların ölçüm tekniğinin prensibi ve varsayımları göz önünde bulundurularak yorumlanmasının önemini vurgulamaktadır.

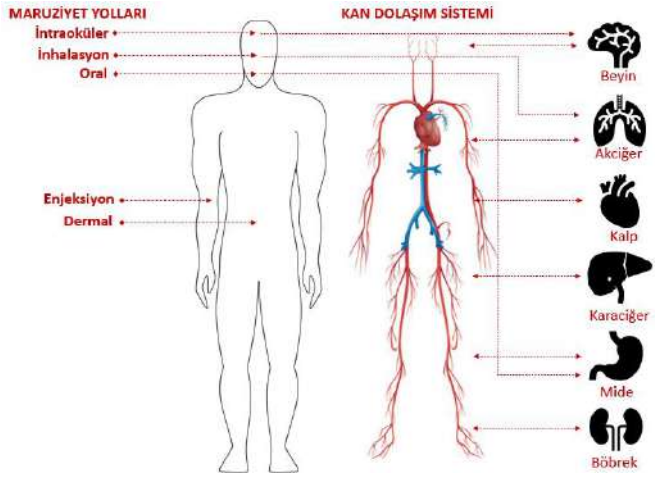
*Karakterizasyon verisinin detaylı olarak rapor edilmesi ve referans kütüphaneler oluşturulması:*Literatürde nanomalzeme içeren çalışmalara bakıldığında karakterizasyon verisinin kısıtlı olduğu ve örnek hazırlama

süreçlerine ilişkin detayların rapor edilmediği görülmektedir. Bu durum farklı çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılmasını zorlaştırmakta ve yanlış çıkarımlar yapılmasına sebep olmaktadır. Örnek hazırlama süreçlerindeki en ufak bir değişikliğin bile nanomalzemenin fiziksel özelliklerini ve dolayısıyla performansını ve biyolojik kimliğini değiştirdiği göz önünde bulundurulursa, karakterizasyon sürecine ilişkin adımların standartlara uygun biçimde atılmasının ve detaylı olarak rapor edilmesinin önemi anlaşılabilir. Bu kapsamda oluşturulacak referans kütüphaneler örnek hazırlama adımlarına, ölçülmesi gereken parametrelere, kullanılacak tekniklere ve sonuçların nasıl rapor edileceğine ilişkin kararlarda kılavuz niteliğinde olacaktır.

Son olarak (1) karakterizasyon çalışmalarında kullanılan tekniklerin nano-ölçekte analize uygunluğunun test edilmesi ve doğrulanması, (2) üretici tarafından belirtilen metriklerin her durumda çok güvenilir olmadığıve çalışma koşullarından doğrudan etkilendiği, (3) numune miktarının kısıtlı olduğu durumlara numunenin çoklu analizine olanak sağlayan ve malzeme yapısını yıkıcı/bozucu olmayan tekniklerin tercih edilmesi gerektiği ve (4) teknikler arası ve hatta laboratuvarlar arası karşılaştırmalarla karakterizasyon verisinin doğruluğunun arttırılması dikkat edilmesi gereken diğer önemli noktalardır.

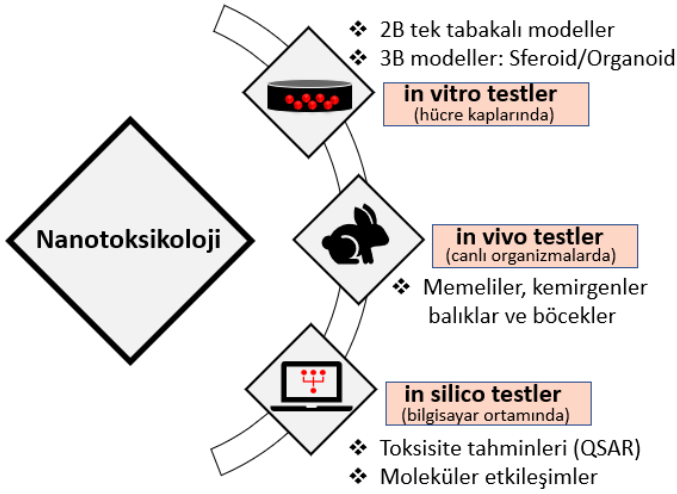
3. Nanotoksikoloji

Nanomalzemeleri teknolojik olarak avantajlı kılan benzersiz özellikleri aynı zamanda insan sağlığı açısından bir takım yeni risklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Literatürdeki göstergeler de farklı nano-formların kendilerine özgü toksikolojik özellikler gösterebildiğini doğrulamaktadır (Pietroiusti, Stockmann-Juvala, Lucaroni, & Savolainen, 2018). Nanoparçacıklar küçük boyutları sebebiyle deri ve benzeri biyolojik membranlardan kolayca geçerek hücrelere nüfuz edebilmekte ve kan yardımıyla taşınarak hayati organlara ulaşabilmektedirler. Yapılan araştırmalar vücuda öncelikli olarak inhalasyon, oral veya dermal yollarla girebilen (Şekil 3) nanomalzemelerin kan dolaşımı ve lenf bezleri aracılığıyla çeşitli organlara taşındığını ve büyük bir kısmınınkaraciğerde biriktiğini ortaya koymuştur (Almeida, Chen, Foster, & Drezek, 2011).



Şekil 3. Nanomalzemelere maruziyet yolları ve biyodistribüsyon

Başta biyomedikal uygulamalar ve farmakoloji olmak üzere sağlıkla ilişkili pek çok alt disiplinde gittikçe önem kazanan nanomalzemelerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri *in vitro* (hücre kültürü ortamında), *in vivo* (canlı organizmalar üzerinde) ve *in siliko* (bilgisayar ortamında) olarak adlandırılan üç farklı yaklaşımla analiz edilebilmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Nanomalzemelerin toksisitesinin ölçüm yöntemleri

3.1. *In Vitro* Toksisite Testleri

Nanomalzemelerin toksisitesinin ölçümünde en yaygın olarak kullanılan yaklaşım hücrelerin laboratuvar ortamında veya yapay koşullarda analizini içeren 2 boyutlu (2B) *in vitro* hücre kültürü modelleridir. Bu modeller

yardımıyla nanomalzemelere kısa veya uzun süreli maruziyet sonucunda oluşabilen çeşitli olumsuz etkiler (örn. hücre membranı hasarı, hücresel canlılığın azalması, serbest radikal ve oksidatif stres oluşumu, mitokondriyal fonksiyon bozuklukları, DNA hasarı veya mutasyon) ucuz, kolay ve hızlı bir şekilde analiz edilebilmektedir (Dhawan & Sharma, 2010). Yaygın olarak kullanılan nanotoksisite ölçüm teknikleri şu şekilde özetlenebilir:

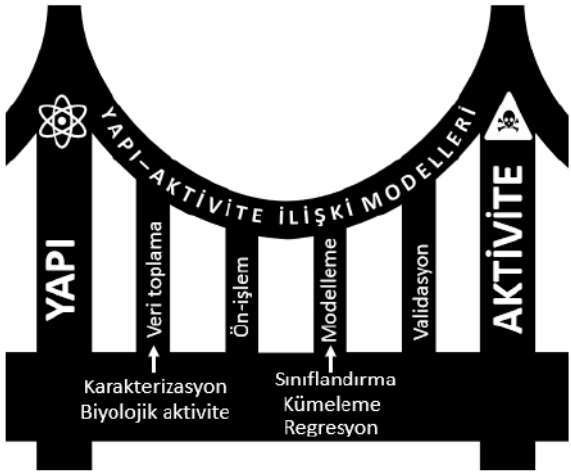
- ✓ **Membran değişiklik ölçümleri:** Annexin-V, LDH ve DNA boyaları
- ✓ **Mitokondriyal hasar:** MTT, WST ve XTT
- ✓ **Oksidatif stres oluşumu:** H2DCF-DA (DCFH-DA)
- ✓ **DNA hasarı:** COMET, γH2AX

Her ne kadar 2B hücre kültürü testleri toksisite ve risk değerlendirme çalışmalarının önemli ilk adımını oluştursa da 2B *in vitro* testlerde elde edilen sonuçlar çoğunlukla *in vivo* bulgular ile uyuşmamaktadır. Bu uyumsuzluğun nedenleri arasında *in vivo* koşullar altında meydana gelen fizikokimyasal değişimlerin, hücre-hücre etkileşimlerinin ve immün sistem yanıtının *in vitro* ortamda holistik olarak tespit edilemiyor oluşu sayılabilir. 2B *in vitro* kültürler, fizyolojik doku koşullarını ve hücresel fonksiyonlardan sorumlu etkileşimleri kısıtlı bir ölçüde taklit edebilirken, üç boyutlu (3B) hücre kültürü modelleri canlı organizmadaki dinamik karakteristikleri göz önünde bulundurarak 2B in vitro sistemlerin bu anlamdaki dezavantajlarını azaltabilmektedir.

Günümüzde hücreleri 3B yapılara dönüştürmek için hücrenin tipine ve araştırmanın/uygulamanın gereksinimine göre farklı yaklaşımlar kullanılabilmektedir. Çok hücreli sferoid kültürler, organoidler, 3B katı iskeleler, biyoreaktörler, hidrojeller, 3B biyoyazıcı ve çip üstünde organ teknolojileri olarak özetlenebilen bu yaklaşımlar pek çok alanda olduğu gibi (örn. kişiselleştirilmiş tıp, ilaç ve aşı geliştirme çalışmaları) nanotoksikoloji çalışmalarında da yeni ufuklar açmaktadır.

3.2. *In Siliko* Toksisite Testleri

Genel olarak *in siliko* yaklaşımlar bilgisayar destekli tüm modelleri ve simülasyonları kapsamaktadır. Nanotoksikoloji kapsamında sıklıkla kullanılan (ve kullanımı teşvik edilen) *in siliko* modeller yapısal özellikler ve aktivite arasında bir köprü kurulmasını ve bu sayede henüz test edilmemiş nanomalzemelerin toksisitesinin türetilen matematiksel eşitlilikler yardımıyla tahminlenmesini ifade etmektedir (Şekil 5). Kantitatif yapı-etki ilişki modelleri (QSAR) olarak adlandırılan bu yaklaşımın arkasındaki temel prensip yapısal açıdan *benzer* kabul edilen nanomalzemelerin benzer biyolojik davranışlar sergileyeceği prensibine dayanmaktadır.



Şekil 5. Kantitatif yapı-aktivite ilişki modelleri

Başta AB REACH tüzüğü olmak üzere pek çok uluslararası mevzuat QSAR-benzeri bilgisayar destekli yaklaşımların kullanımının artması desteklemekte ve hatta hayvan testlerine alternatif olarak gördüğü bu yöntemleri yasal mevzuatlar çerçevesinde özendirmektedir(Chinen & Malloy, 2022; Gozalbes & de Julián-Ortiz, 2018).Yasa düzenleyicilerin ve yürütücülerin tüm teşviklerine rağmen farmakolojide rutin olarak kullanılan QSAR yöntemi henüz nanomalzemelere etkin bir biçimde uyarlanamamıştır. Bu durumun sebepleri dört farklı kategoride ele alınabilir:

- Literatürde biriken nanotoksiteye ilişkin verinin tutarlılığına, kalitesine, miktarına ve çeşitliğine ilişkin problemler;
- Deneysel karakterizasyon yöntemlerine ilişkin standart eksikliği ve teorik hesaplamaların nanoölçeğe uyarlanmasındaki zorluklar;
- Nanotoksisite verisinin raporlanmasına ilişkin ortak bir terminoloji olmayışı ve bu durumun veriye ulaşımı ve dolayısıyla benzer kaynaklarla entegrasyonunu zorlaştırması;
- Literatürde biriken nanomalzemelerin biyoaktivitesine yönelik veri boyutunun gelişmiş makine öğrenmesi algoritmalarının (örn. yapay sinir ağları ve derin öğrenme) minumum veri gereksinimi tam olarak karşılayamaması.

Tüm bu zorlukların aşılması durumunda bilgisayar destekli modeller aracılığıyla nanomalzemelerin risk potansiyellerine göre gruplanması, biyolojik aktivite profillerinin yapısal özelliklere bağlı olarak tahminlenmesi ve bu sayede nanomalzemelerin dizayn aşamasında güvenliklerinin arttırılması mümkün olacaktır. Bir başka deyişle, geliştirilen matematiksel modeller sadece var olan

malzemelerin toksisitesinin tahminlenmesinde değil, aynı zamanda henüz üretilmemiş malzemelerin daha güvenli biçimde tasarlanmasında da fayda sağlayacaktır. Bu sayede geleneksel üretim-güvenlik-pazar anlayışı güvenliğe dayalı üretim yaklaşımıyla yer değiştirecek ve pazara çıkan ürünlerin güvenli kullanımı erken üretim aşamasında sağlanmış olacaktır.

3.3. *In Vivo* Toksisite Testleri

Her ne kadar uluslararası örgütler ve bilimsel komiteler etik kaygılar ve maliyet dolayısıyla hayvan testlerine alternatif oluşturacak ve nanomalzemelerin biyolojik davranışlarına ilişkin mekanistik açıklamalar sağlayacak yeni toksisite ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesini destekliyor olsa da nanotoksikolojideki en güvenilir bilgi kaynağı canlı organizmalar üzerinde elde edilen *in vivo* bulgular olarak kabul edilmektedir. Nanotoksikoloji alanının erken dönemlerinde elde edilen veriler çoğunlukla fare ve tavşan gibi hayvan modellerini içermektedir(Parasuraman, 2011). Üretilen nanomalzemelerin sayısının ve çeşitliliğinin artmasına ek olarak, AB'nin 2013 yılında kozmetik ürün testlerinde hayvan modellerinin kullanımını yasaklaması(Sreedhar, Manjula, Pise, & Ligade, 2020), *in vivo* çalışmalarda zebrabalığı ve sirke sineği modelleri gibi döllenme ve embriyo oluşumu aşamalarının 10 günden az olduğu ve bu süreç içerisinde sinir sistemi gelişimi gözlenmediği için etik kaygıların ortadan kaldırıldığı modellere olan ilginin artmasına neden olmuştur. Zebrabalığının insanlar ile ortolog genlerinin çokluğu, gelişimsel evrelerinin farklı biyokimyasal ve görüntüleme teknikleri ile kolaylıkla gözlenebilmesine ve bu sayede yüksek çıktılı deneylerin tasarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Benzer şekilde koryoallantoik membran modelleri (CAM) *in vivo* nanomalzeme testlerinde giderek popülerleşen ve fare çalışmalarına önemli bir alternatif oluşturan deneysel organizmalardan biridir (Buhr, Wiesmann, Tanner, Brieger, & Eckrich, 2020). Hayvan deneylerinde 3R (yerine koyma, azaltma ve iyileştirme) ilkesinin tüm kriterlerini karşılayan bu modeller canlı organizma içerisindeki nanomalzeme-hücre etkileşimlerine ilişkin bilgileri etik kaygılar, yüksek maliyetli ve uzun süreli laboratuvar analizleri olmadan edinmemizi sağlamaktadır. Ek olarak bu sistemler üzerinde yapılacak geniş tarama testleri geleceğin teknolojisi olarak göze çarpan 3B hücre kültürü ve doku mühendisliği çalışmalarındaki gelişmelere önemli katkılar sağlama potansiyeline sahiptir. Tüm bu gelişmeler ışığında nanomalzemelerin üretimi ve olası risklerinin test edilmesi arasında süregelen uçurum kapatılabilecek ve nanomalzeme kullanımı konusundaki güvenlik endişeleri hafifletilebilecektir.

4. Sonuç

Nanomalzemeleri teknolojik olarak avantajlı kılan benzersiz özellikleri pek çok sektörde farklı amaçlarla kullanımlarının önünü açmış ve yeni bilimsel alanların (örn. nanotıp, nanoelektronik, nanobiyoteknoloji, biyomimetik nanomalzemeler) doğuşuna sebep olmuştur. Giderek yaygınlaşan kullanımlarına karşın, nanomalzemelerin ve nanomalzemelere maruziyetin olası sonuçlarının ne zaman, nerede ve nasıl test edilmesi ve bu testlerin hangi mevzuatlara tabi tutulması gerektiğine yönelik net bilgiler bulunmamaktadır. Nanobilimde süregelen tüm bu kavramsal, metodolojik ve yasal boşlukların giderilmesi, farklı sektörleri, disiplinleri ve paydaşları içeren uluslararası ağların oluşturulması ve mevcut sorunlara farklı perspektiflerden disiplinler ötesi bir anlayışla yaklaşılması ile mümkündür.

Nano-boyutlu malzemelerin yapısal özelliklerindeki ufak değişimlerin biyolojik aktiviteleri üzerinde yarattığı büyük etki yaklaşık 15 yıldır biliniyor olmasına rağmen nanomalzeme içeren hücresel çalışmalara bakıldığında birbiriyle tutarsız ve tekrarlanabilirliği düşük bulguların olduğu görülmektedir. Bu noktada karmaşık fizyolojik mekanizmaların aydınlatılmasına ve yüksek maliyetli hayvan modellerine olan bağımlılığın ortadan kaldırılabilmesine olanak sağlayan alternatif yöntemlerin geliştirilmesi başta tıp, farmakoloji ve toksikoloji olmak üzere farklı pek çok disiplin açısından büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB 118C229 nolu projenin sağladığı destekle tamamlanmış olup yazar TÜBİTAK'a verdiği destek için teşekkür eder.

KAYNAKÇA

1. Almeida, J. P. M., Chen, A. L., Foster, A., & Drezek, R. (2011). In vivo biodistribution of nanoparticles. *Nanomedicine, 6*(5), 815-835.
2. Babick, F., Mielke, J., Wohlleben, W., Weigel, S., & Hodoroaba, V.-D. (2016). How reliably can a material be classified as a nanomaterial? Available particle-sizing techniques at work. *Journal of Nanoparticle Research, 18*(6), 1-40.
3. Bowman, D. M., Van Calster, G., & Friedrichs, S. (2010). Nanomaterials and regulation of cosmetics. *Nature nanotechnology, 5*(2), 92-92.
4. Buhr, C. R., Wiesmann, N., Tanner, R. C., Brieger, J., & Eckrich, J. (2020). The chorioallantoic membrane assay in nanotoxicological research—an alternative for In vivo experimentation. *Nanomaterials, 10*(12), 2328.
5. Chinen, K., & Malloy, T. (2022). Multi-Strategy Assessment of Different Uses of QSAR under REACH Analysis of Alternatives to Advance Information Transparency. *International journal of environmental research and public health, 19*(7), 4338.
6. Dhawan, A., & Sharma, V. (2010). Toxicity assessment of nanomaterials: methods and challenges. *Analytical and bioanalytical chemistry, 398*(2), 589-605.
7. Emily, M., Ioanna, N., Scott, B., & Beat, F. (2018). Reflections on FDA draft guidance for products containing nanomaterials: is the abbreviated new drug application (ANDA) a suitable pathway for nanomedicines? *The AAPS journal, 20*(5), 1-6.
8. Feynman, R. P. (1960). There's plenty of room at the bottom. *California Institute of Technology, Engineering and Science magazine*.
9. Fytianos, G., Rahdar, A., & Kyzas, G. Z. (2020). Nanomaterials in cosmetics: Recent updates. *Nanomaterials, 10*(5), 979.
10. Gottardo, S., Mech, A., Drbohlavová, J., Małyska, A., Bøwadt, S., Sintes, J. R., & Rauscher, H. (2021). Towards safe and sustainable innovation in nanotechnology: State-of-play for smart nanomaterials. *NanoImpact, 21*, 100297.
11. Gozalbes, R., & de Julián-Ortiz, J. V. (2018). Applications of chemoinformatics in predictive toxicology for regulatory purposes, especially in the context of the EU REACH legislation. *International Journal of Quantitative Structure-Property Relationships (IJQSPR), 3*(1), 1-24.

12. Hansen, S. F., Nielsen, M. B., Hansen, O. F. H., Clausen, L. P. W., Skjolding, L. M., Baun, A., & Arvidsson, R. (2022). To be or not to be a nanomaterial. *Journal of Nanoparticle Research, 24*(12), 1-8.
13. Hansen, S. F., Sørensen, S. N., Skjolding, L. M., Hartmann, N. B., & Baun, A. (2017). Revising REACH guidance on information requirements and chemical safety assessment for engineered nanomaterials for aquatic ecotoxicity endpoints: Recommendations from the EnvNano project. *Environmental Sciences Europe, 29*(1), 1-15.
14. Hartmann, N. B., Jensen, K. A., Baun, A., Rasmussen, K., Rauscher, H., Tantra, R., . . . Riego Sintes, J. M. (2015). Techniques and protocols for dispersing nanoparticle powders in aqueous media—is there a rationale for harmonization? *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 18*(6), 299-326.
15. Hatto, P. (2011). ISO concensus definitions relevant to nanomaterials and nanotechnologies. *4th Annual Nano Safety for Success Dialogue. ISO TC 229and BSI NTI/1 Nanotechnologies standardization committees. 29th and 30th March*.
16. Nielsen, M. B., Baun, A., Mackevica, A., Thit, A., Wallinder, I. O., Gallego, J. A., . . . Nilsson, A. C. (2021). Nanomaterials in the European chemicals legislation–methodological challenges for registration and environmental safety assessment. *Environmental Science: Nano, 8*(3), 731-747.
17. Oksel, C., Ma, C. Y., Liu, J. J., Wilkins, T., & Wang, X. Z. (2015). (Q) SAR modelling of nanomaterial toxicity: A critical review. *Particuology, 21*, 1-19.
18. Parasuraman, S. (2011). Toxicological screening. *Journal of pharmacology & pharmacotherapeutics, 2*(2), 74.
19. Petersen, E. J., Goss, G. G., von der Kammer, F., & Kennedy, A. J. (2021). New guidance brings clarity to environmental hazard and behaviour testing of nanomaterials. *Nature nanotechnology, 16*(5), 482-483.
20. Pietroiusti, A., Stockmann-Juvala, H., Lucaroni, F., & Savolainen, K. (2018). Nanomaterial exposure, toxicity, and impact on human health. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology, 10*(5), e1513.
21. Puzyn, T., Leszczynska, D., & Leszczynski, J. (2009). Toward the development of "nano-QSARs": advances and challenges. *Small, 5*(22), 2494-2509.

22. Puzyn, T., Rasulev, B., Gajewicz, A., Hu, X., Dasari, T. P., Michalkova, A., . . . Leszczynski, J. (2011). Using nano-QSAR to predict the cytotoxicity of metal oxide nanoparticles. *Nature nanotechnology, 6*(3), 175-178.
23. Rauscher, H., Sokull-Klüttgen, B., & Stamm, H. (2012). The European Commission's recommendation on the definition of nanomaterial makes an impact. *Nanotoxicology, 7*(7), 1195-1197.
24. Sharifi, S., Behzadi, S., Laurent, S., Forrest, M. L., Stroeve, P., & Mahmoudi, M. (2012). Toxicity of nanomaterials. *Chemical Society Reviews, 41*(6), 2323-2343.
25. Singh, K. P., & Gupta, S. (2014). Nano-QSAR modeling for predicting biological activity of diverse nanomaterials. *RSC advances, 4*(26), 13215-13230.
26. Sreedhar, D., Manjula, N., Pise, S., & Ligade, V. (2020). Ban of cosmetic testing on animals: a brief overview. *Int J Cur Res Rev, 12*(14), 113.
27. Stix, G. (2001). Little big science. *Scientific American, 285*(3), 32-37.
28. Tantra, R. (2016). *Nanomaterial characterization: An introduction*: John Wiley & Sons.
29. Tantra, R., Oksel, C., Puzyn, T., Wang, J., Robinson, K. N., Wang, X. Z., . . . Wilkins, T. (2015). Nano (Q) SAR: Challenges, pitfalls and perspectives. *Nanotoxicology, 9*(5), 636-642.
30. Vance, M. E., Kuiken, T., Vejerano, E. P., McGinnis, S. P., Hochella Jr, M. F., Rejeski, D., & Hull, M. S. (2015). Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein journal of nanotechnology, 6*(1), 1769-1780.

BİYOKÜTLE ATIKLARINDAN HİDROTERMAL İŞLEM İLE KATI YAKIT ÜRETİMİ

Dr. Öğr. Üyesi Gamze GÜNDÜZ MERİÇ

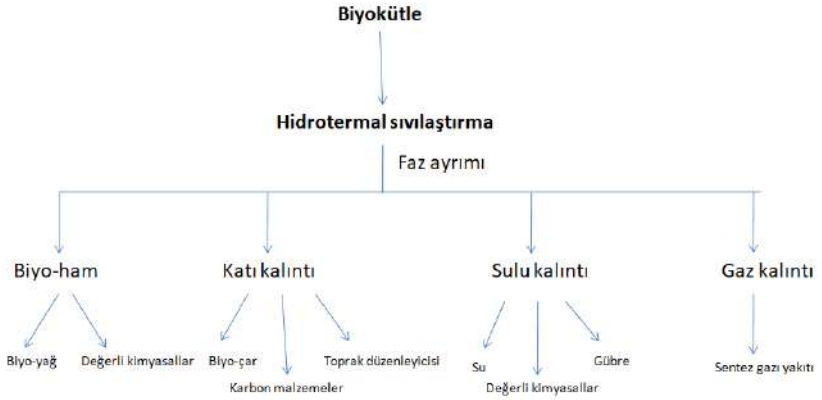
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Kimya Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0001-9487-4267

1. Giriş

Toplumlar, sosyal ilerlemenin getirdiği kolaylıktan yararlanırken, ekolojik ortamda giderek artan miktarda plastik ve biyokütle atıklarıyla (bitkisel biyokütle atıkları, atık kağıtlar, gıda atıkları vb.) uğraşmaktadır. Plastik atıkların ayrışma zorluğu, yüksek geri dönüşüm maliyeti ve düşük kaliteli ürün elde edilmesi gibi dezavantajları olduğu için 2000-2019 döneminde geri dönüşüm sürecindeki kayıplara rağmen plastik atıkların yalnızca % 9'u geri dönüştürülmüştür (OECD, 2022). Atık plastik çöpler yakma veya düzenli depolama alanlarında bertaraf edilerek ekolojik çevre üzerinde ciddi olumsuz etkilere sebep olmuştur. Biyokütle atıkları genellikle doğrudan yakma, piroliz veya gazlaştırma yoluyla yakıt kaynağı olarak yeniden kullanılabilir. Toz haline getirilmiş biyokütle yakıtlarının yanma hızı kömürünkinden oldukça yüksektir. Biyokütlenin kömürle birlikte yakılması, tek kömür yakmaya kıyasla üretilen birim enerji başına toplam emisyonların azaltılmasına yardımcı olur ve mevcut toz haline getirilmiş kömürle çalışan elektrik santrallerinde hem NO_x hem de SO_x seviyelerini düşürür.

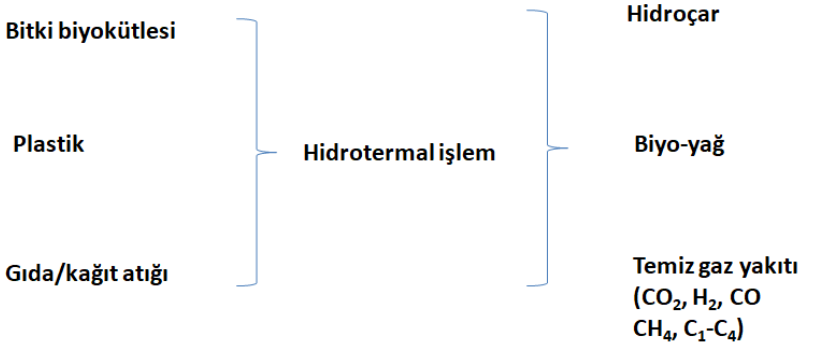
Ortam olarak basınçlı sıcak su kullanılan hidrotermal teknoloji, plastik geri dönüşümü ve biyokütle dönüşümünde çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Hidrotermal arıtma, susuzlaştırılabilirliği büyük ölçüde iyileştirebilir ve sudan farklı kimyasalların eklenmesini ve geri kazanılmasını gerektirmez.

Şekil 1'de hidrotermal sıvılaştırmanın (HTL) reaksiyon yolu görülmektedir. Kısaca, biyokütle ayrışır ve biyo-ham, gaz ve katı bileşikleri polimerize etmek ve oluşturmak için oldukça reaktif olabilen küçük bileşiklere depolimerize edilir (Gollakota vd., 2018). HTL işlemi sırasında yağ fazlı ürünlerin oluşumu ham madde ile ilgilidir ve biyokütleninHTL'sinden elde edilen ürüne "biyo-yağ" adı verilir (Toor vd., 2011). Wang ve ark. (2021), biyo-yağın verimini ve kalitesini iyileştiren ve biyo-yağdaki fenolik madde içeriğini artıran 360° ve 22 MPa'dakağıt PE Al kompozit ambalaj atığının HTL'sini gerçekleştirmişlerdir. Fenolik maddeler endüstriyel üretim için daha fazla ayrılabilir ve ekstrakte edilebilir. Düşük sıcaklıklarda (<300°C) linyit, buğday samanı ve plastik atığın HTL'si düşük kükürt içerikli petrol üretimini artırmıştır.Hidrotermal teknoloji, yalnızca biyokütle atık dönüşümünde iyi çalışmakla kalmaz, aynı zamanda atık plastiğin geri dönüşümü, klorsuzlaştırma ve denitrifikasyonunda da mükemmel bir performans gösterir.



Şekil 1. Biyokütleninhidrotermal sıvılaştırmasının reaksiyon yolu (Xu ve Li, 2021)

Hidrotermal teknoloji, yalnızca biyokütle atık dönüşümünde iyi çalışmakla kalmaz, aynı zamanda atık plastiğin geri dönüşümü, klorsuzlaştırma ve denitrifikasyonda da mükemmel performans gösterir. Zhao ve ark. (2019), e-atık plastiklerini, plastik üretiminin monomerlerini veya stirenmonomerlerini, stiren türevleri, bisfenol A ve kaprolaktam gibi kimyasal hammadde olarak kullanılabilecek organik ürünlere dönüştürmek için hidrotermal arıtma teknolojisi uygulamışlardır. Katalizör/katkı maddesi olarak NaOH veya KOH kullanan Onwudili ve ark. (2013), 400-420°C ve 20-25MPa'da katalitik hidrotermal işlem yoluyla karbon elyafın takviyeli plastik numunelerden geri kazanımını incelemişlerdir. Hidrotermal teknoloji, Şekil 2'de gösterildiği gibi, plastik atıkların biyokütle işlenmesinde ve geri dönüştürülmesinde birçok avantaj ve yüksek uygulama değerleri göstermiştir. Farklı atık kaynakları ve bileşimleri ile hidrotermal reaksiyon mekanizması, reaksiyon koşulları ve prosedürleri her zaman farklıdır.



Şekil 2. Bitki biyokütlesi, plastik ve atık gıda/kağıdınhidrotermal işlemle dönüşümü

2. Malzemeler

Biyokütle atığı;

Biyokütle doğal olarak mevcut canlı veya yakın zamanda yaşayan organizmalardan elde edilen karmaşıl biyolojik, organik veya organik olmayan katı bir üründür. Çalışmada bahsedilen biyokütle atıkları, geleneksel olmayan bitki biyokütlesi gibi geleneksel olarak kullanılmayan biyokütleyi ve hayvan gübresini, atık kağıt, çamur ve organik ve organik olmayan birçok katı atığı içerir. Biyokütle atıkları çok çeşitli kaynaklara sahiptir ve tüm dünyada bol miktarda bulunmaktadır. Dünya çapında yılda yaklaşık 4x109 ton çeşitli türde atık ve 1,6 milyar-2 milyar ton belediye atığı üretilmektedir. Bu atıklar zamanında bertaraf edilmeli veya arıtılmalıdır, aksi takdirde doğal kaynaklar üzerinde bir yüke ve insan ve çevre üzerinde de ciddi kirliliğe neden olurlar.

Plastik atıklar;

Plastik çağın üretimidir. Plastiğin mükemmel performansı ve kapsamlı uygulanabilirliği nedeniyle, küresel plastik üretimi 300 milyon tonun üzerine çıkmış ve yıl içinde yaklaşık % 4 artmıştır (Zhao ve diğerleri, 2018). Çeşitli biyokütle türevlerinin aksine, plastik mikroorganizmalar tarafından kolayca parçalanmazlar. Tüm çevremizde bulunan büyük plastik parçalar ve mikro/nano-plastikler, çevre sorunlarına, insan ve ekosistem sağlığı üzerinde belirsiz etkilere neden olurlar. Yılda üretilen 260 Mt plastik atık, çevreye salındığında ekosistemler için zararlıdır ve iklim değişikliği ve gaz kirliliğine neden olur (Vollmer ve diğerleri, 2020). Plastik üretiminden geri dönüşümüne kadar sera gazı emisyonları 2030'da 1,34 Gt/yıl'a ulaşacak ve 2050'de ikiye katlanacaktır (Shen ve diğerleri, 2020). Hava kirliliğine ek olarak, plastiğin refrakter doğası da toprak kirliliğine yol açmakta ve okyanustaki mikroplastikler okyanusun karbon tutma kapasitesini azaltmaktadır.

3. Hidrotermal koşullar altında reaksiyonlar

Biyokütle, farklı hidrotermal koşullar altında bir dereceye kadar ayrışma, dönüşüm, çözünme veya hidroliz reaksiyonlarına girebilen selüloz, hemiselüloz, lignin ve diğer bileşenlerden oluşur (Zhao ve diğerleri, 2014). Lipitler, proteinler ve çeşitli metal elementler biyokütle atıklarında yaygın olarak bulunurlar. Ayrışma, dönüşüm ve ayrılma süreçlerinin incelenmesi, aşağı yöndekibiyoham petrolün iyileştirilmesini ve gelecekteki sanayileşme için yan ürün kullanımını gerçekleştirmeye yardımcı olur.

Plastiklerin hidrotermal işlemindeki reaksiyon mekanizması ve nihai ürünler, polimer-monomer ürünlerinin verimini artırmaya ve yan ürünlerin verimini azaltmaya yönelik araştırmalara elverişli, hammaddelerin bileşiminden ve

hidrotermal koşullardan büyük ölçüde etkilenir. Polikarbonat (PC), büyük çoğunluğu bisfenol A, fenol, izoprofilfenol ve izopropenilfenoldahil olmak üzere uçucu sıvı ürünlere hidrotermal işlemle (400°C, 25MPa) yaklaşık % 100 dönüşür. PC'ye benzer şekilde stirenbütadien de esas olarak sıvı yağlı ürünlere dönüşür. Bu süreçte, bütadienin termal aromatizasyonu için diğer aromatik türevlerle yoğuşturma reaksiyonları senkrüt verimini arttırmaktadır (Helmer Pedersen ve Conti, 2017).

4. Hidrotermal teknolojinin biyokütle atıklarına uygulanması

Bu çalışmada tartışılan biyokütle atıkları, tarım ve ormancılık atıkları, atık kağıt ve gıda atıklarını içermektedir. Hidrotermal arıtma yoluyla, biyokütle atıkları öncelikle hidrokömür, sıvı fazlı biyo-yağ ve/veya sulu ürünlere dönüştürülebilir.

Tarım ve ormancılık atıkları;

Lignoselülozikbiyokütle, çeşitli biyobazlı ürünlerin üretilmesi için çevre dostu yenilenebilir bir hammadde olarak giderek daha fazla kabul görmektedir. Karasal biyokütle miktarının 1,18x1011t/yıl kadar tahmin edildiği bildirilmiştir (Gao vd., 2016). Tipik lignoselülozikbiyokütle olarak, tarım ve ormancılık atıkları öncelikle selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda, tarım ve ormancılık atıklarının kullanımı temel olarak enerji üretimi için gazlaştırma, briket yakıt üretimi, etanol için fermantasyon ve sıvı yakıtlar için termokimyasal dönüşüme odaklanılmıştır (Cao vd., 2017). Şu anda hidrotermalproses, lignoselülozik yapıları verimli bir şekilde parçalamak ve bitki biyokütle atığının dönüşümünü gerçekleştirmek için yararlı ürünler üretmek için umut verici bir tekniktir.

Atık kağıt;

Kağıt tüketimi, küresel katı atığın % 25-40'ına katkıda bulunan çok büyük miktarda atık kağıt meydana getirmektedir (Nguyen vd., 2013). Atık kağıt, nispeten daha az hemiselüloz (%10-20) ve lignin (%5-10) ile bol miktarda selüloz (%60-70) içeriğine sahiptir. Selüloz; biyouyumluluk, biyobozunurluk ve yenilenebilirlik özelliklerine, yüksek moleküler ağırlığa ve hiyerarşik bir yapıya sahiptir ve dünyadaki en bol bulunan biyopolimerdir (yılda 1.011 tona kadar üretim). Kağıt atıklarının geri dönüştürülmesi enerji sorununun çözülmesine yardımcı olmaktadır. HTC'den sonra, atık kağıttan dönüştürülen hidrokömür, üstün yanma performansı elde etmiş ve yükseltilmiş bir enerji derecesine sahip olmuştur (Lin vd., 2017). Ayrıca, işlemde üretilen oligomerler, monomerler, fenolikler ve ara bozunma ürünleri başka yönlerden de kullanılabilir.

Gıda atığı;

Gıda atıkları karbonhidratlar, proteinler, lipitler ve kül içerir. Karbonhidrat ve külün bir kısmı suda çözünürken, çoğu lipid ve protein normal sıcaklıkta suda çözünmez. HTC işleminde, ısıtma adımı sırasında birçok organik madde ayrışır. Lipitler veya yağlar, yağ asitlerine ve gliserole hidrolize edilir. Proteinler yavaşça amino asitlere ve ayrıca hidrokarbonlara, aminlere, aldehitlere ve asitlere ayrışır. Polisakkaritler, monosakkaritlere veya oligosakkaritlere hidrolize olurlar. HTC koşulları altında, bu küçük moleküllerin birçoğu reaktiftir ve bazıları bileşikler oluşturmak üzere oligomerize olabilirler. Ek olarak, Maillard reaksiyonu nedeniyle polisakkarit ve protein parçalarından yeni bileşikler oluşmaktadır. Örneğin gıda atıklarının hidrotermal arıtımı, lizinoalanin ve histidinoalaninler gibi çapraz bağlı amino asitlerin oluşumuna neden olmaktadır (Lin vd., 2017).

Plastik atık;

En sık kullanılan plastikler polietilen (PE), PET, polipropilen (PP), PVC ve naylondur. Bu plastikler orijinal hallerinde verimli yakıtlardır ve HTC, katı karbon açısından zengin yakıt (hidrokömür) ve yüksek katma değerli sıvı üretmek üzere bu malzemelerin özelliklerini geliştirmek için etkili bir prosedürdür. Hammadde türüne bağlı olarak, HTC'den çeşitli ürün özellikleri elde edilebilir. Ek olarak, yayılan gazları daha iyi kontrol etmek mümkün olduğundan ve çalışma sıcaklıkları nispeten düşük olduğundan HTC kullanmanın başka avantajları da vardır (Iniguez vd., 2019). Lin ve arkadaşları (2017), PE ve PP'nin 280°C'de hidrotermal işlem sırasında katı ürün kütlesinin neredeyse değişmeden kaldığını bunun da PE ve PP'ninhidrotermal koşullar altında yüksek stabilite gösterdiğini bulmuşlardır.

Biyokütle/plastik karışım atıkları;

Çoğu durumda karışım atıkların doğru bir şekilde ayrılması yalnızca geri dönüşümü zorlaştırmakla kalmaz, aynı zamanda süreci daha karmaşık ve zaman alıcı hale getirir. Bununla birlikte, hedef sıvı veya katı yakıt üretmek olarak belirlenirse, biyokütle ve plastiğin karışık atıklarını aynı anda özellikler hidrotermal koşullar altında arıtmak, parçalamak veya geri dönüştürmek daha avantajlı ve faydalı olacaktır. Hidrotermal arıtmanın yüksek performanslı sıvı veya katı yakıtların yanı sıra yüksek katma değerli yan ürünler elde etmek için biyokütleyi karbonize etmesi, plastikleri bozundurması, ürünü toz haline getirmesi, toksik elementleri azaltması ve safsızlıkları ortadan kaldırması beklenmektedir. Bu işlem sırasında parametreler, hammadde kaynaklarının türlerini, biyokütle/plastik oranını ve sıcaklık, basınç ve reaksiyon süresi gibi hidrotermal koşulları içermektedir. Bu çalışmada, biyokütle/plastik karışımı atıklarının ko-karbonizasyonu ve katı yakıtların üretimi üzerine odaklanılmıştır.

5. Gelecekteki uygulanabilirliği

Sürdürülebilirlik, proses parametrelerinin ayarlanabilirliği, malzemelerin çeşitliliği ve esnek kombinasyon gibi avantajları nedeniyle, hidrotermal teknoloji açısından büyük araştırma alanına sahiptir. Hidrotermal teknoloji, çok amaçlı ön işlemler, katma değerli ürünlerin ekstraksiyonu, karbonizasyon, sıvılaştırma, gazlaştırma, polimerizasyon, bozunma, iyileştirme, denitrifikasyon, kükürt giderimi, klorsuzlaştırma, liç, inorganik malzemelerin sentezi gibi faklı alanlarda umut vericidir. Hidrotermal teknolojinin geleceği ile ilgili olarak dört noktaya dikkat etmek gerekir. İlk olarak, hidrotermal koşullar altındaki reaksiyon mekanizmasının derinlemesine araştırılması gerekir. İkinci olarak, hidrotermal teknoloji ile diğer teknolojiler arasındaki sinerjik etki araştırılmalıdır. Üçüncüsü, katalitik hidrotermal teknoloji ilgiyi ve keşfi hak etmektedir. Sonuncusu, hidrotermal teknolojinin katı atıklara büyük ölçekli uygulamasının yakın zamanda kurulması ve geliştirilmesi gerekmektedir.

6. Sonuç

Çalışma, hidrotermal teknolojinin biyokütle, plastik ve biyokütle/plastik karışım atıklarında son yıllardaki uygulamarın gelişimini göstermektedir. Hidrotermal koşullar altındaki suyun, özellikle kritik üstü ve altı suların özel kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı, hidrotermal teknolojinin biyokütle ve plastik atıkları arıtmak için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Hidrotermal karbonizasyon sürecinde, biyokütle atığı, alternatif bir yakıt olarak çoğunlukla katı yakıtlara (hidrokömür) dönüştürülür; hidrotermal sıvılaştırma koşulları altında eritilen, parçalanan ve sıvı kimyasallara veya yağ bazlı ürünlere dönüştürülen plastik atıklar daha yüksek sıcaklıklarda, biyokütle veya plastik atıklardan yanıcı sentez gazı üretmek için hidrotermalgazlaştırma kullanılmaktadır. Ayrıca hidrotermal arıtma, biyokütleyi karbonize etmesi, plastikleri bozundurması, toksik elementleri azaltması ve katma değeri yüksek olan yüksek performanslı katı yakıtlar elde etmesi bakımından bu atıkların bertarafı için uygundur. Sürdürülebilirlik, proses parametrelerinin ayarlanabilirliği, malzemelerin çeşitliği ve esnek kombinasyon nedeniyle hidrotermal teknoloji atık arıtımı ve geri dönüşüm uygulamalarında gelişmektedir.

KAYNAKLAR

1. Cao, L.,Zhang, C., Chen, H., Tsang, D. C., Luo, G., Zhang, S., &Chen, J. (2017). Hydrothermalliquefaction of agriculturalandforestrywastes: state-of-the-art reviewandfutureprospects. *Bioresourcetechnology*, *245*, 1184-1193.
2. Gao, P.,Zhou, Y., Meng, F., Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, W., &Xue, G. (2016). Preparationandcharacterization of hydrocharfromwasteeucalyptus bark byhydrothermalcarbonization. *Energy*, *97*, 238-245.
3. Gollakota, A. R. K.,Kishore, N., &Gu, S. (2018). A review on hydrothermalliquefaction of biomass. *RenewableandSustainableEnergyReviews*, *81*, 1378-1392.
4. Iñiguez, M. E.,Conesa, J. A., &Fullana, A. (2019). Hydrothermalcarbonization (HTC) of marineplasticdebris. *Fuel*, *257*, 116033.
5. Lin, Y.,Ma, X., Peng, X., &Yu, Z. (2017). Hydrothermalcarbonization of typicalcomponents of municipalsolidwasteforderivinghydrocharsandtheircombustionbehavior. *BioresourceTechnology*, *243*, 539-547.
6. Nguyen, S. T., Feng, J., Le, N. T., Le, A. T., Hoang, N., Tan, V. B., &Duong, H. M. (2013). Celluloseaerogelfrompaperwasteforcrudeoilspillcleaning. *Industrial&engineeringchemistryresearch*, *52*(51), 18386-18391.
7. OECD, 2022. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, EnvironmentalImpactsandPolicyOptions. OECD
8. Onwudili, J. A.,Yildirir, E., & Williams, P. T. (2013). Catalytichydrothermaldegradation of carbonreinforcedplasticwastesforcarbonfibreandchemicalfeedstockrecovery. *WasteandBiomassValorization*, *4*(1), 87-93.
9. Pedersen, T. H.,&Conti, F. (2017). Improvingthecirculareconomyviahydrothermalprocessing of high-densitywasteplastics. *Wastemanagement*, *68*, 24-31.
10. Shen, Y.,Zhao, R., Wang, J., Chen, X., Ge, X., &Chen, M. (2016). Waste-to-energy: Dehalogenation of plastic-containingwastes. *Wastemanagement*, *49*, 287-303.
11. Toor, S. S.,Rosendahl, L., &Rudolf, A. (2011). Hydrothermalliquefaction of biomass: a review of subcriticalwatertechnologies. *Energy*, *36*(5), 2328-2342.
12. Vollmer, I.,Jenks, M. J., Roelands, M. C., White, R. J., vanHarmelen, T., de Wild, P., ... &Weckhuysen, B. M. (2020). Beyond

mechanicalrecycling: Givingnew life toplasticwaste. *AngewandteChemie International Edition*, *59*(36), 15402-15423.

13. Wang, Y.,Wang, Y., Zhu, Y., Fang, C., Xu, D., &Zheng, X. (2021). Interactions of the Main Components in Paper-Plastic-AluminumComplexPackagingWastesduringtheHydrothermalLiquefactionProcess. *ChemicalEngineering&Technology*, *44*(8), 1519-1527.
14. Xu, Y. H.,&Li, M. F. (2021). Hydrothermalliquefaction of lignocelluloseforvalue-addedproducts: Mechanism, parameterandproductionapplication. *BioresourceTechnology*, *342*, 126035.
15. Zhao, X.,Xia, Y., Zhan, L., Xie, B., Gao, B., &Wang, J. (2018). Hydrothermaltreatment of e-wasteplasticsfortertiaryrecycling: productslateanddecompositionmechanisms. *ACS SustainableChemistry&Engineering*, *7*(1), 1464-1473.
16. Zhao, X.,Zhan, L., Xie, B., &Gao, B. (2018). Productsderivedfromwasteplastics (PC, HIPS, ABS, PP and PA6) viahydrothermaltreatment: Characterizationandpotentialapplications. *Chemosphere*, *207*, 742-752.
17. Zhao, Y., Lu, W., Chen, J., Zhang, X., &Wang, H. (2014). Researchprogress on hydrothermaldissolutionandhydrolysis of lignocelluloseandlignocellulosicwaste. *Frontiers of EnvironmentalScience&Engineering*, *8*(2), 151-161.

KAYMA DİRENCİ VE TEST YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Gültekin ÇOŞKUN[1]
Gencay SARIIŞIK[2]

[1]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas TBMYO, Sivas / Türkiye,
e-mail: coskungc@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-4182-2372
[2]Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Şanlıurfa / Türkiye,
e-mail: gsariisik@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1112-3933

GİRİŞ

Ülkemizde topluma açık ve kapalı alanlarında yüzey kaplama malzemesi olarak doğal taş, suni mermer, mozaik karo taşı, laminat, seramik ve PVC kullanıldığı görülmektedir. Yayaların hissedilebilir zeminler üzerinde yönlerini daha rahat bulabilmeleri ve rahatça hareket edebilmeleri için farklı malzemelerden özellikle beton, PVC, çelik ve alüminyum malzemeler kullanılmaktadır (Çoşkun 2013).

Kayma veya takılmalardan kaynaklanan düşme olayları, yalnızca iş yerinde değil, aynı zamanda günlük yaşamda büyük bir güvenlik riskidir. Motorlu araç çarpışmalarından sonra ölümle sonuçlanan kazaların en sık ikinci nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır (Kim 2022). Dünyada yürüme sırasında kaymadan kaynaklanan kazaların % 50'si, işyerlerinde meydana gelen kazaların % 20'si kayma, takılma ve düşmeden kaynaklanmaktadır. Bu kaza tipi Federal Almanya Cumhuriyetinde verilen bütün yeni sanayi sakatlık maaşlarının %25'ine tekabül etmektedir. Alman Sosyal Kaza Sigortalarına göre sanayi sektöründe kaymadan kaynaklanan kazaların maliyeti 2 milyar €/yıl olduğu belirtilmektedir (Wetzel vd., 2013).

Zemin kaplaması olarak kullanılan malzeme yüzeylerinin kayma risk değerlendirmesi belirlenmesi oldukça önem kazanmıştır (Çoşkun vd., 2016; Çoşkun ve Sarıışık 2020). Kayma direnci, ayakkabı tabanı ile zemin kaplama malzemesi yüzeyinin etkileşimden kaynaklanmaktadır. Yüzeyin kayma direncinin subjektif değerlendirmesi yüzeyin durumu ve renklerin kontrastı, aydınlatma tipi ve geliş açısı etkilidir (Enkhjargal ve Li, 2019). Güvenlik ve kayma direncinin kapsamı, kullanıcılar ve statik ve dinamik sürtünme katsayısının (COF) ölçümleriyle öznel olarak değerlendirilir (Chang vd., 2006; Li vd., 2019; Khaday ve Li 2019).

Yüzey kaplama malzemeleri üreten endüstriler de yüzey kayma direnci minimum değerde olması istenmektedir. Zeminlerde kullanılan yüzey kaplama malzemelerin estetik ve dekoratif niteliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerine de büyük önem verilmektedir. Yüzey malzemelerinin kuru, ıslak ve yağlı koşullar altında test edilen doğal, cilalı, honlu ve eskitilmiş yüzeylere sahip seramik karolar ve doğaltaşlar kullanılmaktadır (Sariisik 2009; Terjék ve Józsa 2015). Ayrıca farklı ortam koşullarında da (yağ, süt, şarap, su, gliserol, dizel ve endüstriyel yağ vb.) araştırmalar yapılmıştır (Barreca vd., 2015).

Kayma, insan faaliyetinin türü, yerel çevresel özellikler, birlikte çalışan yüzeylerin tribolojik özellikleri ve yüzeyin kullanım ve aşınma yoğunluğu ile ilgili birçok faktöre bağlı olan karmaşık bir olgudur (Zhu vd., 2021). Avrupa'da CE sertifikalandırması üreticilerin imal edilen yüzeylerin

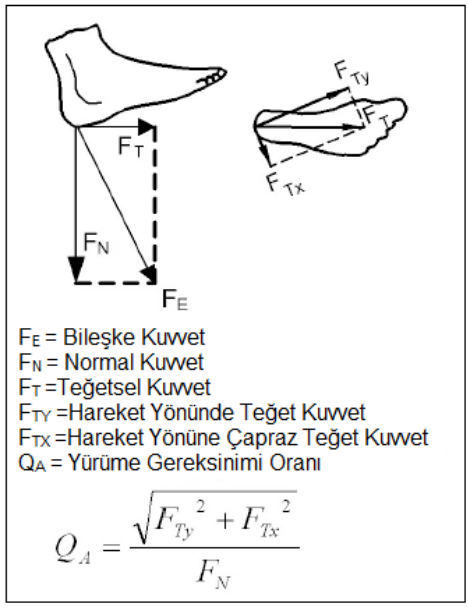
kaymazlık testlerini yapmasını gerektirir. Bu durum tasarımcıların seçilen yerlerde kayma olasılığına karşı kayma direnci dikkate alınarak uygun yüzeyi seçmesini kolaylaştırır. Bu testler üretim aşamasında gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra yüzey malzemeleri yoğun kullanım alanlarında aşındığı için kayma direnci özelliklerinin değiştiği görülmektedir (Terjék ve Dudás 2018; Sudoł vd., 2021; Lot vd., 2021).

Kayma sonucu oluşan kazaları en aza indirmek için kayma açısı ve direncinin belirlenmesi ve güvenlik sınıflamasının yapılması gerekmektedir. Yüzey kaplama malzemelerinin kayma açısı ve direncini ölçmek için birçok test yöntemi bulunmaktadır. Bu kayma test yöntemlerinde yatay dinamometre, james makinesi, tortus, yatay sürtünme ölçüm metresi, eğik düzlem, pandül test cihazı, GMG 200, ASM 825A, slip alert ve FSC 2011 cihazları kullanılmaktadır. Her cihazın farklı bir standardı bulunmaktadır.

Bu çalışmada, farklı ortamlarda yüzey kaplama malzemelerinin kayma açısı ve direnci, sürtünme katsayının belirlenmesinde kullanılan eğik düzlem, pandül ve GMG 200 test cihazlarının standartları, çalışma prensipleri, kullanım yerleri ve sınıflandırmaları hakkında temel bilgiler verilmiştir.

KAYMA DİRENCİNİN DEĞERLENDİRMESİ

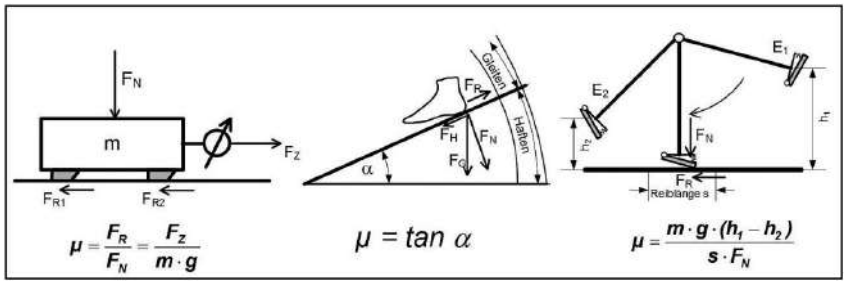
İnsan yürüyüşü, doğada canlılar arasında var olan en güvensiz hareket süreçlerinden biridir (Fischer vd., 2008). Bir adımın biyomekanik hareket dizisi, ayağın sarkaç hareketi ve iniş, yuvarlanma ve ayağın yere basması/yerden kalkması ve vücudun ağırlık merkezinin yer değiştirmesidir. Ayak ve zemin arasındaki temas aşamasında yatay ve dikey kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Bu kuvvetlerin ölçümü bir platform aracılığıyla yürüyüşün analizlerinde ölçülebilir. FT yatay kuvvetinin, etki eden dikey FN kuvvetine yürüme gereksinimi oranı QA'yı oluşturur (Şekil 1). Gereksinim oranı, yürüme durumuna göre değişmektedir.



Şekil 1. Ayağın yatay bir zemine yerleştirilmesinde kuvvet ilişkileri (Wetzel vd., 2013).

Kayma direnci, insanların yürüme gereksinimlerin (QA), zemin kaplaması, ayakkabı tabanı, kaymayı teşvik edici malzemeler ve çevre koşullarından oluşan sistemin kaymazlık özelliklerini karşıladığında kaymaya karşı güvenliğini ifade etmektedir. Kayma direncini değerlendirmek için, ürün güvenliği ve iş güvenliği arasında metodolojik bir ayrım yapılır. Ürün güvenliği, sürtünme ortaklarını standartlaştırarak sürtünme sisteminin tek bir bileşenini kayma önleme potansiyeli açısından değerlendirir. Güvenli yürüyüş için sürtünme katsayısı için minimum değerler, yürümenin biyomekanik gerekliliklerinden elde edilebilir (Bönig 1997).

1950 yıllarından günümüze kadar yüzey kaplama malzemlerinin kayma direncinin belirlenmesinde farklı test cihazları kullanılmaktadır (Grönqvıst vd, 1999; Leclercq 1999; Çoşkun, G.,2013). Bu test cihazlarında eğik düzlem test cihazında kayma açısı, pandül test cihazında kayma direnci ve GMG 200 test cihazında sürtünme katsayısı ölçümü yapılmaktadır. Bu test cihazları ile pürüzlü yüzeylerin kayma direnci hem yerinde hem de laboratuvar ortamında kullanılmaktadır. Bu yüzden, uygulamalar için doğru testi ve yöntemi seçmek önemli olmaktadır. Kayma direncinin test edilmesi için aşağıdaki ölçüm ilkeleri kullanılır (Şekil 2).



Şekil 2. Sürtünme katsayısı, kayma açısı ve kayma direnci ölçüm prensipleri (Wetzel vd., 2013).

Zemin kaplamlarının kayma direncini test etmek ve değerlendirmek için bir dizi yöntem ve sistem benimsenmiştir. Zemin kaplamalarının hem laboratuvar ortamında hem de sahada, sürtünme katsayılarının belirlenmesinde Amerika ve Avrupa'da kullanılan her ülkenin kendi standartlarına göre çalışan tasarlanan test cihazları ve ilgili standartları bulunmaktadır.

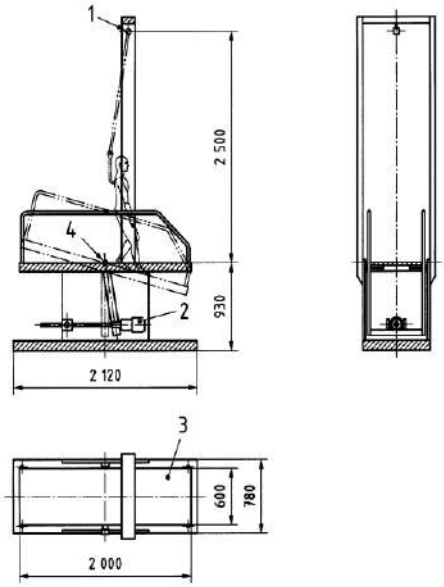
KAYMA TEST YÖNTEMLERİ

Eğik Düzlem Test Cihazı

Eğik düzlem test cihazı yüzey kaplama malzemelerinin farklı ortalamalarda kayma açılarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu cihaz ile yapılan ölçümde çıplak ayak ile yüzey kaplama malzemesinin arasındaki kayma açısının tanjantı (tan Θ = F_h / F_v) sürtünme katsayısı vermektedir (Şekil 3) (Bowman vd., 2002; Miller 1999).

Şekil 3. Cihaz ile test ölçümü görünümü

Test cihazı TS EN 16165 Ek-A ve Ek-B standartlarına göre zemin kaplama malzemelerinin kayma açısının tespitinde ölçüm yapabilmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Eğik düzlem test cihazı çizimi

Eğik düzlem test cihazı 0.6 m genişlik ve -2 m uzunluk olup, 0°-45° arasında saniyede 1° açısal hızla hareket edebilmektedir. Test personeli platformda yürüme sırasında kaymanın gerçekleşmesinde güvenliğini korumak için kemer ve parmaklıkları bulunmaktadır.

a) TS EN 16165 Ek-A Standardı

TS EN 16165 Ek-A standardına göre kayma risklerinin belirlenmesinde çıplak ayakla ıslak zeminlerde yürünen malzemelerin ölçümler yapılmaktadır. Bu test uygulanmasında eşit miktarda 6±1 lt/dk sıvı ölçüm yapılacak malzeme yüzeyine dökülerek ıslatılmaktadır. Cihazın üzerindeki test personeli, suyun aktığı yönde 1°/s eğimde örnek zemin plakası üzerinde hareket etmektedir (Şekil 5).

Şekil 5. TS EN 16165 Ek-A standardına göre test ölçümü

Kritik bölgede en az 3 defa tekrarlanan yukarı ve aşağı gidiş ile güvenli yürüyüş sınırına ulaştığı kayma açısının sonuçlarının ortalaması alınmaktadır. Kayma açılarının ortalaması göre zemin kaplamalarının kullanım alanlarına göre sınıflaması Tablo 1'e göre yapılmaktadır.

Tablo 1. TS EN 16165 Ek-A standardına göre sınıflandırma

Sınıflama	Kritik Açı (°)	Kayma Potansiyeli
A	≥ 12°	Yüksek
B	≥ 18°	Orta
C	≥ 24°	Düşük

b) TS EN 16165 Ek-B Standardı

TS EN 16165 Ek-B standardı göre ayakkabı ile yürünen kuru zemin kaplamalarının yağlanmasıyla kayma risklerinin belirlenmesinde dikkate alınarak ölçümler yapılmaktadır (Şekil 6).

Şekil 6. TS EN 16165 Ek-B standardına göre test ve kalibrasyon işlemi (Çoşkun, 2013).

Bu test yönteminde ayakkabıyla yürünen yüksek kayma riski olan yerlerde kullanılan malzemelerin kaymazlık özellikleri belirlenmektedir. Çalışma alanlarında üretim aşamasında kayganlaştırıcı maddelere maruz kalan (su, yağ, toz, yiyecek, yiyecek atıkları ve bitkisel maddeler) katagoride incelenmiştir. Deneyler başlamadan test personeli kalibrasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Kalibrasyon için üç farklı kalibrasyon plakası (St-I, St-II, St-IIIA) kullanılmaktadır. Kayganlaştırıcı sıvısı olarak 10 W 30 olan motor yağı (SAE J300:1999) kullanılmaktadır. Deneye başlamadan önce malzeme yüzeyine ve test ayakkabısına 200 mL/m² yağ sürülmektedir.

Kalibrasyon işleminden sonra test personeli, EN ISO 20345 tip B şekil S1 veya şekil S2 olan koruyucu ayakkabı giymelidir. Bu ayakkabının tabanı kauçuk poliüretan malzemeden yapılmış olmalıdır. Shore A sertliği EN ISO 868'e göre belirlendiğinde (73 ± 5) olmalı ve Şekil 7'deki profile uymalıdır.

Şekil 7. Profilli deney ayakkabısı tabanı (TS EN 16165 Ek-B)

İlk kullanımdan önce, deney ayakkabısının taban yüzeyinin tamamı dairesel taşlama makinası kullanılarak P400 numaralı silikon karbit zımpara kâğıdı ile zımparalanmalıdır. Bu işlemin amacı tüm yüzey üzerinde birbiriyle tutarlı ve pürüzsüz bir yüzey ve bu yüzey üzerinde tekrarlanabilir sonuçlar elde edilebilmesidir. Zımpara kâğıdında belirgin bir aşınma veya yırtılma meydana geldiğinde zımpara kâğıdı değiştirilmelidir. Yeni zımparalanmış tabanın tozu, deneye başlamadan hemen önce temiz ve yumuşak bir fırça ile alınmalıdır. Ayakkabı tabanları deneyden önce en az 10 dakika boyunca makina yağı ile yağlanmalıdır. Deneyden sonra deney ayakkabısının tabanı yağdan temizlenip kurutulduktan sonra muhafaza edilmelidir. Temizleme amacıyla solvent veya gazyağı kullanılmamalıdır.

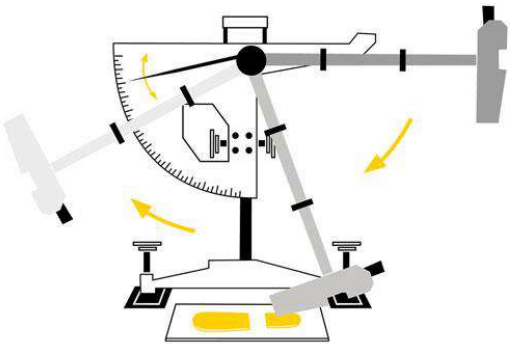
Test personeli kritik bölgede en az 10 defa tekrarlanan yukarı ve aşağı haraket etmektedir. Kayma açılarının ortalaması göre zemin kaplamalarının kullanım alanlarına göre sınıflaması Tablo 2'e göre yapılmaktadır.

Tablo 2. TS EN 16165 Ek-B Standardına göre sınıflandırma

Sınıflama	Kritik Açı (°)	Kayma Potansiyeli
R-	< 6°	Çok Yüksek
R 9	6°-10,0°	Yüksek
R10	10,0°-19,0°	Orta ve Yüksek
R11	19,0°-27,0°	Orta ve Düşük
R12	27,0°-35,0°	Düşük
R13	>35,0°	Düşük

Pandül Test Cihazı

Pandül test cihazı, TS EN 14231 ve TS EN 16165 Ek-C standardına göre ölçüm yapmaktadır. Bu cihaz hem laboratuvar hem de taşınabilir özellikte olup kayma direnç kızağı veya İngiliz sarkaç'ı olarak bilinmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Pandül test cihazı

Pandül test cihazı, kaydırıcı ölçüm aparatı ve deney yüzey malzemesi temasındaki sürtünmeyi ölçmektedir. Ayakkabı altlığını temsilen 4S lastik kauçuk pençe kullanılmaktadır. Deney yüzey malzemesinin kayma direncini belirlemek için 6 farklı pozisyonda 5 farklı ölçüm yapılması suretiyle kayama direnci belirlenmektedir. Aşağıdaki formül kullanılarak pandül test değerinden (PTV), sürtünme katsayı (COF) değeri hesaplanmaktadır.

$$\mu = \left[\frac{110}{PTV} - \frac{1}{3} \right]^{-1}$$

TS 16165 Ek-C standardına göre yüzey malzemelerinin sınıflandırılması Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. TS 16165 Ek-C standardına göre yüzey malzemelerinin sınıflandırılması.

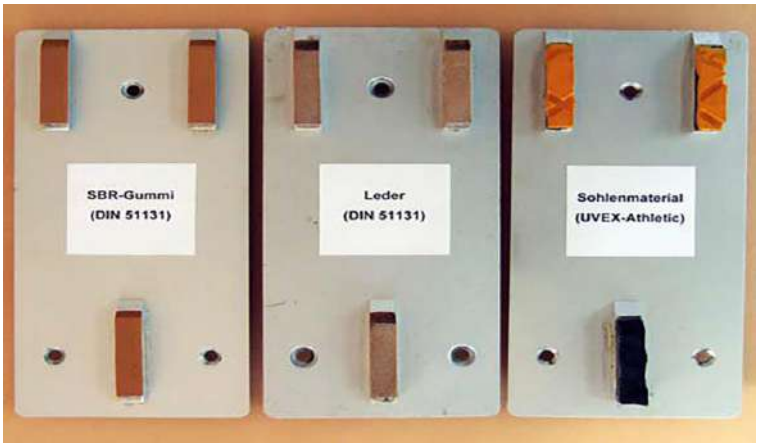
Sınıflama	Pandül Değeri (96)	Kayma Potansiyeli
P5	> 54	Çok Düşük
P4	45-54	Düşük
P3	35-34	Orta
P2	25-34	Yüksek
P1	12-24	Yüksek
P0	< 12	Çok Yüksek

GMG 200 Test Cihazı

Günümüzde yüzey malzemelerinin dinamik sürtünme katsayılarını belirlemek için birçok taşınabilir test cihazları bulunmaktadır. GMG 200 test cihaz Alman GTE şirketi tarafından DIN 51131 standardına göre imalatı gerçekleştirilmiştir. Cihaz taşınabilir olması, mekanik ve elektronik ölçüm teknikleri ile Avrupa'da birçok ülkede kullanılmaktadır. TS EN 16165 Ek-D standardına göre 200 farklı malzeme yüzeyinin sürtünme katsayısını ölçebilmektedir. Cihazın mekanik aksamında makaralar ile sabitlenmiş bir motor tarafından yüzey boyunca sabit hızla cihaz çekilmektedir. Bu test cihazının altında yer alan ayakkabı altlığını temsilen farklı türde ve özelliklerde kullanılan özel pabuçlar yüzeyin statik ve dinamik sürtünme katsayılarını ölçmektedir (Şekil 10).

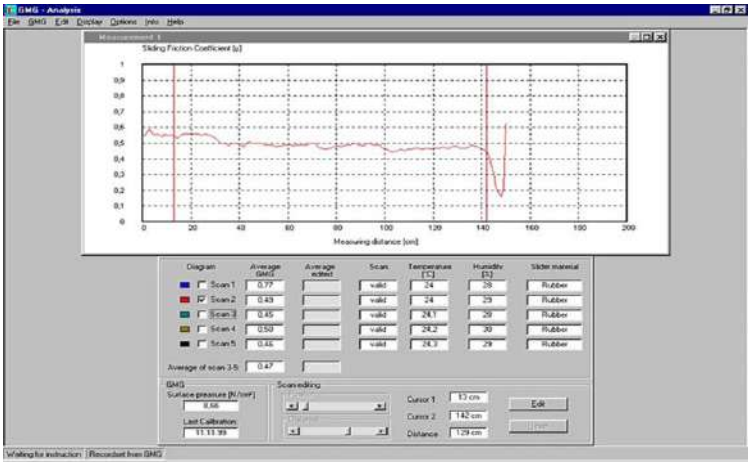
Şekil 9. Sürtünme katsayısı ölçüm test cihazı (GMG 200)

Bu cihazının kontrol ünitesindeki tuşlar kullanılarak farklı ölçüm programları ihtiyaç duyulduğunda değiştirilmektedir. Ölçüm yapılacak yüzey malzemesinde üzerinde gidilecek mesafe ve durma süresi alt menüden ayarlanmaktadır. Ölçüm süresi 1-99 s arasında mesafe ise 30-200 cm aralığında ayarlanmaktadır. Ayakkabı altlığı olarak SBR lastiği (sarı, siyah, mavi ve kırmızı pabuç) olmak üzere dört pabuç tipi kullanılmaktadır (Şekil 9).



Şekil 10. Ölçüm malzemeleri

Ölçümde kullanılan pabuçların değerlere etkisi olduğu için aşınma ve sertleşme durumları kontrol edilerek, 200 ölçümden sonra yenilenmelidir. Ölçümden sonra pabuç yüzeyleri 320 no'lu zımpara ile temizlenmelidir. Bu cihaz ile ölçüme başlamadan önce deneme yapılarak ortama şartlandırılmalıdır. Yüzey malzemesi üzerinde farklı iki ortam ve yönde ölçümler yapılabilmektedir. Ölçüm esnasında dinamik sürtünme katsayısı minimum ve maksimum değerler ortalamaları cihaz ekranında görülürken, istenildiğinde grafik olarak da çıktı alınmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. DCOF değerlerin grafiksel görünümü

Ölçüm yapılacak yüzeyde cihazın altında şerit tel belirlenen mesafe kadar çekilmektedir. Telin ucuna bağlı plakaya ayakla basılarak ölçüm başlatılmaktadır. Cihaz istenilen ölçü mesafesinde hareket etmektedir. Bu işlem 5 defa tekrar edilmektedir. Elde edilen 5 veriden son 3 verinin aritmetik ortalaması alınmaktadır (Şekil 12).

Şekil 12. GMG 200 Sürtünme katsayısı ölçümü

GMG 200 test cihazı alman standardı ve TS EN 16165 Ek-D standardına göre güvenlik sınıflaması belirtmemiştir. Bu nedenle Alman kaza sigortalar birliği tarafından kabul edilmiş Wuppertal güvenlik limit değerleri kullanılmaktadır.

Tablo 4. Wuppertaler Tabelası (Skıba, 1997)

Sürtünme Katsayısı (μ)	Değerlendirme
$\mu \geq 0.60$	Çok Güvenli
$0.45 \leq \mu < 0.60$	Güvenli
$0.30 \leq \mu < 0.45$	Şartlı Güvenli
$\mu < 0.30$	Güvensiz

TARTIŞMALAR

Yüzey kaplama malzemelerinin kaymazlık özelliklerinin belirlenmesinde kayma açısı, kayma direnci, sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler etkilidir. Bu parametrelerin ölçülmesinde birçok ülkede farklı türde ve özellikte kayma test cihazları ve standartları kullanıldığı görülmektedir. Avrupa'da bu konuda yapılan son çalışmalar sonucunda her ülkenin üzerinde anlaştığı ve kabul ettiği TS EN 16165 standardına göre yüzey kaplama malzemelerinin kayma direnci tayin ve değerlendirmeleri yapılmaktadır.

Çıplak ayak ve ayakkabı ile yürünen ıslak ve yağlı ortamlarda kullanılan zemin kaplamalarının kayma risklerinin belirlenmesinde TS EN 16165 Ek-A/B standardına göre eğik düzlem test cihazı ve kullanılmaktadır. Eğik düzlem test cihazı ve ilgili standart tüm Dünya'da altın standart olarak kabul edilmektedir. Özellikle yüzeyi çok pürüzlü zemin kaplamalarının ve endüstride kullanılan birçok demir ızgara vb. malzemelerin ölçümlerinde sonuç verdiği görülmektedir. Bu test yönteminde test personelinin standartlarda belirtildiği şekliyle uygun olması gerekmektedir. Bu test yönteminin diğer test yöntemlerine göre en büyük dezavantajı ise yüksek maliyetli kalibrasyon plakalarının olmasıdır.

Pandül test cihazı ile zemin kaplamalarının ıslak ve kuru ortamda kayma direnci değerleri yine TS EN14231 ve TS EN 16165 Ek-C standardına göre belirlenmektedir. Pandül test cihazı laboratuvar ortamında ve yerinde ölçüm yapmaya son derece uygun olup, kullanım esnasında farklı türde lastik pabuçlar ve ıslak ortam ölçümü için diyonize su kullanılmaktadır. Burada test personelin bu testi yapmaya yetkin biri olması son derece önemlidir. Bunun yanı sıra pandül test cihazı ile ölçümlere başlanılmadan önce standartta yazan ekipmanlar ile kalibre edilmesi ve akabinde teste başlanılması son derece önem arz etmektedir.

GMG 200 test cihazı TS EN 16165 Ek-D standardına göre yüzey kaplama malzemelerinin dinamik sürtünme katsayılarını kuru ve ıslak ortamda laboratuvar ortamında ve yerinde kayma risklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. GMG 200 test cihazı ise tamamen elektronik bir cihaz olup, dinamik sürtünme katsayılarının belirlenmesinde güvenilir ve tekrarlanabilir test değerleri vermektedir. GMG 200 test cihazı Avrupa'da kabul görmüş bir test cihazıdır. GMG 200 test cihazı otomatik olarak ölçüm yaptığı için kişisel hatalar içermez. GMG 200 test cihazı doğal taşlar başta olmak üzere 200'e yakın zemin kaplamasının dinamik sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan bir test cihazı olup ölçüm boyunca zemin kaplamasının sürtünme özelliklerini kaydedebilme özelliğine sahiptir. Alman kaza sigortalar birliği tarafından da ölçüm sonuçları kabul edilmektedir.

Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı, kazaların yaklaşık %40'ının kayma veya takılma ile ilgili olduğunu tahmin ederek kayma direnci parametrelerinin önemine işaret etmektedir. Test yöntemleri ve yönetmeliklerin güncellenmesi ile birlikte, özellikle amaçlanan yüzey kullanımı nedeniyle minimum kayma direnci değerleri atama konusunda bina spesifikasyonları için uluslararası kabul görmüş bir temel oluşturmaktadır. Çoğu ülkede benzer düzenlemeler geliştirilmiştir ve standartlarla birlikte endüstriyel ve kamu hizmet binalarında kullanılan

yüzeylerin kayma direnci özelliklerinin test edilmesini, karşılaştırma ve doğrulamayı mümkün kılmaktadır.

Araştırmacılar tarafından farklı kayma test yöntemleri ile yayaların zemin kaplamaları arasında daha güvenli hareketi için yeni bir kayma riski ölçeği belirlemişlerdir. İnsanların zemin kaplamaları üzerinde güvenle hareket edebilmesi için kayma riski tespit edilmiştir (Çoşkun vd., 2016; Çoşkun 2018; Çoşkun ve Sarıışık 2020).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Genel olarak bakıldığında yüzey kaplama malzemelerinin kayma risklerinin belirlenmesinde her ülkenin kendi standartları ve cihazları vardır. Kayma risk değerlendirmesi konusunda uygulanan standartların ve sınıflamaların her ülke kendi kriterlerin dikkate aldığı için bazen ülkeler arasında bu konularda hukuksal sorunlar çıkabilmektedir. Bu nedenle tüm Avrupa ilkelerinde yapılan çalışmalar sonucunda 02.12.2021 yılında çıkarılan TS EN 16165 standardı ile tüm ülkeler ortak bir noktada buluşmuşlardır. Böylelikle bu konuda ortak bir standart ve bu standartlarda kullanılan test cihazları belirlenmiştir. Fakat bunun yanı sıra Amerika'da ise bu konuda farklı bir standart ve test cihazları kullanılmaya devam etmektedir.

Yapmış olduğumuz araştırmalar sonucunda ıslak ve yağlı ortamlarda kullanılan yüzeyli çok pürüzlü ve demir ızgara gibi zemin kaplamalarının kayma risklerinin belirlenmesinde TS EN 16165 Ek-A ve Ek-B Standardına göre çalışan ve laboratuvar ortamında kullanılan eğik düzlem test cihazının kullanılması son derece uygundur. Bunun yanı sıra zemin kaplamalarının saha da kayma risklerinin belirlenmesinde GMG 200 test cihazının kullanılması test personelinden kaynaklı sorunları ortadan kaldırmasından ve daha hassas güvenilir sonuçlar verilmesinden dolayı kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

1. Barreca F., Cardinali G., Fichera C.R., 2(015). Assessment of flooring slipperiness for food industry buildings. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal Open access at http://www.cigrjournal.org Vol.17, No.2, p.23-30
2. Bowman, R., Quick, G. W., Devenish, D., & Strautins, C. (2002). Practical aspects of slip resistance of stone.
3. Chang Wen-Ruey, Li Kai Way, Huang Yueng-Hsiang, Filiaggi Alfred, Courtney Theodore K., (2019). Objective and subjective measurements of slipperiness in fast-food restaurants in the USA and their comparison with the previous results obtained in Taiwan, Safety Science, Volume 44, Issue 10, December 2006, Pages 891-903, IFMBE Proceedings, vol 74. Springer, Cham
4. Coşkun, G., 2013; "Karbonat Kökenli Bazı Doğal Taşlarda Yüzey İşleme Tekniklerinin ve Pürüzlülüğün Kayma Direncine Etkileri", Doktora Tezi., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, 293,2013.
5. Çoşkun, G., Sarıışık, G., & Sarıışık, A. (2016). Classification of parameters affecting slip safety of limestones. Cogent Engineering, 3(1), 1217821.
6. Çoşkun, G., Sarıışık, G., & Sarıışık, A. (2017). Slip safety risk analysis of surface properties using the coefficients of friction of rocks. International journal of occupational safety and ergonomics.
7. Çoşkun, G. (2018). A new slip safety risk scale of natural stones with statistical Kmeans clustering analysis. Arabian Journal of Geosciences, 11(24), 1-14.
8. Coşkun, G., & Sarıışık, G. (2020). Analysis of slip safety risk by portable floor slipperiness tester in state institutions. Journal of Building Engineering, 27, 100953.
9. Enkhjargal O.E. and Li K.W. (2019). Subjective Ratings of Floor Slippery on Common Indoor and Outdoor Floors, International Journal of Engineering and Technology vol. 11, no. 4, pp. 241-244.
10. Khaday S., Li K.W. (2019). Friction Measurement on Common Floor Using a Horizontal Pull Slip Meter, International Journal of Environmental Science and Development 10(9):275-279
11. Kim, I. J. (2022). Engineering Assessment of Floors/Walkways: Practice for the Prevention of Pedestrian Fall Incidence. In Engineering Metrology for Pedestrian Falls Prevention and Protection (pp. 255-278). Springer, Cham.

12. Li K.W., Chen Y., Zou F., Li N., Duan T. (2019) Perception of risk of tripping under lighting and obstacle conditions. Hum. Factors Man. 29: 529– 536.
13. Lot, A. V., Menegazzo, A. P. M., Brasileiro, C. T., Melchiades, F. G., & Boschi, A. O. (2021). Correlations between the slip resistance and surface roughness of ceramic floor tiles. Research, Society and Development, 10(4), e4410413865-e4410413865.
14. Miller, B.C. (1999). Slip Resistance Standards: Sorting It All Out, Safety & Health, 62-66.
15. Sariisik A., 2009. Safety analysis of slipping barefoot on marble covered wet areas. Safety Science, Vol. 47, Iss. 10, p. 1417-1428
16. Sudoł, E., Małek, M., Jackowski, M., Czarnecki, M., & Strąk, C. (2021). What makes a floor slippery? A brief experimental study of ceramic tiles slip resistance depending on their properties and surface conditions. Materials, 14(22), 7064.
17. Terjék A., Józsa Z., 2015. Analysis of Surface Properties Determining Slip Resistance of Ceramic Tiles, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(3), pp. 393–404.
18. Terjék, A., & Dudás, A. (2018). Ceramic Floor Slipperiness Classification–A new approach for assessing slip resistance of ceramic tiles. Construction and Building Materials, 164, 809-819.
19. Zhu, X., Yang, Y., Zhao, H., Jelagin, D., Chen, F., Gilabert, F. A., & Guarin, A. (2021). Effects of surface texture deterioration and wet surface conditions on asphalt runway skid resistance. Tribology International, 153, 106589.
20. Wetzel, C., Windhövel, U., Mewes, D., & Götte, T. (2013). Rutschgefahren erkennen und vermeiden–Teil 1: Grundlagen, Messverfahren und Anforderungen. Technische Sicherheit 3 (2013) 4, S. 49, 54.

KAYMA ÇERÇEVELERİNİN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİNDE TAŞIMA MATRİSİ YÖNTEMİ

Kanat Burak BOZDOĞAN[1], Duygu ÖZTÜRK[2]

[1]Prof.Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,
ORCID: 0000-0001-7528-2418
[2]Dr.Öğr. Üyesi Ege Üniversitesi,
ORCID: 0000-0001-7800-7438

1. GİRİŞ

Taşıma matrisi yöntemi mekanikte kullanılan etkili yöntemlerden birisi olup tek boyutlu problemlerin çözümünde bazı avantajlar sağlamaktadır. Yöntemin en önemli avantajı çözüme esas sistem matrisinin boyutunun sonlu elemanlar gibi yöntemlere oranla daha küçük olmasıdır. Bu da çözüm süresinin kısalmasına yol açmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile Taşıma Matrisi yöntemi (TMY) 'nin temelleri hemen hemen aynı tarihlerde atılmış olup bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte gelişimleri hızlanmıştır. SEY bir, iki ve üç boyutlu birçok problemin çözümünde kullanılan yaygın bir yöntemdir. TMY yöntemi ise tek boyutlu problemler için geliştirilmiş olup, son zamanlarda iki boyutlu bazı problemlere uygulanmıştır. Ancak henüz iki boyutlu problemlerin çözümünde TMY'nin kullanımı yeterince gelişmemiştir.

TMY ilk kez Holzer (1921) tarafından çubukların burulma titreşimi için geliştirilmiştir [1]. Daha sonra yöntem Myklestad (1945) tarafından kirişlerin eğilme ve burulma titreşimleri için kullanılmıştır [2]. Thomson (1950) tarafından TMY'ini uniform olmayan kirişlerin analizi için kullanmıştır [3].Thompson (1950) ve Haskel (1953) TMY 'ini elastik ortamdaki dalga yayılımının analizine uygulamışlardır [4-5]. Pestel and Leckie (1963) çeşitli elasto-mekanik problemleri TMY ile çözmüşlerdir [6]. Ülkemizde yöntemi ilk kez tanıtan ve kullanan Mustafa İnan olmuştur. İnan (1968)'de Başlangıç Değerleri Yöntemi (TMY) adlı bir kitap yazmıştır [7]. Ülküdaş (1991), sürekli temeller, yanal yüklü kazıklar ve palplanşların analizi için Geçiş matrisi adını verdiği TMY'ini önermiştir [8]. Yıldırım (1997) TMY'ini silindirik olmayan helezon yayların serbest titreşim analizi için kullanmıştır [9]. Bozdoğan ve Kaya (2003) TMY'ini çerçevelerden oluşan binaların birinci ve ikinci mertebeden dinamik analizi için kullanmışlardır [10]. Aköz ve Aksoydan (2005), elastik zemine oturan Timoshenko kirişinin taşıma matrisini elde etmişlerdir [11]. Demirkan ve Artan (2019) nano kirişlerin burkulma analizi için Başlangıç Değerleri Yöntemini kullanmışlardır [12] .Hoerner (1975)'te klasik sonlu elemanlar yönteminde ardışık matris çarpımlarından meydana gelen yuvarlama ve yayılım hatalarını önlemek için Ricatti taşıma matrisi yöntemini geliştirmiştir [13].

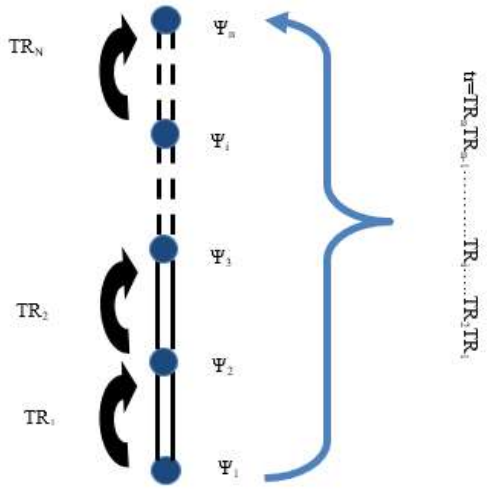
Bazı durumlarda taşıma matrisinin doğrudan bulunması zor olmaktadır. Bu durumlarda taşıma matrisi sonlu elemanlar rijitlik matrisinden elde edilebilmektedir. SEY ile elde edilen matrislerden yararlanılarak TMY'nde kullanılan matrislerin elde edilmesine dayanan Birleşik Sonlu Elemanlar Taşıma matrisi yöntemi (BSETMY) ile ilgili literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır [14-22].

Choi (2003) plakların analizi için için Sonlu elemanlar–Taşıma Rijitliği Katsayısı Yöntemini önermiştir [23]. Rong vd. (2011) Değiştirilmiş Sonlu Elemanlar Taşıma Matrisi Yöntemini (DSETMY) önermişlerdir [24]. Rui vd. (2008) TMY' ini çok gövdeli sistemlerin analizine uyarlamışlardır [25]. He vd.(2012) TMY 'ini ağaç türü sistemlerin titreşim analizinde kullanılmak üzere geliştirmişlerdir [26].

Ozturk vd.(2012) DSETMY yöntemini statik analize uyarlamışlardır [27]. Rui vd. (2018) yayınlamış oldukları kitapta çok gövdeli sistemlerin analizinde taşıma matrisi yönteminin teorik arka planını anlatarak çeşitli uygulamalar yapmışlardır [28]. Bozdoğan ve Maleki (2019) yöntemi ısı problemlerinin çözümü için uygulamışlardır [29]. Feyzollahzadeh ve Bamdad (2020) kirişlerin titreşim analizinde taşıma matrisinin elde edilmesi süresini kısaltan bir algoritma önermişlerdir [30]. Bilican vd. (2021) ise DSETMY'ini tek boyutlu zemin tepki analizlerinde transfer fonksiyonlarının bulunması için kullanmışlardır [31].

2 . TAŞIMA MATRİSİ YÖNTEMİ

Taşıma Matrisi Yöntemi^'nin temel amacı sınır değer problemini, başlangıç değer problemine dönüştürmek olup, yöntem sayesinde ara noktalardaki tüm bilinmeyenler başlangıçtaki bilinmeyenler cinsinden ifade edilmektedir (Şekil 1).

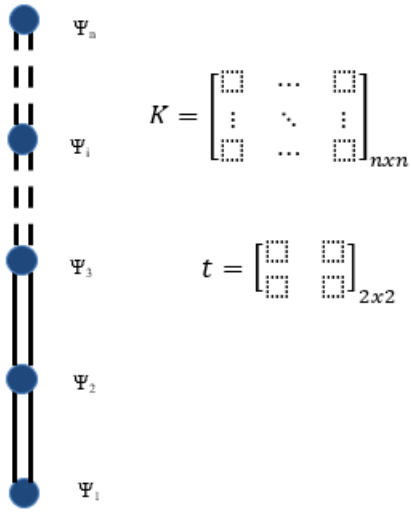


Şekil 1 Taşıma Matrisi Yönteminin şematik

TMY'inin SEY'ne göre bazı avantajları bulunmaktadır bunlar:

1. TMY 'inin boyutu, klasik SEY'e göre çok daha küçüktür.
2. TMY ile hızlı ve pratik olarak çözüme ulaşılabilmektedir.
3. TMY 'inde sistem taşıma matrisinin boyutu eleman sayısından bağımsızdır.

TMY'inin klasik SEY'ne göre matris boyutu açısından avantajı Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2'de her düğüm noktasında bir bilinmeyen olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2 TMY ile SEY 'nin sistem matrisi açısından şematik karşılaştırılması

Şekil 2'den görüldüğü üzere SEY 'ile çözümde sistem matrisinin boyutu n*n olurken, TMY'de sistem taşıma matrisinin boyutu 2*2' dir.

3 . SONLU ELEMANLAR-TAŞIMA MATRİSİ YÖNTEMİ

Taşıma matrisinin doğrudan elde edilemediği durumlarda taşıma matrisi, sonlu elemanlar rijitlik matrisi yardımıyla elde edilebilir. i. eleman için sonlu elemanlar matris denge denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{k_{11}} & \boldsymbol{k_{12}} \\ \boldsymbol{k_{21}} & \boldsymbol{k_{22}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{U_{i-1}} \\ \boldsymbol{U_i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{-Q_{i-1}} \\ \boldsymbol{Q_i} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Burada sırasıyla $\mathbf{k_{11}}$, $\mathbf{k_{12}}$, $\mathbf{k_{21}}$, $\mathbf{k_{22}}$ sonlu elemanlar rijitlik matrisinin alt matrislerini göstermektedir.

i. eleman için taşıma matrisi bağıntısı ise (2) nolu denklemle gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{TR_{11}} & \boldsymbol{TR_{12}} \\ \boldsymbol{TR_{21}} & \boldsymbol{TR_{22}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U_{i-1}} \\ \mathbf{Q_{i-1}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{U_i} \\ \boldsymbol{Q_i} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Burada sırasıyla $\mathbf{TR_{11}}$, $\mathbf{TR_{12}}$, $\mathbf{TR_{21}}$, $\mathbf{TR_{22}}$ eleman taşıma matrisinin alt matrislerini göstermektedir.

(1) ve (2) matris denklemlerinden (3), (4), (5) ve (6) denklemleri yazılabilir.

$$\boldsymbol{TR_{11}} = -\boldsymbol{k_{12}}^{-1}\boldsymbol{k_{11}} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{TR_{12}} = -\boldsymbol{k_{12}}^{-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{TR_{21}} = \mathbf{k_{21}} - \mathbf{k_{22}}\mathbf{k_{12}}^{-1}\mathbf{k_{11}} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{TR_{22}} = -\boldsymbol{k_{22}}\boldsymbol{k_{12}}^{-1} \quad (6)$$

4. DEĞİŞTİRİLMİŞ SONLU ELEMANLAR- TAŞIMA MATRİSİ YÖNTEMİ

DSETMY ilk kez 2011 yılında Rong vd. tarafından geliştirilmiştir [24]. DSETMY ile Ricatti Taşıma Matrisi elde edilmekte olup, bu matrisin boyutu klasik Taşıma Matrisi Yöntemine göre yarıya düşmektedir. Yöntemin kısa açıklaması aşağıda verilmiştir.

Ricatti dönüşüm bağıntısı (7) ve (8) denklemleri ile verilmiştir [24].

$$\boldsymbol{Q_{i-1}} = \boldsymbol{S_{i-1}}\boldsymbol{U_{i-1}} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{Q_i} = \boldsymbol{S_i}\boldsymbol{U_i} \quad (8)$$

(7) ve (8) nolu denklemlerle gösterilen Ricatti dönüşümleri, (1) nolu matris denklemde yerine yazılırsa (9) nolu denklem elde edilir.

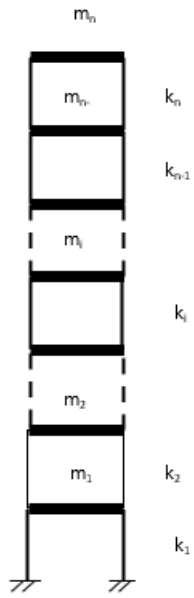
$$\boldsymbol{S_i} = -\boldsymbol{k_{21}}(\boldsymbol{k_{11}} + \boldsymbol{S_{i-1}})^{-1}\boldsymbol{k_{12}} + \boldsymbol{k_{22}} \quad (9)$$

(9) nolu denklem DSETMY'nin ana denklemidir.

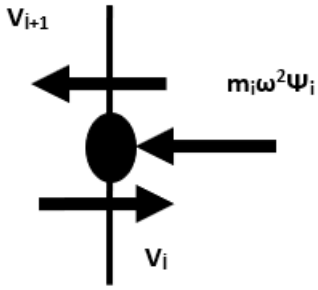
5 . KAYMA TİPİ ÇERÇEVE SİSTEMLERİN TMY İLE SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ

Bir çerçevede kat kesme kuvvetinin o katın yatay rijitliğine oranı göreli kat ötelemesine eşit ise bu tür çerçevelere kayma çerçevesi denir. Bu tür çerçevelerde şekil değiştirme yalnızca kesme kuvvetinden kaynaklanmaktadır [32].

Şekil 4'te görülen kayma çerçevesinde i.kat seviyesinde, Şekil 5'ten görüldüğü üzere yatay kuvvetlerin dengesi için (10) nolu bağıntı yazılabilir [33].



Şekil 4. Kayma çerçevesi



Şekil 5 i.kat seviyesinde yatay kuvvetler

$$V_{i+1} = V_i - \omega^2 m_i \psi_i \tag{10}$$

Burada V_i ve V_{i+1} kesme kuvvetlerini, ω açısal frekansı ve Ψ mod şeklini göstermektedir.

Yapı dinamiğinde kayma çerçevesi kabulü ile (11) nolu denklem yazılabilir.

$$\psi_i - \psi_{i-1} = \frac{V_i}{k_i} = \frac{V_{i+1}}{k_i} + \frac{\omega^2 m_i \psi_i}{k_i} \tag{11}$$

Burada k_i i.katın yatay kayma rijitliğini göstermektedir.

(11) nolu bağıntıdan (12) nolu bağıntı yazılabilir.

$$\psi_i = \psi_{i-1} + \frac{V_i}{k_i} \tag{12}$$

(11) ve (12) nolu denklemlerden (13) elde edilir.

$$V_{i+1} = V_i - \omega^2 m_i \left(\psi_{i-1} + \frac{V_i}{k_i}\right) \tag{13}$$

(13) nolu denklem açık halde (14) nolu denklem şeklinde yazılır.

$$V_{i+1} = V_i - \omega^2 m_i \psi_{i-1} - \omega^2 m_i \frac{V_i}{k_i} \tag{14}$$

(12) ve (14) nolu bağıntılar matris halde (15) nolu matris bağıntı şeklinde gösterilir.

$$\begin{Bmatrix} \psi_i \\ V_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i} \\ -\omega^2 m_i & 1 - \frac{\omega^2 m_i}{k_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_{i-1} \\ V_i \end{Bmatrix} = \boldsymbol{TR_i} \begin{Bmatrix} \psi_{i-1} \\ V_i \end{Bmatrix} \tag{15}$$

(15) nolu bağıntıda $\mathbf{TR_i}$ i. katın taşıma matrisidir.

(15) nolu bağıntı ardışık olarak uygulanırsa aşağıdaki matris eşitlik elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \psi_n \\ V_{n+1} \end{Bmatrix} = \boldsymbol{t} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ V_1 \end{Bmatrix} \tag{16}$$

Burada **t** sistem taşıma matrisi olup, (17) nolu bağıntıda tanımlanmıştır.

$$\boldsymbol{t = TR_n TR_{n-1} \ldots\ldots TR_1} \tag{17}$$

(16) nolu matris denklem açık halde (18) nolu denklem denklem şeklinde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \psi_n \\ V_{n+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} t(1,1) & t(1,2) \\ t(2,1) & t(2,2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ V_1 \end{Bmatrix} \tag{18}$$

(18) nolu matris denklemde t(1,1), t(1,2),t(2,1) ve t(2,2) alt matrisleri, kayma çerçevesi için birer skaler olduklarından koyu harfle gösterilmemiştir.

Kayma çerçevesinde, tabanda yer değiştirme ve tepe noktasında kesme kuvveti sıfırdır.

Bu sınır koşulları (18) nolu bağıntıda uygulanırsa (19) nolu bağıntı elde edilir.

$$t(2,2) = 0 \tag{19}$$

(19) nolu bağıntıda t(2,2) açısal frekansın bir fonksiyonudur.

(19) nolu eşitliği sağlayan ω' lar sistemin açısal frekanslarıdır.

6 .KAYMA TİPİ ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DSETMY İLE SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ

Kayma tipi bir çerçevede SEY'ne göre serbest titreşim analizi için i. katta aşağıdaki denklem yazılır.

$$\left\{\begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m_i \end{bmatrix}\right\}\begin{Bmatrix} \psi_{i-1} \\ \psi_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Q_{i-1} \\ Q_i \end{Bmatrix} \tag{20}$$

(20) nolu denklem düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i - \omega^2 m_i \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \psi_{i-1} \\ \psi_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Q_{i-1} \\ Q_i \end{Bmatrix} \tag{21}$$

(1) nolu matris denklem ile (21) nolu matris denklem arasındaki analojiden (22),(23,(24) ve (25) nolu eşitlikler yazılabilir.

$$\boldsymbol{k_{11}} = k_i \tag{22}$$

$$\boldsymbol{k_{12}} = -k_i \tag{23}$$

$$\boldsymbol{k_{21}} = -k_i \tag{24}$$

$$\boldsymbol{k_{22}} = k_i - \omega^2 m_i \tag{25}$$

(9) nolu bağıntıda, (22),(23),(24) ve (25) nolu denklemlerde yer alan k_{11}, k_{12}, k_{21} ve k_{22} eşitlikleri yazılırsa (26) nolu bağıntı elde edilir.

$$S_i = -\frac{{k_i}^2}{(S_{i-1}+k_i)} + k_i - \omega^2 m_i \tag{26}$$

(26) nolu bağıntının ardışık olarak uygulanabilmesi için öncelikle S_1'in belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için (21) nolu denklem birinci kat için yazılırsa (27) nolu denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 - \omega^2 m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Q_0 \\ Q_1 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

Kayma çerçevesi için birinci katta (7) ve (8) bağıntıları, (28) ve (29) bağıntıları şeklinde yazılır.

$$Q_0 = S_0 \psi_0 \quad (28)$$

$$Q_1 = S_1 \psi_1 \quad (29)$$

(28) ve (29) bağıntıları, (27) nolu matris denklemde yerine yazılırsa (30) nolu denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 - \omega^2 m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -S_0 \psi_0 \\ S_1 \psi_1 \end{Bmatrix} \quad (30)$$

Kayma çerçevesinin mesnetlerinin ankastre olması durumunda $\Psi_0=0$ olacaktır.(30) nolu denklemde bu sınır şartı dikkate alınırsa, (31) nolu bağıntı elde edilir.

$$S_1 = k_1 - \omega^2 m_1 \quad (31)$$

(31) nolu bağıntıdan yararlanarak, (26) nolu bağıntı ardışık olarak yazılırsa en tepe noktasında (32) nolu bağıntı elde edilir.

$$S_n \psi_n = 0 \quad (32)$$

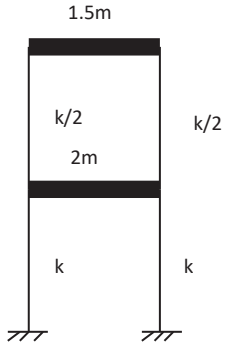
Kayma çerçevesinde tepe noktasındaki kesme kuvveti sıfırdır. Bu sınır koşulu (32) nolu bağıntıda uygulanırsa, (33) nolu bağıntı elde edilir.

$$S_n(2,2) = 0 \quad (33)$$

(33) nolu bağıntının sıfırdan farklı çözümü, kayma çerçevesinin açısal frekanslarını verir.

7 . ÖRNEK

Şekil 6'da verilen iki katlı kayma çerçevesinin açısal frekansları a) TMY b) DSETMY ile bulunmuştur.



Şekil 6 İki katlı kayma çerçevesi

a) TMY ile çözüm

TMY ile çözüm için öncelikle (15) nolu bağıntı her kat için yazılır.

Birinci kat için aşağıdaki bağıntı yazılır.

$$\begin{Bmatrix}\psi_1\\V_2\end{Bmatrix} = \boldsymbol{TR_1}\begin{Bmatrix}\psi_0\\V_1\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & \dfrac{1}{2k}\\ -2\omega^2 m & 1-\dfrac{2\omega^2 m}{2k}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\psi_0\\V_1\end{Bmatrix}$$

İkinci kat için aşağıdaki bağıntı yazılır.

$$\begin{Bmatrix}\psi_2\\V_3\end{Bmatrix} = \boldsymbol{TR_2}\begin{Bmatrix}\psi_1\\V_2\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & \dfrac{1}{k}\\ -1.5\omega^2 m & 1-\dfrac{1.5\omega^2 m}{k}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\psi_1\\V_2\end{Bmatrix}$$

Çözüme esas sistem denklemi ise aşağıdaki gibi yazılır.

$$\boldsymbol{t}\begin{Bmatrix}\psi_0\\V_1\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\psi_2\\V_3\end{Bmatrix}$$

t matrisi eleman taşıma matrislerinin çarpımı olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\boldsymbol{t} = \begin{bmatrix}1 & \dfrac{1}{k}\\ -1.5\omega^2 m & 1-\dfrac{1.5\omega^2 m}{k}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & \dfrac{1}{2k}\\ -2\omega^2 m & 1-\dfrac{2\omega^2 m}{2k}\end{bmatrix}$$

t matrisini oluşturan iki eleman taşıma matrisi çarpılırsa aşağıdaki matris elde edilir.

$$\begin{bmatrix} 1-\dfrac{2\omega^2 m}{k} & \dfrac{3}{2k}-\dfrac{\omega^2 m}{k^2} \\ -3.5\omega^2 m+\dfrac{3m^2\omega^4}{k} & \dfrac{1.5m^2\omega^4}{k^2}-\dfrac{6.5\omega^2 m}{2k}+1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\psi_0\\V_1\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\psi_2\\V_3\end{Bmatrix}$$

Yukarıdaki bağıntı kısaltılmış halde aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} t(1,1) & t(1,2) \\ t(2,1) & t(2,2) \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\psi_0\\V_1\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\psi_2\\V_3\end{Bmatrix}$$

Kayma çerçevesinin sınır koşulları olan, tabanda yer değiştirme ve tepe noktasında taban kesme kuvvetinin sıfır olması koşulu matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılır.

$\psi_0 = 0$

$V_3 = 0$

Sınır koşulları sistem denkleminde uygulanırsa, aşağıdaki matris denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} t(1,1) & t(1,2) \\ t(2,1) & t(2,2) \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}0\\V_1\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\psi_2\\0\end{Bmatrix}$$

Matris denklemin sıfırdan farklı çözümü için aşağıdaki eşitlik sağlanmalıdır.

$t(2,2) = 0$

t(2,2) yerine değeri yazılırsa, aşağıda verilen ve ω açısal frekansın bir fonksiyonu olan cebirsel denklem elde edilir.

$$\frac{1.5m^2\omega^4}{k^2}-\frac{6.5\omega^2 m}{2k}+1=0$$

Burada kısaltma için aşağıdaki tanım yapılabilir.

$$\lambda=\frac{m\omega^2}{k}$$

Bu durumda cebirsel denklem λ'ya bağlı olarak aşağıdaki hale dönüşür.

$1.5\lambda^2 - 3.25\lambda + 1 = 0$

Verilen ikinci dereceden denklemin kökleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$\lambda_1 = 0.37 \quad \lambda_2 = 1.80$

λ'lar bulunduktan sonra açısal frekanslar aşağıdaki gibi bulunur.

$0.37 = \frac{m{\omega_1}^2}{k} \quad 1.80 = \frac{m{\omega_2}^2}{k}$

$\omega_1 = 0.608\sqrt{\frac{k}{\mathrm{m}}} \qquad \omega_2 = 1.342\sqrt{\frac{k}{\mathrm{m}}}$

b) DSETMY ile çözüm

(31) nolu denklemden S_1 değeri aşaıdak gibi hesaplanır.

$S_1 = 2k - 2\omega^2 m$

İkinci kat için ise (26) nolu bağıntı uygulanırsa S_2 Ricatti taşıma matrisi (S) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$S_2 = -\frac{k^2}{(2k - 2\omega^2 m + k)} + k - \omega^2 1.5m$$

Tepe noktasında aşağıdaki bağıntı yazılır.

$$S_2 \psi_2 = 0$$

Yukarıdaki bağıntıda yer değiştirmenin sıfırdan farklı olması için aşağıdaki eşitlik gerçekleşmelidir.

$$S_2 = 0$$

Buradan S_2 değeri yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$\frac{3m^2\omega^4 - 6.5\omega^2 mk + 2k^2}{(3k - 2\omega^2 m)} = 0$$

Yukarıdaki eşitlikte pay sıfır olmalıdır.

$$3m^2\omega^4 - 6.5\omega^2 mk + 2k^2 = 0$$

Yukarıdaki bağıntının her iki yanı $k^{2'}$ye bölünürse aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\frac{3m^2\omega^4}{k^2} - \frac{6.5\omega^2 m}{k} + 2 = 0$$

Burada kısaltma için aşağıdaki tanım yapılabilir.

$$\lambda = \frac{m\omega^2}{k}$$

Bu durumda denklem aşağıdaki hale dönüşür.

$$1.5\lambda^2 - 3.25\lambda + 1 = 0$$

Buradan ikinci dereceden denklemin kökleri aşağıdaki gibi bulunur.

$\lambda_1 = 0.37 \quad \lambda_2 = 1.80$

Açısal frekanslar ise aşağıdaki gibi elde edilir.

$$0.37 = \frac{m{\omega_1}^2}{k} \quad 1.80 = \frac{m{\omega_2}^2}{k}$$

$$\omega_1 = 0.608\sqrt{\frac{k}{\mathrm{m}}} \qquad \omega_2 = 1.342\sqrt{\frac{k}{\mathrm{m}}}$$

KAYNAKLAR

1. Holzer, H.(1921). Die Berechnung der Drehschwingungen. Berlin: Springer,
2. Myklestad, N. O. (1944). A new method of calculating natural modes of uncoupled bending vibration of airplane wings and other types of beams. *Journal of the Aeronautical Sciences (Institute of the Aeronautical Sciences)*, *11*(2), 153–162. https://doi.org/10.2514/8.11116
3. Thompson, W. T. (1950a). Matrix Solution For The Vibration of Non-Uniform Beams. *J. App. Mech*, *17*, 337–339.
4. Thompson, W. T. (1950b). Transmission of Elastic Waves Through a Stratified Solid Media. *J. Appl. Phys*, *21*, 89–93.
5. Haskel, N. A. (1953). The Dispersion of Surface Waves on Multi-layered Media. *Bull. Seism. Soc. Am*, *43*, 17–34.
6. Pestel, E. C., & Leckie, F. A. (1963). *Matrix Methods in Elasto-mechanics*. New York: McGraw-Hill.
7. Inan, M. (1968). *The Method of Initial Values and the Carry-over Matrix in Elastomechanics*. Middle East Technical University,
8. Ülküdaş, M. (1991,Kasım). *Sürekli temeller,yanal yüklü kazıklar ve palplanşların analizinde geçiş matrisi yöntemi,*İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sempozyumu Bildiriler Kitabı,133-148,İzmir
9. Yildirim, V. (1997). Free vibration analysis of non-cylindrical coil springs by combined use of the transfer matrix and the complementary functions methods. Communications in Numerical Methods in Engineering, 13(6), 487–494.
10. Bozdogan, K. B., & Kaya, E. (2003). Taşıyıcı sistemi çerçevelerden oluşan yapıların taşıma metrisi ve dinamik matris yöntemleriyle birinci ve ikinci mertebe dinamik analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18, 31–37.
11. Aköz Y. & Aksoydan M.(2005). Transfer and stiffnes matrix for Timoshenko beams on elastic foundations. ARI The Bulletin of the Istanbul Technical University,54(3),1-16.
12. Demirkan, E., & Artan, R. (2019). Buckling analysis of nanobeams based on nonlocal Timoshenko beam model by the method of initial values. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 19(04), 1950036.
13. Hoerner, G. C. (1975). *The Rıccati Transfer Matrix Method*. Charlottesvile,VA.

14. Dokanish, M. A. (1972). A New Approach For Plate Vibration: Combination of Transfer Matrix and Finite Element Technique. Trans. ASME J. Eng. Ind, 94, 526–530.
15. McDaniel, T. J., & Eversole, K. B. (1977). A combined finite element-transfer matrix structural analysis method. Journal of Sound and Vibration, 51(2), 157–169. ue. *Trans. ASME J. Eng. Ind*, *94*, 526–530.
16. Ghiatti, G., & Sestieri, A. (1979). Analysis of Static and Dynamic Structural Problems by a Combined Finite Element-Transfer Matrix Method. *J. Sound Vibr*, *67*, 35–42.
17. Ohga, M., Shigematsu, T., & Hara, T. (1984). A combined finite element—transfer matrix method. Journal of Engineering Mechanics, 110(9),1335–1349.
18. Degen, E. E., Shephard, M. S., & Loewv, R. G. (1985). Combined finite element-transfer matrix method based on a mixed formulation. Computers & Structures, 20(1–3), 173–180.
19. Chen, Y., & Xue, H. (1991). Dynamic large deflection analysis of structures by a combined finite element-Riccati transfer matrix method on a microcomputer. Computers & Structures, 39(6),699–703.
20. Huiyn, X. (1994). A combined dynamic finite element—Riccati transfer matrix method for solving non-linear eigenproblems of vibrations. Computers & Structures, 53(6), 1257–1261.
21. Yuhua, C. (1995). Large deflection analysis of structures by an improved combined finite element-transfer matrix method. Computers & Structures, 55(1), 167–171.
22. Bhutani, N., & Loewy, R. G. (1999). Combined finite element-transfer matrix method. Journal of Sound and Vibration, 226(5), 1048–1052.
23. Choi, M.-S. (2003). Free vibration analysis of plate structures using finite element-transfer stiffness coefficient method. KSME International Journal, 17(6), 805–815.
24. Rong, B., Rui, X., & Wang, G. (2011). Modified finite element transfer matrix method for eigenvalue problem of flexible structures. Journal of Applied Mechanics, 78(2), 021016.
25. Rui, X., Wang, G., Lu, Y., & Yun, L. (2008). Transfer matrix method for linear multibody system. Multibody System Dynamics, 19(3), 179–207.
26. He, B., Rui, X., & Zhang, H. (2012). Transfer matrix method for natural vibration analysis of tree system. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 1–19.

27. Ozturk, D., Bozdogan, K., & Nuhoglu, A. (2012). Modified finite element-transfer matrix method for the static analysis of structures. Structural Engineering and Mechanics, 43(6), 761–769.
28. Rui, X., Wang, G., & Zhang, J. (2018). Transfer Matrix Method for Multibody Systems: Theory and Applications. John Wiley & Sons.
29. Bozdoğan, K. B., & Khosravi Maleki, F. (2019). An application of the modified finite element transfer matrix method for a heat transfer problem. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 15–28.
30. Feyzollahzadeh, M., & Bamdad, M. (2020). A modified transfer matrix method to reduce the calculation time: A case study on beam vibration. Applied Mathematics and Computation, 378(125238),125238.
31. Bilican, Ö., Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2021). Tek Boyutlu Zemin Büyütme Analizlerinde Transfer Fonksiyonunun Değiştirilmiş Sonlu Elemanlar Taşıma Matrisi Yöntemi ile Elde Edilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi.
32. Paz, M., & Kim, Y. H. (2018). *Structural Dynamics: Theory and Computation* (6th ed.). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
33. Celep,Z.(2018). *Yapı Dinamiği* (5th ed.).İstanbul: Yazarın kendi yayını.

MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI AKILLI KLİNİK KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

Merve ERKINAY ÖZDEMİR

Dr. Öğr. Üyesi İskenderun Teknik Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0001-8864-385X

1. GİRİŞ

Makine öğrenmesi algoritmaların veya sınıflandırıcıların büyük, karmaşık veri kümelerindeki kalıpları öğrenmesini ve faydalı tahmine dayalı çıktılar üretmesini sağlayan bir yapay zeka alanıdır (Erkınay Özdemir, 2021). Makine öğrenmesi algoritmalarının yeni büyük veri kümelerine uygulanması, tıpta klinik uygulama için yararlı etkileri olabilecek yeni eğilimleri ve ilişkileri ortaya çıkarmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemlerinin sağlık hizmetlerinde uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar makine öğrenmesinin sağlık hizmeti kalitesi ve güvenliğinde iyileştirmeler sağlamadaki önemli etkisini göstermiştir (Jordan ve Mitchell, 2015). Başta yapay sinir ağları olmak üzere birçok makine öğrenmesi tabanlı yöntemler, çoğunlukla teşhis ve prognostik izlemeyi kapsayan klinik problemlerin çözümü için tıp alanında kullanılmaktadır.

Doğru ve etkili karar verme sağlık sisteminin temel bileşenlerinden biridir. Sağlık sektörünün kendi karmaşıklığından dolayı, sağlık hizmetlerinde karar verme süreci oldukça zor ve karmaşıktır (Fenning vd., 2019). Karmaşıklığının nedeni, çok sayıda aşamayı içeren belirli sınırlara sahip birbiriyle yakından bağlantılı birçok öğeden oluşmasıdır (Kaur ve Mann, 2018). Bu öğeler, sağlık bakımı, klinik veriler, hasta verileri gibi aşamaları ifade eder.

Sağlık hizmetlerinde uzun süredir hızlı bir gelişme yaşanmaktadır. Karar destek sistemi (KDS) teknolojisi de bu gelişmelerden bir tanesidir. KDS'ler 1950'lerin sonlarından beri sağlık kararlarını desteklemek için kullanılmakta olup, teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte gelişmeye devam etmiştir (Toth, 2016). Son yıllarda, karar destek sistemleri çok sayıda güvenilir sağlık hizmeti sunmuştur. Bu sistemler günümüzde hastalar ve doktorlar arasındaki etkileşimi desteklemekte, bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak hastaların yaşam kalitesini arttırmaktadırlar. Bu sistemler sayesinde doktorlar, hastaların tıbbi kayıtlarına, laboratuvar sonuçlarına, görüntülere ve ilaçlarla ilgili bilgilere her zaman ve her yerden kolayca erişebilmektedir (Horsky vd., 2017). Aynı şekilde hastalar bu sistemler sayesinde, teşhis durumlarından nasıl sağlıklı bir yaşama sahip olacakları bilgilerine kadar erişebilirler. Tıbbi teşhis, bilgi teknolojisi ve tıp bilişimi alanındaki en önemli araştırma konularından biridir ve tıbbi teşhis için akıllı KDS'ler son zamanlarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Bu bilgisayar tabanlı akıllı sistemler, hastaların yaşam kalitesini artırmaya odaklanan engelleri aşmak için bir çözüm olarak önerilmektedir. Bu çözümlerin arasında makine öğrenmesi yöntemleri son yıllarda kullanımı artan temel bir çözüm olarak sunulmaktadır. Akıllı sistemler için bu yöntemler, karar vericilerin anlamlı bilgiler elde etmesine yardımcı olmakta ve büyük sağlık veri kümelerinin anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.

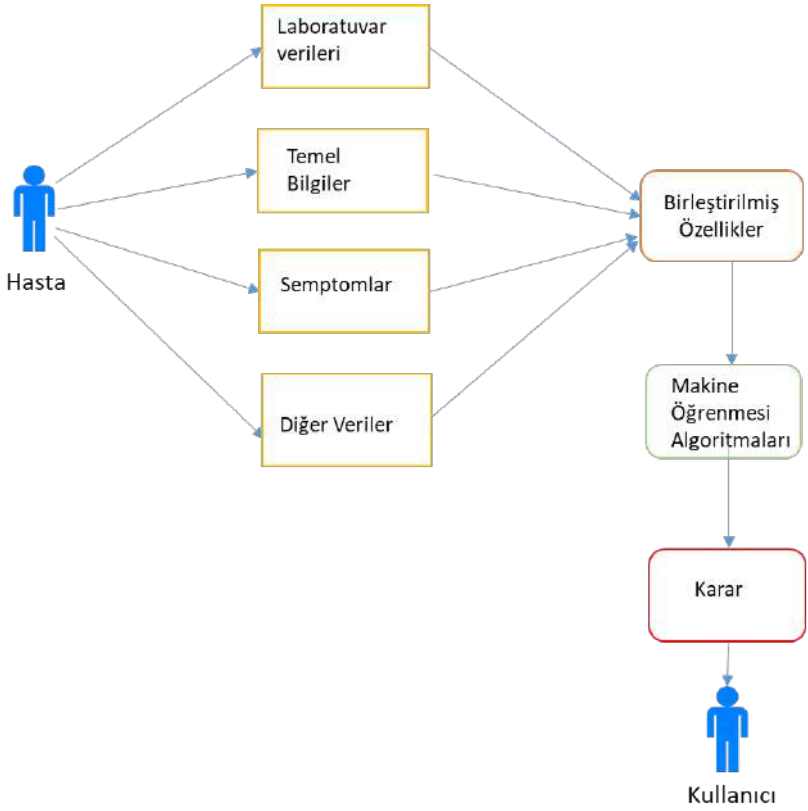
Bu çalışmada, akıllı klinik karar destek sistemleri için en son teknoloji gözden geçirilecek, bu sistemlerin analizi, tartışılması ve eksik konuları tanımlanacaktır. İlgili teknolojiler, yaklaşımlar ve uygulamalar, yeni teorik gelişmeler için birincil eğilimler, çıkarımlar ve gelecekteki araştırma yönleri hakkında bilgiler sunulacaktır.

2. AKILLI KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

Karar destek sistemleri (KDS) insan yaşamının her alanında aktif olarak kullanılmaktadır. Karar destek sistemlerinin karar vericiler tarafından karar verme sürecine bilgi desteği sağlayarak, büyük veri dizilerini işlerken kullanımı geniş oranda yayılmıştır. Akıllı karar destek sistemleri, işletmelerin (kuruluşlar, kurumlar) tüm üretim süreçlerine ve hizmetlerine bilgi desteği sağlamaktadır. Akıllı karar destek sistemleri, ürünlerin tasarımında, imalatında, satışında, finansal ve ekonomik analizde, planlamada, personel yönetiminde, pazarlamada, ürün oluşturma desteğinde (operasyon, onarım) ve perspektif planlamasında kullanılmaktadır

Akıllı Klinik Karar Destek Sistemleri (AKKDS) ise, klinisyenlere, personele, hastalara veya diğer bireylere, sağlık ve sağlık hizmetlerini geliştirmek için akıllıca filtrelenmiş, uygun zamanda sunulan kişiye özel bilgiler sağlayan bilgisayar sistemleridir (Fernandes vd., 2020). Başka bir değişle bir bilgi tabanı kullanmayan, bunun yerine kural yazmaya veya uzman girdisi sağlamaya ihtiyaç duymadan geçmiş deneyimlerden öğrenerek ve teşhis koymak için makine öğrenmesine dayanan başka bir KKDS türüne Akıllı Klinik Karar Destek Sistemi denmektedir.

Şekil 1'de tipik bir AKKDS gösterilmiştir. AKKDS'ler tanı, tedavi yanıtı tahmini, tedavi önerisi (kişiselleştirme), prognoz ve risk seviyelerine göre hasta bakımının önceliklendirilmesi gibi çeşitli amaçlar için tasarlanmıştır. Klinik uygulamada klinisyenler için "ikinci bir göz" olarak yardımcı olarak, insan bilgilerini sisteme gömülü olan "bilgi" ile birleştirirler. AKKDS, hastaların güvenliğini, bakım kalitesini ve sağlık hizmeti verimliliğini artırmanın yanı sıra sağlık hizmeti maliyetlerini düşürmeye yardımcı olmaktadır (Abdel-Basset vd.,2020). Hasta güvenliğini yalnızca tıbbi hataları azaltarak değil, aynı zamanda hastalar veya klinisyenler için ilaçlar ve diğer tıbbi olaylar için hatırlatmalar yoluyla da geliştirebilirler. Ek olarak, AKKDS'ler tıbbi kurum, ekipman ve kalifiye klinisyen sayısının sınırlı olduğu düşük kaynaklı ortamlarda yararlı olmaktadırlar (Shortliffe ve Sepúlveda,2018).



Şekil 1. Akıllı Klinik Karar Destek Sistemi

Tipik bir KKDS şunlardan oluşur:

- Bilgi tabanı: Kuralları ve derlenmiş verilerin ilişkisini içerir.
- Çıkarım motoru: Bilgi tabanındaki kuralları hastanın verileriyle birleştirir.
- İletişim mekanizması: KKDS'nin çıktısını verir.

KKDS, bilgiye dayalı ve bilgiye dayalı olmayan olarak iki başlık altında sınıflandırılabilir (Peiffer-Smadja vd., 2020). Bilgiye dayalı olan KKDS, tıbbi yönergelere ve bilgiye dayanırken, bilgiye dayalı olmayan KKDS tipik olarak makine öğrenimi kullanır. Makine öğrenimi tabanlı KKDS, geçmiş klinik verilerdeki kalıpları bulur ve yeni girdilere dayalı olarak klinik sonuçları tahmin edebilen öngörücü modeller geliştirir (Erkınay Özdemir vd., 2018). Bu sonuçlar daha sonra klinisyenlere uygulamalarında yardımcı olmaları için öneriler olarak kullanılabilir.

Makine öğrenimi tabanlı KKDS, klinik uygulamada büyük bir potansiyele sahiptir. Günümüzde yapılan çalışmalar akıllı KKDS'lerin bir çok alanda

uygulamaları olduğunu göstermektedir. AKKDS'ler kalp hastalıkları, diyabet, çocuk hastalıkları, kanser türlerinin tespiti, medikal görüntülerden hastalık teşhisi gibi birçok alanda; klinik hastalık uyarma, klinik hastalık yönetimi, reçete yazma destek sistemi olarak kullanılmaktadır.

3. AKILLI KLİNİK KARAR DESTEK SİSTEMLERİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ UYGULAMALARI

Makine öğrenmesi, örnek girdilerden bir model oluşturarak, veriye dayalı tahminler veya kararlar vererek statik program yönergelerini izleyerek verilerden öğrenebilen ve veriler üzerinde tahminler yapabilen algoritmaların çalışmasını ve inşasını araştıran bir metodoloji olarak tanımlanır (Janiesch vd., 2021). Öğrenmesi denetimli, denetimsiz ve takviyeli öğrenme olmak üzere üçe ayrılır. Denetimsiz öğrenme, bir girdi akışındaki kalıpları bulma yeteneğidir. Denetimli öğrenmede, daha önce algoritma (test seti) tarafından daha önce hiç görülmemiş örneklere etiketler atayabilen bir sınıflandırıcıyı tasarlamak için bir algoritmaya etiketlenmiş (eğitim seti) örnekler verilir. Denetimli öğrenme algoritmasının amacı, bazı performans ölçümlerini optimize etmektir.

Bir sınıflandırıcı, yapay sinir ağları, destek vektör makinesi, k-en yakın komşu, Gauss modeli, Bayes sınıflandırıcısı, karar ağacı, rastgele orman vb. gibi makine öğrenmesi yaklaşımları kullanılarak eğitilebilir (Sarker, 2021). Bir sınıflandırıcının ne kadar iyi performans gösterdiği, büyük ölçüde sınıflandırılacak verilerin özelliklerine bağlıdır ve belirli bir problem için, özelliklerine ve mevcut verilere dayalı olarak doğru sınıflandırıcıyı seçmek çok önemlidir.

Makine öğrenmesine dayalı bir AKKDS, insan çabası için çok zahmetli olacak problem çözümleri için görüntüleme verileri dahil olmak üzere farklı kaynaklardan karmaşık, çok katmanlı veri kümelerini işlemek için kullanılır. Makine öğreniminden yararlanan KKDS, kliniksel teşhisin, istatistiksel olarak doğru olma ve "uzman" teşhis sistemi oluşturma duyarlılığı ile hekime yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

KKDS'de kullanılan en yaygın makine öğrenimi yöntemleri; Destek vektör makinaları, karar ağacı, rasgele orman sınıflandırıcısı, yapay sinir ağlarıdır. Doğru yöntemi seçmek, eyleme dönüştürülebilir sonuçlara, veri özelliklerine, genel uygulamaya bağlı olarak yüksek sistem doğruluğu elde etmek için çok önemlidir. Bir yöntemin tutarlı, doğru sonuçlar verebilmesi için uygun parametrelerin belirlenmesi ve öğrenme algoritmasının uygun şekilde seçilmesi gerekir (Erkınay Özdemir vd., 2021).

Derin öğrenme son zamanlarda özellikle büyük verilerin işlenmesi ve sınıflandırılması için yine oldukça sık kullanılan makine öğrenmesi

yöntemlerinden biridir. Derin öğrenmede, sistemlerin ham verilerden özellik tespiti veya sınıflandırma için gerekli temsilleri otomatik olarak keşfetmesine izin veren ve derin yapay sinir ağları ve diğer teknikleri gerektiren temsili öğrenmeyi kullanan bir makine öğrenimi tekniğidir. Çoklu gizli katmanlar, derin öğrenmenin daha karmaşık özellikler oluşturmak için sözde özellik hiyerarşisindeki verilerin özelliklerini öğrenmesine izin verir (Chen ve Ran, 2019). Derin öğrenme giriş verilerini (özelliklerini) birkaç katmanlı sinir ağlarına göre daha fazla matematiksel işlem yoluyla işler ve bu nedenle eğitilmesi diğer yöntemlere göre hesaplama açısından daha yoğundur. Derin öğrenme yöntemlerinden biri olan Evrişimsel Sinir Ağları yöntemi özellikle görüntüleme tabanlı KKDS'de oldukça sık kullanılmaktadır (Khorasani vd., 2014).

3.1 Destek Vektör Makinaları-DVM (Support Vector Machines-SVM)

SVM, aykırı değerleri tespit etmek ve sınıflandırma ve regresyon ile ilgili verileri analiz etmek için bir hiper düzlem oluşturan bir algoritmadır. Algoritma, iki kategoriyi doğrusal olarak ayıran bir dizi etiketli eğitim örneği kullanarak, en geniş boşluğu oluşturur. Daha sonra örnekler boşlukta noktalar olarak temsil edilir, böylece yeni örnekler aynı alana eşlendiğinde, düştükleri boşluğun kenarına göre tanımlanırlar. Doğrusal olmayan veriler, istenen herhangi bir uzayda vektörler arasındaki iç çarpımı kullanan çekirdek hilesi kullanılarak doğrusal hale dönüştürülebilir (Cervantes vd., 2020). DVM, klinik yönetim karar modellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, DVM'nin dezavantajları arasında, öznitelik sayısı örnek sayısından fazlaysa düşük performans ve doğrudan olasılık tahminleri sağlayamama yer almaktadır.

3.2. Karar Ağaçları (Decision Trees)

Karar ağacı, tahmine dayalı modelleme için kullanılır ve istatistik, veri madenciliği ve makine öğrenimi kullanarak bir öğe hakkındaki gözlemlerden öğenin hedef değeri hakkındaki sonuçlara gitmek için bir karar ağacı kullanır. İki ana karar ağacı türü vardır ilki, hedef değişkenin ayrık değerler alabildiği ağaç modelleri ve ikincisi hedef değişkenin sürekli değerler alabildiği karar ağaçları. Bir karar ağacı, kararları ve karar vermeyi görsel ve açık bir şekilde temsil etmek için kullanılabilir. Karar ağacı öğrenimi, farklı klinik uygulamalarda otomatik tıbbi teşhis için yaygın olarak kullanılmaktadır (Azar ve El-Metwally, 2013).

3.3. Rasgele Orman (Random Forest-RF)

Rastgele orman veya rastgele karar ormanları, eğitim için çok sayıda karar ağacı oluşturarak sınıfların modu (sınıflandırma) veya ortalama tahmin olan sınıfın çıktısını alarak çalışan, sınıflandırma yapan yöntemdir. Rastgele karar

ormanları, karar ağaçlarının eğitim setlerine fazla uyma alışkanlığını düzeltir. İstenen klinik rehberliğe ve mevcut verilerin türüne bağlı olarak RF, DVM'den üstün olabilir. Meme kanserinin otomatik teşhisi gibi, kanser görüntülemede çeşitli RF yöntemleri kullanılmaktadır.

3.4 Yapay Sinir Ağları-YSA (Artificial Neural Networks-ANN)

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin yapısının modelidir. Nöronlar, bir YSA modeline sahip olmak için birbirlerine bağlanır ve katmanlanır. Bu nöronlar ve onları birbirine bağlayan sinapslar, aşağı yönde bir sonraki nörona iletilen sinyalin gücünü temsil eden sayısal bir değer olan ağırlıklara sahiptir. Ayrıca geçmesine izin verilen sinyalin gücü için bir eşiğe sahiptirler. Bir YSA girdi verilerini alır, etkinleştirilir ve bir sonraki nöron katmanı için bir çıktı üretir. Bu şekilde YSA, bir öğrenme kuralı ile değiştirilebilen yönlendirilmiş, ağırlıklı bir grafik oluşturur (Alkurt vd.,2021). Bu nöronlar arasında hareket eden veri sürecini yönlendiren bu tür kurallar veya işlevler koleksiyonuna YSA modeli denir. Uygulamada kullanılan bir çok YSA modeli bulunmaktadır. Bir evrişimsel sinir ağı (CNN), üstte tamamen bağlı katmanlar bulunan bir veya daha fazla evrişimli katmandan oluşan yapay sinir ağı modelidir. CNN'ler, derin, ileri beslemeli sinir ağlarına kıyasla kolayca eğitilme avantajına sahiptir ve tahmin edilmesi gereken çok daha az parametreye sahiptir. Özellikle büyük veri içeren görüntü tanıma sınıflandırma problemlerinde oldukça başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar.

4. AKILLI KLİNİK KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ

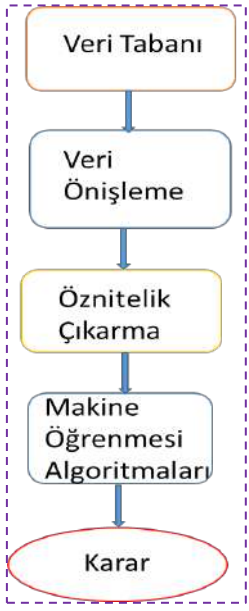
Klinik uygulamada karar vermek için hastaya ait verilerin kullanımı göz önüne alındığında, hastalıkların teşhisine, yönetimine ve takibine yardımcı olmak için tasarlanan AKKDS'nin önemli bir çoğunluğu birden fazla veri gerektirir. Buna ek olarak, AKKDS genellikle yüksek maliyetli görüntüleme yöntemlerinden ve diğer laboratuvar verilerinden yararlanmaya yönelik mantıklı bir yaklaşım sağlamak için kullanılacağı alan merkezli klinik soruları ele almak üzere tasarlanmalıdır. Tipik bir AKKDS aşağıda belirtilen özellikleri sağlamalıdır;

- AKKDS, bir bilgi teknolojisi aracının aksine, çok disiplinli bir klinik bilgi sistemi olarak görülmelidir ve buna uygun bir şekilde planlanmalıdır.
- AKKDS'nin kullanıcıya sunduğu öneriler açık, kısa, kesin, güncel, çeşitli kaynaklardan elde edilmiş ve doğruluğu yüksek olmalıdır.
- İş akışına sorunsuz bir şekilde entegre edilmeli, doktor, hasta ve finansman sağlayıcı için iş akışı verimliğini arttıracak şekilde dizayn edilmelidir.

- AKKDS, klinik performansı etkileyen sorunlar için tasarlanmış olmalı ve bu bağlamda iyi tanımlanmış sorunları çözmeyi hedeflemelidir.
- Kullanıldığı yerde iş akışını iyileştirmelidir.

4.1. Akıllı Karar Destek Sistemleri için Tasarım ve Performans Ölçütleri

AKKDS tasarlanırken probleme uygunluğu, bunun için gerektirdiği tasarım parametrelerinin tanımlanmış olması ve sistemin buna göre tasarlanması sistem performansı açısından en önemli konudur. Kullanılacağı alana göre sistem için uygun ve çeşitli verilerden oluşan bir veri tabanının oluşturulması eğer gerekiyorsa bu verilere ön işleme uygulanarak verilerin kullanıma uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu verilerden gerekli bilgilerin çıkarılması ise sistem performansını etkileyen en önemli noktalardan biridir. Çıkarılan öznitelikler AKKDS'nin uygulanacağı kliniğe ait soruna uygun olarak seçilmiş olan makine öğrenmesi yöntemlerinin girişi olacaktır. Uygun seçilen makine öğrenmesi yönteminin eğitilmesi ve sorunun çözümüne yönelik parametrelerin belirlenmesi ile AKKDS tasarımı genel hatlarıyla belirlenmiş olmaktadır. Son olarak sistem hiç görmediği test verileri ile test edildikten sonra performansı belirlenmektedir. Beklenen performansı gösterene kadar tasarım aşamasında performansı etkileyen parametrelerin değiştirilmesi ve en uygunlarının belirlenip sistemin tasarımı kesinleştirilmelidir. AKKDS'nin tasarım aşamaları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Akıllı Karar Destek Sistemlerinin Tasarım Aşamaları

AKKDS'nin tasarım ve performans başarısını etkileyen faktörler ve alınabilecek önlemler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Şeffaflık: AKKDS'nin önemli bir özelliği hangi sonucu neden verdiğini açıklamamasıdır. Bu durum bu sistemi kullanan klinisyenlerin, çıkarımlarını veya iç görülerini göstermeyen sistemin sonuçlarına güvenme konusunda kendilerini güvende hissetmemelerini sağlar. Bu durum sistemlerin kullanımı etkileyebilir. Bu sorunu çözmek için yüksek doğruluk ve iyileştirilmiş klinik verimliliği (hasta sonuçları açısından) gösteren daha fazla test sonucu ve kanıt toplanmış sistemlerin tasarlanmasıdır.
- Verimlilik ve entegrasyon: Bir AKKDS'nin başarılı bir şekilde uygulanmasında ve doktor kullanımının artmasında kritik olabilecek diğer bir faktör, onun iş akışına dahil edilme şeklidir. Sistemlerin arka planda sorunsuz bir şekilde çalışmasını ve otomatik olarak verileri işlemesini, zamanında, erişimi kolay ve sonraki adımlara uygulanabilir sonuçlar vermesini sağlamak için kullanıcı deneyimi dikkate alınmalıdır. Bilimsel sağlamlığı, hasta merkezli tasarımı, iş akışı verimliliğini, şeffaflığı ve doktor uyumluluğunu geliştirmek için makine öğrenimini akıl yürütmeyle birleştiren ve şeffaf bir yapay zekaya doğru inşa eden kapsamlı AKDDS modelleri ve çerçeveleri benimsenmelidir.
- Uygunluk ve kaynak: Doğru klinik soruların tasarımın merkezinde yer almasıyla, AKDDS, birden fazla kaynaktan ilgili bilgileri çıkarmak ve bunları verilen klinik senaryoyla ilgili olması açısından eyleme dönüştürülebilir sonuçlar üreterek işlenmesi üzerine programlanmalıdır.
- Tutarlılık ve güvenilirlik: AKKDS'nin sağladığı iç görüler açıklanamasa da, sonuçların yine de güçlü istatistiksel analizlerle doğrulanması gerekir. Bu modellerin sağlamlığı, tipik olarak insan performansının, insan ve AKKDS birlikte olan performansı ile karşılaştıran çalışmalar yapılarak değerlendirilir. Bu anlamda, insanın doğru klinik karar vermesine yardımcı olduğu veya yeteneklerini artırdığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, AKKDS'nin rolünün veya etkisinin artması, daha kritik, önemli kararlar alabilmesi için titiz doğruluk ve tekrarlanabilirlik standartlarını karşılaması gerekmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Sağlık sistemlerinde üretilen büyük miktarda veri ve hesaplama kaynaklarının artan kullanılabilirliği, makine öğrenmesi uygulamalarının geliştirilmesi için birçok klinik çalışmayı arttırmıştır. Bu sistemler teşhis, tedavi, prognostik çabalar, takip ve karar vermeyi daha basit, kesin ve verimli hale getirmiştir. Bu,

dünya çapında doktorların yapay zeka çözümlerine karşı daha anlayışlı hale gelmesi ve bunları kabul etmesi gerçeğiyle desteklenmektedir. Ancak tıp uzmanları, makine öğrenimi tabanlı bir çözümün çıktıları ile insan açıklamaları arasındaki tutarsızlıklar yüzünden arada kalmaktadır. Bu sorunu çözmek için, AKKDS için, sonuçların nasıl açıkladığını inceleyen, kalıpları algoritmik biçimlerde resmileştiren ve çıktıları şeffaf, kolay yorumlanabilir bir şekilde açıklayan disiplinler arası çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Makine öğrenmesi uygulamaları hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Özellikle yapay zeka tabanlı AKKDS sık olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak AKKDS'nin önemli bir özelliği hangi sonucu neden verdiğini açıklamamasıdır, bu sorun da bu sistemlerin pratikte alımını, güvenini ve kullanılabilirliğini potansiyel olarak sınırlamaktadır. Yapılan çalışmalar makine öğrenmesi modellerini sağlık hizmetleri açısından açıklanabilir hale getirmek ve ortaya çıkan zorluklara ışık tutmak için, bu tür sistemlerin uygulanmasının farklı disiplinler ve meslekler arasında örtüşmeyi gerektirdiğini vurgulamaktadır (Carvalho vd., 2019). Açıklanabilir ve ispatlanabilir doğruluk oranları klinik uygulamada makine öğrenimi tabanlı AKKDS'nin daha fazla benimsenmesine yol açacak şekilde klinisyenler arasında güven oluşturacaktır.

Makine öğrenmesi tabanlı AKKDS geliştirmek, tüm kullanıcıların ihtiyaçlarını içermesi gereken çok disiplinli bir süreçtir. Sistemin tasarımcıları, sistemleri kullanan karar vericiler ve nihai olarak bu kararların sonuçlarından etkilenenleri dikkate almalıdır. Sistemler ilgili alanlarda uzman kişilerden gelen girdilerle işbirliği içinde inşa edilmelidir.

Öte yandan yapılandırılmamış tıbbi verilerle ilgili sorunlar, kullanılabilir makine öğrenmesi tabanlı sistemlerin geliştirilmesi için bir zorluk olmaya devam etmektedir. Bu sorunla ilgili şu şekilde çözümler sunulabilir:

- Veri gizliliği için uygun korumaların mevcut olması koşuluyla, farklı kaynaklar arasında veri alışverişi,
- Serbest metin olarak ele geçirilmiş olabilecek önemli klinik bilgileri çıkarmak için veri madenciliği tekniklerinin kullanılmasının değerlendirilmesi,
- Klinik kullanım sırasında verileri geliştirmek ve toplamak için yapay zekayı kullanan kontrollü bir tasarım süreci.

AKKDS'nin amacının tam olarak anlaşılması, mevcut sistemlerin performansı, yorumlanabilirliği ve gerekli açıklamaların düzeyi ve doğası dahil olmak üzere, ilgili alana özgü ihtiyaçlar dikkate alınmalıdır. Ek olarak, ne tür açıklamaların sağlanması gerektiğine karar verilirken, kullanıcıların bilişsel becerilerinin yanı sıra etik, adalet ve güvenlikle ilgili çıkarımlar da dikkate alınmalıdır.

AKKDS'nin karar verirken, klinisyenlere, sistemin önerilen teşhisine yol açan gerçeklerin detaylı bir açıklamasını vermesinin güven üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ancak aşırı güven sorunlarına neden olduğu öne sürülmektedir. Öte yandan, daha az ayrıntılı açıklamalar, katılımcıların sistemin güvenilirliğini sorgulamasına ve özgüven sorunlarına neden olması nedeniyle ters etki yaptığı sonucuna varılmıştır (Lakkaraju, 2017). Yanlış AKKDS önerileri klinisyenleri etkileyebilir ve kararların doğruluğunu azaltabilir. Hasta perspektifinden AKKDS'nin hastalar üzerindeki etkisi hakkında çok az çalışma bulunmaktadır. Bunlar gelecekteki araştırmalardan fayda sağlayacak alanlardır.

AKKDS'nin pratikte etkin bir şekilde kullanılabilmesi için güvenilir, kolay anlaşılır ve hepsinden önemlisi insanın karar verme sürecini olumlu yönde artırıcı olması gerekir. Açıklanabilirlik, bu hedeflere ulaşmada kritik bir bileşendir. Açıklanabilirlik, geliştiricilerin bir sistemdeki eksiklikleri belirlemesine olanak tanır ve klinisyenlerin AKKDS yardımı ile aldıkları kararlardan emin olmalarını sağlar. Özellikle açıklanabilirlik ışığında, AKKDS hakkında olumlu görüşler bildiren bazı kullanıcı araştırmalarına rağmen, pratikte kullanımları konusunda hala şüpheler bulunmaktadır. Sistemin açıklanabilirliğinin yararlı uygulamaya nasıl adepte edilebileceğini daha sağlam bir şekilde belirlemek için AKKDS gelişiminin tüm aşamalarına odaklanan çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

1. Abdel-Basset, M., Manogaran, G., Gamal, A., Chang V. (2020). A Novel Intelligent Medical Decision Support Model Based on Soft Computing and IoT. *IEEE Internet of Things Journal*. 7(5): 4160-4170. doi: 10.1109/JIOT.2019.2931647.
2. Alkurt, F.O., Erkinay Ozdemir, M., Akgo,l O., Karaaslan, M.(2021). Ground plane design configuration estimation of 4.9 GHz reconfigurable monopole antenna for desired radiation features using artificial neural network. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 31(8).
3. Amann, J., Blasimme, A., Vayena, E. Frey, D., Madai, V.I. (2020). Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective. BMC Med Inform Decis Mak. 20(310). https://doi.org/10.1186/s12911-020-01332-6.
4. Azar, A.T., El-Metwally, S.M. (2013).Decision tree classifiers for automated medical diagnosis. Neural Comput Appl. 23:2387–403.
5. Carvalho, D.V., Pereira, E.M., Cardoso, J.S. (2019). Machine learning interpretability: A survey on methods and metrics. Electronics. 8:832.
6. Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Lisbeth R.M., Lopez, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. Neurocomputing. 408:189-215. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.10.118
7. Chen, J. Ran, X. (2019). Deep Learning With Edge Computing: A Review. Proceedings of the IEEE. 107(8):1655-1674. doi: 10.1109/JPROC.2019.2921977.
8. Erkınay Özdemir, M., Telatar, Z., Eroğul, O., Tunca, Y. (2018). Classifying dysmorphic syndromes by using artificial neural network based hierarchical decision tree. Australas Phys Eng Sci Med. 41: 451–461. https://doi.org/10.1007/s13246-018-0643-x
9. Erkınay Özdemir, M. (2021). Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Orta Dönem Elektrik Enerjisi Tüketim Tahmini: İskenderun Örneği. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Ejosat Special Issue 2021 (ICAENS). 489-492. DOI: 10.31590/ejosat.1007589.
10. Erkınay Ozdemir, M., Ali, Z., Subeshan, B., Asmatulu, E. (2021) Applying machine learning approach in recycling. J Mater Cycles Waste Manag. 23: 855–871. https://doi.org/10.1007/s10163-021-01182-y.
11. Fenning, S.J., Smith, G., Calderwood, C. (2019). Realistic medicine: changing culture and practice in the delivery of health and social care. *Patient Educ Counsel.* 102(10):1751–1755.

12. Fernandes, M., Vieira, S. M., Leite, F., Palos, C., Finkelstein, S., Sousa, J. M.C.(2020). Clinical Decision Support Systems for Triage in the Emergency Department using Intelligent Systems: a Review. Artificial Intelligence in Medicine, 102.https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101762.
13. Horsky, J., Aarts, J., Verheul, L., Seger, D. L., Sijs, van der H., Bates, D. W. (2017). Clinical reasoning in the context of active decision support during medication prescribing. Int. J. Med. Inform. 97: 1–11.
14. Janiesch, C., Zschech, P., Heinrich, K. (2021).Machine learning and deep learning. Electron Markets 31:685–695. https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2.
15. Jordan, M.I., Mitchell, T.M. (2015) Machine learning: trends, perspectives, and prospects. Science. (80)349:255–260. https://doi.org/10.1126/science.aaa8415.
16. Kaur, J., Mann, K.S. (2018). AI based healthcare platform for real time, predictive and prescriptive analytics. *Commun Comput Inform Sci.* 805(2018):138–149.
17. Khorasani, R., Hentel, K., Darer, J. vd. (2014). Ten commandments for effective clinical decision support for imaging: Enabling evidence-based practice to improve quality and reduce waste. Am J Roentgenol. 203: 945–51.
18. Lakkaraju, H., Kamar, E., Caruana, R., Leskovec, J. (2017). Interpretable & explorable approximations of black box models. arXiv.
19. Peiffer-Smadja, N., Rawson, T.M., Ahmad, R., Buchard, A., Georgiou, P., Lescure, F.X., Birgand, G., Holmes, A.H. (2020). Machine learning for clinical decision support in infectious diseases: a narrative review of current applications. *Clinical Microbiology and Infection*. 26(5): 584-595. https://doi.org/10.1016/j.cmi.2019.09.009.
20. Shortliffe, E.H., Sepúlveda, MJ. (2018). Clinical Decision Support in the Era of Artificial Intelligence. *JAMA*. 320(21):2199–2200. doi:10.1001/jama.2018.17163
21. Sarker, I.H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN COMPUT. SCI*. 2(160). https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x.
22. Toth F. (2016). Classification of healthcare systems: Can we go further?. *Health Policy*, 120(5). 535–543.

POLİETİLEN TEKNE ÜRETİMİ

Mustafa KAFALI

Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi,
Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi
ORCID: 0000-0002-8077-1686

1. Giriş

Fiber takviyeli plastik (FRP) gezinti ve eğlence teknelerinde sahip olduğu mukavemet özellikleri dolayısıyla sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Ancak FRP'nin doğal olarak parçalanması çok uzun sürdüğünden ve geri dönüşümü zor olduğundan kullanımı üzerine kimi ülkelerde bazı kısıtlamalar getirilmeye başlanmıştır (Oh ve diğ. 2017). FRP'nin makul bir şekilde geri geri dönüştürülmesinde yaşanan zorluklar sebebiyle son yıllarda özellikle küçük tekenler için çevre dostu malzeme arayışı bulunmaktadır.

FRP'nin aksine polietilen tekrar kullanılabilecek şekilde geri dönüşümü olan çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Oh ve diğ., 2017). Dolayısıyla polietilenin deniz araçlarında kullanımı önem kazanmaktadır. Polietilen yüksek performanslı malzeme özellikleri dolaysıyla özellikle küçük boyutlu teknelerin üretiminde son zamanlarda tercih edilmektedir. Polietilen tekneler yekpare olarak kalıplama teknolojileri vasıtasıyla ya da polietilen levhaların kesilmesiyle elde edilen küçük parçaların ve polietilen boruların birleştirilmesiyle üretilmektedirler. Kimyasal malzemelere ve korozyona karşı dayanıklı, ayrıca bakım ve boya istemeyen bir ürün olması da özellikle küçük teknelerde yapı malzemesi olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

Tekne üretiminde çelik, alüminyum, FRP, ahşap gibi malzemelerin kullanılanımı için ISO ve klas kuruluşları tarafından çeşitli yapısal standartlar belirlenmiştir. Öte yandan HDPE'den üretilen tekneler için bu gibi standartların kısıtlı olduğu görülmektedir. Örneğin yerli klas kuruluşu Türk Loydu polietilen tekneler için bazı geçici kaideler yayınlamıştır. Polietilen tekne üreticileri genellikle bireysel yapısal standartlar uygulamaktadırlar.

2. Literatür

Polietilen borular muhtelif amaçlarla eskiden bu yana kullanıldığı için polietilen malzemenin kaynağı ile alakalı yapılan çalışmalara göz atıldığında literatürde genellikle polietilen boruların alın kaynağının ele alındığı görülmektedir. Polietilenin deniz araçlarında kullanımı ile alakalı olarak literatür incelendiğinde ise kayda değer sayıda çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. Bu anlamdaki literatür boşluğunun polietilenin deniz araçlarında kullanımının nispeten yeni olmasına bağlı olduğu söylenebilir. Polietilen deniz araçları ile alakalı yapılan çalışmaların genellikle bütün tekne bünyesinin mukavemeti ile alakalı olduğu görülmektedir. Park ve diğ. (2011) çalışmalarında yapısal ve hidrodinamik özelliklerin bir arada değerlendirilerek optimize edildiği basit bir kano tasarlamışlardır. Kano gövdesi polietilen boruların uygun bir şekilde kesilip kaynakla birleştirilmesi ile üretilmiştir. Polietilenden üretilen kanonun diğer malzemelerden üretilen kanolara kıyasla çok daha hızlı üretilebileceği ve

denizcilik performansı açısından da onlarla yarışabilecek bir nitelikte olduğu belirtilmiştir. Ayrıca diğer malzemelerde olduğu gibi polietilen deniz araçlarına uygun malzeme mukavemeti tasarım kurallarının geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Cho (2012) hali hazırda var olan gezinti teknelerin ebatlarını istatistiksel olarak değerlendirip elde ettiği sonuçlardan yola çıkarak tek gövdeli bir polietilen tekne formu tasarlamıştır. Çalışmada tekne tasarımının ISO 12215-5 yapısal tasarım direktiflerinden faydalanılarak gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Daha sonra ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak gerilme analizleri gerçekleştirilmiş ve FRP, çelik ve alüminyum ile kıyaslandığında en kalın gövde malzemesinin HDPE olduğu gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan dizayn gerilmesine göre elde edilen kabuk kalınlığının Kore Sınıflandırma Standartlarına göre hesaplanan değerden 1.8 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Öte yandan bu çalışmada tasarım gerilmesi nominal akma gerilmesinin %27'si olarak 7.3Mpa olarak alınmıştır.

Cho ve diğ. (2013) Japon Küçük Gemi Kontrol Ofisinin önerdiği küçük tekne boyuna mukavemet kurallarının polietilen teknelere uygulanmasını değerlendirmiştir. Çalışmada FRP'ye alternatif olarak polietilen teknenin yapısal mukavemeti ele alınmıştır. FRP malzemenin çekme dayanımının polietilenden daha iyi olmasına rağmen polietilen teknenin mukavemet açısından daha emniyetli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yapısal mükemmellik ve kalite kontrol kolaylığı nedeniyle FRP'ye kıyasla çok daha güvenilir polietilen tekne gövdesi üretilebileceği belirtilmiştir.

ISO 12215-5 standardı, fiber takviyeli plastikler, alüminyum, çelik, ahşap gibi tekne yapım malzemelerinden yapılmış tekne uzunluğu 2.5 m ile 24 m arasında olan tek gövdeli küçük teknelerin mukavemet tasarım özelliklerini açıklamaktadır. Eğer tekne gövdesi uzunluğu 2,5 m'nin altındaysa veya tekne yapım malzemesi olarak standart olmayan malzeme kullanılıyorsa (örneğin HDPE), küçük tekne gövdesinin yapısal güvenilirliği, ISO 12215-5'e göre yapısal tasarım direktiflerine göre değil, düşme testi direktiflerine göre test edilmektedir. Cho (2015) ISO 12215-5 standardında belirtilen malzemelerin dışında kalan malzemelerden üretilen ve tam boyu 2.5m ile 24m arasındaki teknelerin yapısal mukavemetinin tespit edilebilmesi için uygun bir test usulünün belirlenmesi gerektiğini ifade etmiş ve boyuna eğime mukavemeti testinin bu amaçla uygulanabileceğini belirtmiştir. Bu testte tekne baş ve kıç taraftan desteklenerek düzgün bir yayılı yük ile yüklenir ve tekne bünyesinde oluşan şekil değişimi ölçülür. Çalışmada tekne kabuk kalınlığı ve ana taşıyıcı kirişin genişliği tasarım değişkenleri olarak kabul edilmiş ve bu elemanların farklı boyutları için mukavemet analizi yapılmıştır.

ISO 12215-5'de yapısal güvenirliğin tespit edilmesi için belli malzemeler için direktirler bulunmakla birlikte bunların dışında kalan malzemelerden örneğin polietilenden üretilen teknelerin yapısal güvenirliğinin düşürme testi ile gösterilmesi gerekmektedir. Lee ve diğ. (2017) polietilenden üretilen bir tekne ile düşme testi ve statik bir yapısal analiz yapmışlar ve çıktıları kıyaslamışlardır. Sonuçta teknenin yapısal olarak güvenli olduğu belirlenmiş ve teknenin yapısal tasarımı için ISO 12215-5'in düşme testi yönteminin kullanılabileceği teyit edilmiştir. Öte yandan düşürme testine göre belirlenen tekne levha kalınlığının yapısal tasarım basıncına göre hesaplanandan 1.3 kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca HDPE tekne için her iki hesaba göre belirlenen levha kalınlığının çelik malzemeye göre yaklaşık 3 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

Oh ve diğ. (2017) bir polietilen botun aynasında motor bağlanan bölüm için alüminyum alaşımlı levha ile güçlendirilmiş bir tasarım önermişlerdir. Siswandi ve Aryawan (2016), Endonezya'nın Riau Eyaletindeki ilçelerden biri olan Bengkalis bölgesine has ve "pompong" olarak isimlendirilen genellikle ahşap malzemeden imal edilen balıkçı teknelerinin polietilen malzemeden üretilmesi durumunu incelemişlerdir. Cho (2013) tekrarlanan ısıl gerilmeye maruz kalan polietilen bir teknenin istatistiksel yorulma analizini gerçekleştirmiştir. Buna göre termal yorulma hasarının çok az olduğu sonucuna varılmıştır.

3. HDPE'nin Tekne Malzemesi Olarak Kullanımı

HDPE'nin tekne malzemesi olarak kullanımında karşılaşılan en önemli zorluklar polietilenin oldukça esnek ve ısıya karşı duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin polietilenden üretilen bir teknede sıcak havalarda özellikle güneş altındayken meydana gelen genleşme sebebiyle tekne ebadında değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Bu durum ekipmanların tekne bünyesine bağlantılarında bazı sorunlara yol açabilmektedir. Öte yandan polietilen teknelerde uzun şaftların kullanılmasından kaçınılmalıdır. Malzemenin esnek özelliğinden dolayı zamanla şaft hattının hizasında bozulmalar ortaya çıkabilir. Bu sebeple bu teknelerde genellikle su jeti ve kuyruk motor gibi sevk sistemleri kullanılabilir.

Polietilen tekne yapımında iki farklı üretim yöntemi uygulanmaktadır.

1. Kalıplı imalat
2. Kaynaklı imalat

Kalıplı imalatta, özetle, polietilen tozu bir kalıpta basınç ve sıcaklık yoluyla birleştirilmektedir. Bu yöntem büyük bir ilk yatırım maliyeti gerektirmekle birlikte ancak nispeten daha küçük teknelerde kullanılmaktadır. Özellikle denizde yüzen eğlence amaçlı oyuncaklarda ve modüler iskele yapımında bu yöntem kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kaynaklı imalat yöntemi ele alınmıştır. Bu üretim usulüyle 20 m'yi aşan tekneler üretilebilmektedir. Polietilen tekne üretiminde kullanılan malzeme deniz sektörüne özel bir yapıyı haiz olmadığından tekne üretimine özgü özel el aletleri (özellikle kaynak için) ve üretim prosesleri geliştirilmemiştir.

4. Kaynaklı İmalat ile Polietilen Tekne Üretimi

İstisnai durumlar haricinde polietilen malzeme levhalar halinde tedarik edilmektedir. Levhalar kontrplak veya sac da olduğu gibi standart ebatlarda satın alınır (1500 x 3000, 2000 x 4000 veya 2000 x 6000 gibi). Tekne üretiminde kullanılan panellerin kalınlığı 5 mm ile 100 mm arasında değişebilir. Tekne üretiminde genellikle PE 100 sınıfı HDPE malzeme kullanılmaktadır. Bazı durumlarda PE 300 sınıfı HDPE de kullanılır.

HDPE geri dönüştürülen bir malzemedir. Fakat geri dönüştürülmüş hammaddeden üretilen levhaların tekne sektöründe kullanılması tercih edilmez. Çünkü geri dönüşümden üretilen levhaların içyapısının homojen olmaması ve dolayısıyla levhanın farklı kısımlarının değişik mekanik özellikler sergilemesi riski bulunmaktadır. Bu tür levhalar kullanılarak üretilen teknelerde deniz koşullarından kaynaklanan yükler sebebiyle yapısal kusurlar ortaya çıkabilmektedir.

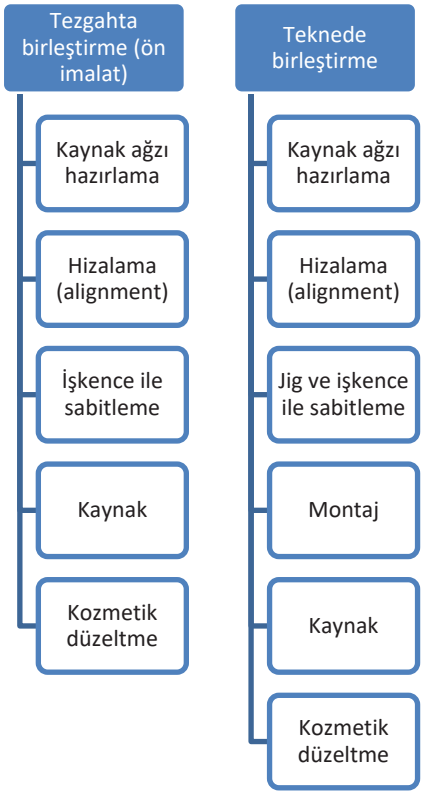
Polietilen üzerine boya uygulaması genellikle tercih edilmez. Bunu yerine teknede kullanılacak renkler polietilen levhalar üretilirken hammaddeye eklenen renklendirme maddesiyle sağlanır. Eğer malzeme yine de boyanmak istenirse, boyanın tutunması için yüzeyin zımpara ile pürüzlü hale getirilmesi, yüzeyin polietilene uygun astar ile kaplanması ve malzemede meydana gelecek esnemeye toleranslı boyaların kullanılması gerekmektedir.

Polietilen levhalar marangoz el aletleriyle (dekupaj, planya vb.) rahatlıkla kesilebilir. Ancak çelik teknelerde olduğu gibi ana kesim işlemleri için nesting çizimleri hazırlanır. Daha sonra ilgili parçalar bilgisayar kontrollü freze tezgâhlarında kesilir (Şekil 1). Polietilen sıcaklığa karşı hassas olduğu için kesim yüzeylerinin aşırı ısınmasına mâni olunmalıdır. Dolayısıyla kesim işleminde frezenin ağır devirli olması tercih edilir. Bu durum kesim işleminin nispeten yavaş olmasına sebep olmaktadır. Öte yandan tekne üretimi sırasında ihtiyaç duyulan elle kesim işlemleri gerçekleştirilirken kesim bölgesindeki ısınmadan dolayı malzeme ergimekte, bu durum hem kesme aletinin arızalanmasına hem de kesilen yüzeyin bozuk olmasına sebep olabilmektedir.

Şekil 1. CNC polietilen levha kesimi.

4.1. Üretim Aktiviteleri

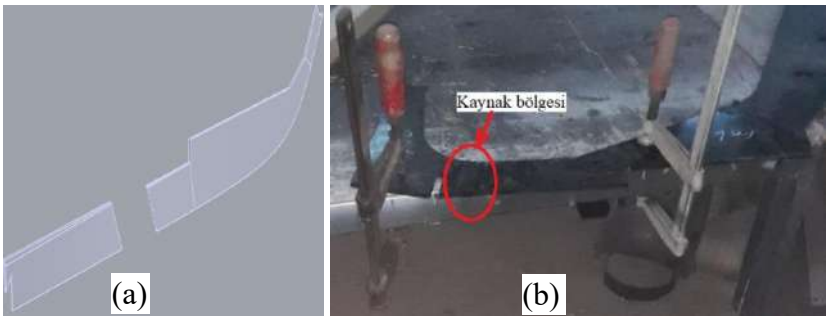
Kaynaklı imalat ile polietilen tekne gövdesi üretiminde karşılaşılan aktiviteler Şekil 2'de verildiği şekilde sıralanabilir.



Şekil 2. Kaynaklı imalat ile polietilen tekne gövdesi üretimi aktiviteleri.

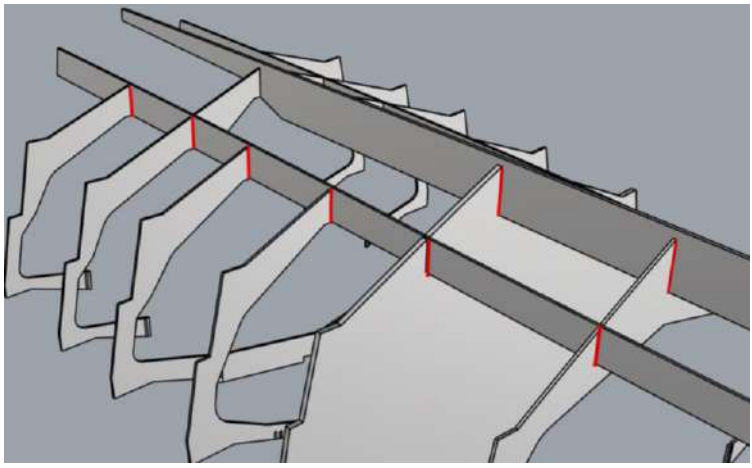
Birleştirilecek olan parçalar öncelikle hizalanmalı ve uygun şekilde sabitlenmelidir. Aksi halde kaynak işleminden sonra elde edilen üründe

çarpılmalar oluşabilir. Kesilen malzeme içinde omurganın iki parçasının birleşimi veya posta gibi tekneye dâhil edilmeden önce birleştirilmesi gereken parçalar var ise ve kalınlık fazlaysa öncelikle açılı freze ile kaynak ağzı açılır. Daha sonra parçalar hizalı olarak uç uca gelecek şekilde çalışma tezgâhına sabitlenir ve kaynağı gerçekleştirilir (ön imalat). Parçalar birleştirme işlemine uygun bir şekilde işkenceler vasıtasıyla tezgâha tutturulmakta kaynak işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına dek soğuyana kadar işkenceler sökülmemektedir (Şekil 3).



Şekil 3. (a) Tekne montajından önce birleştirilmesi gereken omurga parçaları. (b) Kaynak işlemi için işkence vasıtasıyla sabitlenmiş pasta parçaları

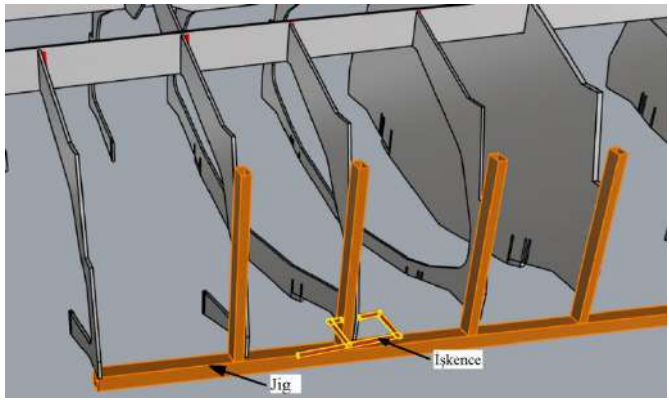
Bazı parçalar teknede birleştirme işlemine tabi tutulur (Şekil 4). Teknede birleştirme işlemi yapılacak olan parçaların hizalama işleminden sonra işkence ile sabitlenmesi mümkün olmayabilir. Bu durumda öncelikle montaj işlemi gerçekleştirilir. Montaj, ilgili parçanın hizalanması ve punta kaynak makinesi ile doğru bir şekilde yerine tutturulmasıdır. Burada punta ile kastedilen bahsedilen basınç uygulamadan sıcak gaz kaynağı tekniğiyle yapılan ince kaynaktır. Genellikle köşe kaynaklarında öncelikle puntalama işlemi yapılır. Böylece her iki parça birleştirilerek nihai kaynak işlemi sırasında uygulanan basma kuvveti ile parçaların birbirinden ayrılması engellenir. Punta işlemi yapılmadan önce polietilen plakadaki oksidasyon tabakasını bertaraf etmek için punta kayağı yapılacak olan kısım mekanik kazıma aletiyle raspalanır yani yüzey kazınır. Şekil 5'te bir el raspa aleti görülmektedir.



Şekil 4. Teknede birleştirme işlemi yapılan parçalar.

Şekil 5. El raspa aleti.

Yapı, belli bir rijitliğe ulaştığı için tekne üzerinde yapılan birleştirme işleminde oluşabilecek çarpılmalara karşı daha dirençli olur. Ancak yine de birleştirilecek parçalar kaynak işleminden önce uygun jigler vasıtasıyla ve işkenceler kullanılarak sabitlenebilir (Şekil 6). Sabitlemenin ve/veya montajın ardından kaynak işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 6. Teknede birleştirme esnasında jig ve işkencelerle sabitleme işlemi.

Polietilen kaynağı, polietilen fitil kullanılarak parçaların birleştirilmesi yoluyla yapılır. Kaynak sırasında fitile ve birleşme ara yüzüne ısı verilerek fitil ve parçaların kaynak ara yüzü eritilir ve basma kuvveti de uygulanarak parçalar birleştirilir. İnce malzemelerin birleştirilmesi sırasında malzemeye verilen ısıdan dolayı deformasyonlar ortaya çıkabilmektedir. Kalın malzemelerde bu durum daha az görülür.

Tekne üretimi sırasında köşe kaynağı, V veya X alın kaynağı, bindirme kaynağı, dış veya iç köşe kaynağı kullanılabilir. Kaynak makinasında her bir kaynak çeşidi için farklı kaynak pabucu kullanılır. Kaynak pabuçları teflondan üretilmektedir. Teknede birleştirme işleminde yapılan kaynakların tipi genellikle köşe kaynağıdır. Birleştirme işlemi yapılacak olan parçalar kalınsa parçaların ucuna kaynak ağzı açılır. Kaynak ağzının türü kaynak makinesinde kullanılan kaynak kafasına göre değişiklik gösterilir. Genellikle V tipi ve de X tipi kaynak ağızları açılır. 20 mm'den kalın malzemede X tipi kaynak ağzı tercih edilir.

Kaynak ağzı hazırlandığında düzgünlüğü (eğimi) bir şablon yardımıyla kontrol edilir. Kaynak ağzı açılırken kesme işleminden dolayı ortaya çıkan yüzey bozukluğunun belli ölçüde giderilmesi gerekmedir. Aksi halde kaynak bölgesinde hava boşlukları gibi kaynak hataları oluşabilir. Polietilen elektrostatik özellik gösteren bir malzeme olduğundan üretim sırasında ortaya çıkan sürtünme hareketlerinden dolayı elektriklenir ve ortamda bulunan toz vs. polietilen yüzeyine yapışır. Kaynak yapılmadan önce bu gibi yabancı maddelerin kaynak bölgesinden temizlenmesi gerekir. Aksi halde bunlar da kaynak hatalarının oluşumuna sebep olur. Bu temizlik sırasında cilde zarar vermemesi için aseton kullanılmaktadır.

Polietilen kaynağında herhangi bir cüruf veya sıçrak oluşmaz. Kaynağın yalnızca gözle muayenesi yapılmaktadır. Duruma göre kaynak işleminden sonra yüzeyde kozmetik amaçlı yüzey düzeltme işlemi yapılır. Yüzey düzeltme işleminde orbital zımpara gibi pasta-cila takımları ve malzemeleri kullanılır. Polietilen malzemenin yüzeyi kolay çizilmektedir. Üretim aşamasında dikkat edilmezse yüzeyde çizikler oluşabilir. Oluşan bu çiziklerin giderilmesi oldukça güçtür ve kozmetik açıdan kötü bir görüntü oluşturur.

Polietilen kaynak makinesinin büyük olmasından dolayı konstrüksiyon resimleri çizilirken bu durum göz önünde bulunmalıdır. Örneğin T profil ve L profil gibi parçalar kaynak yapmayı zorlaştıracağından pek tercih edilmez. Bunların yerine lamalar kullanılır. Genel anlamda aynı mukavemet modülünü sağlayan lamalar T veya L profilden daha ağırdır. Bu sebeple tekne ağırlığı artmaktadır.

Dış kaplama paneli polietilen levhaların birleştirilmesiyle yekpare olarak tezgâhta üretilir. Ortaya çıkan büyük panel daha sonra tekne iskeleti üzerine sarılır. Bu işlemi yapabilmek için tekne ters pozisyonda üretilir.

Nispeten küçük polietilen teknelerin dizaynında borda güverte kesişim bölgelerinde büyük polietilen borular kullanılır ve iskeleti oluşturan postalar bu borulara bağlanır. Büyük boruların kullanıldığı tasarımlarda, boruların konstrüksiyona sağladığı mukavemet sayesinde postaların güverte kemeresine bağlanmasıyla elde edilen kafes yapısının oluşturulması zorunlu değildir.

Teşekkür

Bu çalışmanın hayata geçmesinde bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Gemi İnşa Mühendisi Sn. Ateş Bayram'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kaynaklar

1. Cho, S.S. (2015). Structural Design of Polyethylene Boat Hull by using Longitudinal Bending Strength Test Method. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 16*(12), 8447-8454.
2. Cho, S.S., Kwak, W.-M., Ham, B.-S., & Jo, Y.-C. (2013). A Study on Structural Strength Assessment of Polyethylene Boat. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 14*(3), 1045-1053.
3. Cho, S. S. (2012). Study of Structural Design of Polyethylene Pleasure Boat. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 36*(12), 1551-1561.
4. Cho, S. S. (2013). A Experimental Estimation of Thermal Fatigue at Polyethylene Boat. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 14*(6), 2559-2565.
5. Lee, S.-R., Kang, G.-J., & Cho, S.-S. (2017). Evaluation of Structural Safety of Polyethylene Boats by Drop Test Method. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 18*(5), 531-542.
6. Oh, J., Cho, S., & Ham, B. (2017). Structural design of transom pod for outboard motor in polyethylene boat. *Journal of Mechanical Science and Technology, 31*(12), 5761-5767. doi:10.1007/s12206-017-1118-9
7. Park, C.-K., Kim, M.-G., & Cho, S.-S. (2011). Study on structural analysis and manufacturing of polyethylene canoes. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 35*(3), 309-316.
8. Siswandi, B., & Aryawan, W. D. (2016). High density polyethylene (HDPE) vessel of Pompong as a fishing vessel for Bengkalis fisherman. *IPTEK Journal of Proceedings Series, 3*(2), 108-113.

HDPE MALZEMENİN TEKNE GÖVDESİ ÜRETİMİNDE KULLANIMI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Mustafa KAFALI

Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi
ORCID: 0000-0002-8077-1686

1. Giriş

Polimerler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadırlar. Bununla birlikte işlenme usullerine göre esasen termoplastik ve termoset polimerler olmak üzere iki gruba ayrılabilirler. Termoplastik polimerler yüksek sıcaklıklarda eritilebilir ve tekrar tekrar işlenebilirler. Bunun aksine termoset polimerler eritilip yeniden işlenemezler (Patel, 2017). Polietilen (PE) bir termoplastik türüdür. Polietilenler yapısal özelliklerine bağlı olarak farklı mekanik özellikler sergilemektedirler. Bu niteliği sayesinde değişik PE türleri geliştirilmiş ve PE geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur. Bahsedildiği üzere birçok farklı polietilen çeşidi olmakla beraber pazarda talebi en fazla olan türler Düşük Yoğunluklu Polietilen (Low Density Polyethylene – LDPE), Doğrusal Düşük Yoğunluklu Polietilen Linear Low Density Polyethylene – LLDPE) ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High Density Polyethylene – HDPE) olarak karşımıza çıkmaktadır (Peacock, 2000).

PE'in zaman içinde gelişimine bakıldığında, birinci sırada 1939 yılında Imperial Chemical Industries tarafından ilk olarak LDPE üretilmiştir. İkinci sırada 1960 yılında DuPont Canada'nın ürettiği LLDPE gelmektedir. Üçüncü sırada ise 1961 yılında Phillips Petroleum'un ürettiği HDPE yer almaktadır (Burdett & Eisinger, 2017). Tablo 1'de bu üç PE türü için örnek olması açısından bazı özellikleri verilmiştir. Öte yandan piyasada her bir tür için farklı değerlere sahip PE'ler de bulunmaktadır. Bu sebeple kullanılacak malzemenin üreticisinin beyan ettiği değerler dikkate alınmalıdır.

Tablo 1. HDPE, LDPE ve LLDPE'nin bazı özellikleri (Peacock, 2000).

Özellik	**HDPE**	**LDPE**	**LLDPE**
Density (g/cm^3)	0.94-0.97	0.91-0.94	0.90-0.94
Flexural modulus (GPa @ 23°C)	1.00-1.55	0.24-0.33	0.28-1.10
Tensile modulus (GPa)	1.07-1.38	0.17-0.34	0.26-0.90
Tensile yield stress (MPa)	17.93-31.03	8.96-19.31	7.58-19.31
Tensile strength at break (MPa)	22.06-31.03	8.27-31.03	13.10-44.82
Tensile elongation at break (%)	10-1500	100-650	100-950
Izod impact strength (J/cm of notch)	0.21-2.14	No break	0.19-No break
Melting temperature (°C)	125-132	98-115	100-125
Thermal expansivity (10^-6/°C)	60-110	100-220	70-150

Polietilen endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Önümüzdeki bölümlerde öncelikle LDPE, LLDPE ve HDPE hakkında bazı

bilgiler verilecektir. Bu çalışmanın gayesi özellikle HDPE'nin tekne gövdesi malzemesi olarak kullanımını incelemek olduğundan HDPE üzerinde bir miktar daha detaylı durulacaktır.

2. Düşük Yoğunluklu Polietilen (Low Density Polyethylene – LDPE)

LDPE İkinci Dünya Savaşı sırasında radar kabloları için yalıtkan olarak kullanılmıştır (Britannica). 1940'lı yıllarda ise ticari olarak yaygın bir şekilde ambalaj endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır (Selke & Hernandez, 2001). LDPE normalde oda sıcaklığında tepkimelere duyarlı olmamasına rağmen güçlü oksitleyici maddelerden ve bazı solventlerden etkilenebilmektedir. Sıcaklık 90°C'nin üzerine çıktığında ancak kısa süreli olarak kullanılabilen LDPE, 80°C'ye kadar normal olarak kullanılabilir (Sen & Raut, 2015). LDPE, HDPE'ye nazaran daha hafiftir ancak daha düşük sıcaklıkta eridiğinden ısıl kararlılık söz konusu olduğunda bu durum bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır (Selke & Hernandez, 2001). LDPE'nin diğer dikkat çeken özellikleri işleme kolaylığı, esneklik, çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve rijitliktir (Odetoye, Adeniyi, & Akande, 2020).

LDPE gıda ve gıda dışı ürünlerde ambalaj malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra LDPE ince film olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu bağlamda kâğıt, tekstil ve diğer plastikler üzerinde koruyucu kaplama olarak uygulanmasının yanı sıra plastik poşet imalatında da yer alır (Sen & Raut, 2015).

3. Doğrusal Düşük Yoğunluklu Polietilen (Linear Low Density Polyethylene – LLDPE)

LLDPE ilk geliştirilmesinden bu yana bazı uygulamalarda HDPE ve LDPE'nin yerini almıştır (Baker, 2018). Her ne kadar 1960 yılında ilk üretimi gerçekleştirilmiş ve kullanıma başlanmış olsa da LLDPE'nin ticarileşmesini 1977 yılında Union Carbide firmasının geliştirdiği proses hızlandırmıştır. Düşük basınç altında imal edildiğinden üretimi LDPE'ye nazaran daha düşük maliyetlidir. Daha sonraki yıllarda LLDPE'nin özelliklerini iyileştirmek adına imalat prosesinde muhtelif değişiklikler yaparak farklı firmalar değişik ürünler piyasaya sürmüşlerdir. LLDPE'nin üretim prosesi nihai ürün üzerinde muhtelif etkilere sahiptir bundan dolayı kullanım alanına göre uygun usulle üretilmiş malzeme tercih edilmelidir. Örneğin krom oksit katalizli LLDPE, jeomembranlar gibi kalın film uygulamalarında kullanılırlar. Öte yandan Ziegler–Natta katalizli LLDPE daha gelişmiş tokluk özelliği sergilerken LDPE'ye nazaran daha iyi çekme ve yırtılma dayanımı özelliklerine sahiptir (Patel, 2017).

LLDPE yumuşak ve esnek bir malzemedir. Eşit yoğunluk ve kalınlıkta LLDPE, LDPE'den daha yüksek darbe ve çekme dayanımına, delinme direncine ve uzamaya sahiptir. LDPE gibi, LLDPE'nin de su buharını engelleme özelliği iyidir ama oksijen, karbondioksit ve birçok koku ve aroma bileşiğine karşı düşük bariyer niteliği sergiler (Goswami & Mangaraj, 2011). Bahsedilen esnek yapısı sayesinde LLDPE esnek paketleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bununla birlikte çöp poşetleri, nakliye çuvalları, gıda saklama poşetleri ve ambalajları, streç film, sera filmleri, yerden ısıtma boruları, vb. alanlarda LLDPE kullanımına rastlanır. LLDPE'nin en fazla kullanıldığı alanlardan biri paletleri üzerindeki yüküyle beraber sarmak için kullanılan streç filmlerdir. Diğer kullanım alanları oyuncaklar, su tankları ve kano yapmak için rotasyonel kalıplama (rotational molding) uygulamaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Öte yandan enjeksiyonla kalıplanmış ürünlerin imalatında da bu malzemeye rastlanmaktadır (Patel, 2017).

4. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High Density Polyethylene – HDPE)

Yoğunluğu 0.940 g/cm3'ten büyük olan polietilen HDPE olarak tanınır ve günümüzde en fazla kullanılan polietilen çeşitlerinden biridir. Yüksek derecede kristallik nedeniyle, HDPE reçineleri çok yüksek modül (sertlik) ve mükemmel kimyasal direnç sergiler (Patel, 2017). HDPE %70-80 kristallik derecesine sahiptir. Kristallik derecesi yüksek olan polietilenlerin yoğunluğu daha yüksektir. Ayrıca bunların daha mukavim ve kimyasal etkiye daha dayanıklı olduğu söylenebilir (Baker, 2018). Dolayısıyla kristallik derecesi yüksek olan HDPE bu niteliği ile rijitlik anlamında ve kimyasal aşındırıcılara karşı iyi bir performans ortaya koyar (Patel, 2017). Diğer taraftan kristallik derecesi düşük olan polietilen türlerine göre kristallik derecesi yüksek olan polietilenlerin daha kırılgan olduğu ifade edilmelidir (Baker, 2018).

HDPE'nin yoğunluğu 935-965 kg/m3 aralığındadır. HDPE iyi bir dayanıma sahiptir ve yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır. Örneğin gıda kaplarında, çöp kutularında, çocuk parklarındaki oyun araçlarında, borularda, vb. yerlerde kullanılmaktadır (Crawford, 1998). HDPE'nin mukavim yapısı ve yoğunluğunun deniz suyundan düşük olması onun deniz araçlarının imalatında kullanımı açısından ilgi çekmektedir. Öte yandan malzemenin işlenme koşullarına bağlı olmakla birlikte, HDPE diğer polietilen türleri arasında nihai mukavemet ve elastiklik modülü gibi mekanik özellikler açısından daha iyi bir noktada yer almaktadır. Bununla birlikte HDPE bu özellikler açsından ABS, polipropilen, PVC, PET ve Naylon gibi bazı plastiklere nazaran düşük performans sergilemektedir. HDPE'nin bir diğer avantajı diğer polimerlere nazaran kırılganlaşmadan çok düşük sıcaklıktaki ortamlarda kullanılabilmesidir.

(Mukavemet/ağırlık) yani birim ağırlık başına mukavemet oranı açısından polimerler arasında iyi bir performans sergilemektedir (Baker, 2018).

UV ışınımı polimer zincirleri üzerinde tahrip edici özelliğe sahiptir, bu sebeple HDPE UV ışınımına karşı hassastır ve kırılgan hale gelir. HDPE'nin UV dayanımını arttırmak için en ucuz yol %1-3 oranında karbon siyahı eklemektir. Bu durumda HDPE siyah renk alır. Şayet siyah renk istenmiyorsa UV dayanımını arttırmak için başka yollar da mevcuttur. Diğer taraftan HDPE bozulmaya karşı dirençlidir ve gömüldüğünde binlerce yıl dayanır (Baker, 2018).

ZN ve krom oksit katalizli HDPE reçineleri, LDPE reçinelerine kıyasla çok daha yüksek sertlik ve daha düşük dart darbesi ve yırtılma direnci sergilediğinden, pek çok esnek ambalaj uygulaması için uygun değildirler (Patel, 2017). HDPE'de yüzey çatlamasından ziyade öncelikle çekme ve darbe dayanımı noktalarında mekanik kusurlar gelişir (Zuo & Finnegan, 2017). Ayrıca LLDPE ve LDPE ile karşılaştırıldığında, HDPE daha yüksek bir termal bozulma sıcaklığına sahiptir (Mure, 2017). Bu özelliği ile HDPE'nin daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan mühendislik yapılarında da kullanımı düşünülebilir. HDPE'nin bir diğer özelliği korozif olmayan yapısıdır (Hauger, 2017). Bu niteliği onun deniz şartlarında kullanımı açısından büyük avantaj oluşturmaktadır. Çünkü bilindiği üzere tuzlu deniz suyu son derece korozif bir etkiye sahiptir ve metaller üzerinde ciddi aşınmaya sebep olur. Bundan dolayı çelikten üretilmiş teknelerin özellikle deniz suyu ile temas eden dış yüzeyleri düzgün bir şekilde boyaya hazırlanır ve hassas bir şekilde boyanır. Diğer kısımların boyası da tabi önemlidir. Ayrıca bu yüzeyler muhtelif zamanlarda kontrol edilerek ihtiyaç varsa tamir edilerek çeliğin zarar görmesi engellenmeye çalışılır. HDPE ayrıca elektriksel olarak yalıtkan bir malzemedir.

LDPE ortamdan %0.01 oranında nem emebilirken bu oran HDPE'de %0'dır (Ibeh, 2011). HDPE'nin bu özelliği onun tekne imalatında kullanılabilecek malzeme olarak hatıra gelmesine sebep olan mevhumlardan birisi olarak öne çıkmaktadır. Tekne üretiminde HDPE'nin en fazla handikap oluşturan özelliklerinden birisi çelik, alüminyum alaşımı ve laminasyon planına göre değişiklik gösterse de kompozit gibi malzemelere nazaran daha düşük çekme mukavemeti değerine sahip olmasıdır. Bir diğer husus ultraviyole ışığa karşı olan hassasiyetidir. Ancak bu dezavantajlardan UV hassasiyeti HDPE reçineye eklenen katkı maddeleri vasıtasıyla giderilebilmektedir. Az önce bahsedildiği üzere her ne kadar HDPE, LLDPE ve LDPE ile kıyaslandığında daha yüksek bir termal bozulma sıcaklığına sahip olsa da tekne üretiminde kullanılan alternatif malzemeler bu anlamda HDPE'den daha üstün özellikler sergilemektedir. Çekme mukavemetinin düşük olması HDPE'nin küçük teknelerle kullanım ile sınırlandırılmasına sebep olmaktadır. Öte yandan ısıya olan hassasiyeti üzerinde

durulması gereken en mühim mevzulardan biridir. Bu çalışmada HDPE'nin genel olarak tekne malzemesi olarak kullanımı incelendiğinden bu hususta detaya girilmemiştir.

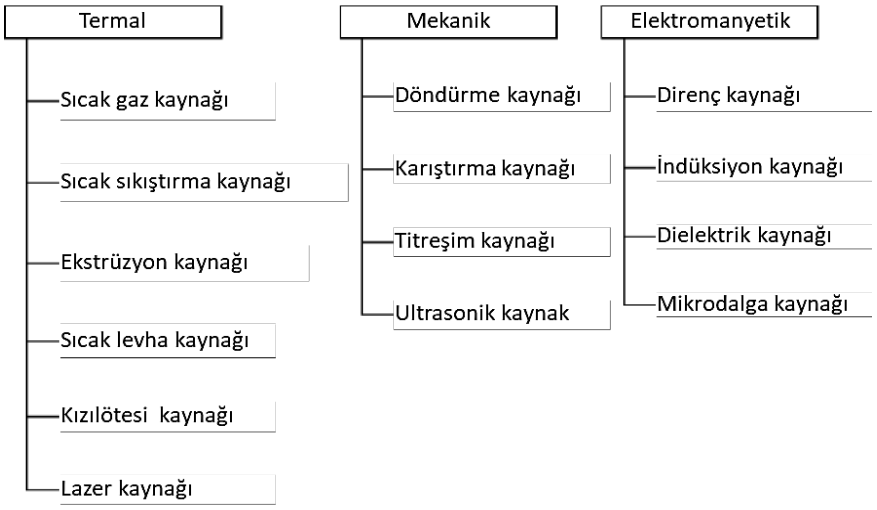
HDPE'nin kristal yapısı ona mekanik olarak üstün nitelikler katarken opak ve mat bir yüzeye sahip olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla HDPE malzemenin farklı renk seçenekleri için pigment karışımı uygulanır. HDPE günlük yaşamın birçok alanında son derece geniş bir uygulama alanı bulur. Mekanik özellikleri sebebiyle bilhassa kano, büyük çöp kutusu, depolama tankı gibi büyük polietilen parçalar üretilirken sıklıkla kullanılır (Peacock, 2000).

Bir termoplastik türü olan HDPE'de moleküller nispeten zayıf Van der Waals kuvveti ile bir arada tutulurlar. Termoplastikler sıcaklığa çok duyarlıdırlar ve ancak belli sıcaklıklarda mühendislik açısından iyi sonuçlar verirler. Isı uygulaması termoplastik moleküllerin hareket etmesini sağlar ve böylece uygun kalıp usulleri ile termoplastikler kolaylıkla şekillendirilebilirler (Crawford, 1998).

Rotasyonel kalıplama (rotational molding) işlemi polietilen tozunun kalıba doldurulması, kalıbın önce ısıtılarak sonra soğutularak döndürülmesi ve en sonunda ürünün kalıptan çıkarılması şeklinde özetlenebilir. Bu şekilde imal edilen nihai ürün iç gerilme ihtiva etmediğinden iyi mekanik özellikler sergiler. Ayrıca hem küçük hem de büyük ürünlerin imalatının yapılabilmesi yanı sıra ucuz ve karmaşık olmayan bir proses olması rotasyonel kalıplamanın cazip olmasını sağlamaktadır. Öte yandan rotasyonel kalıplama işleminin yavaş ve emek yoğun olması istisnaları bulunmakla beraber onun genellikle az sayıda talebin olduğu orta ve büyük ürünlerin imalatında kullanılmasına sebep olmaktadır (Peacock, 2000). Rotasyonel kalıplama usulüyle HDPE'den içi boş parçalar üretilebilir (Schroeck, Minton, Healy, & Keefe, 2017). Örneğin küçük ebattaki botların imalatında bu usulden faydalanılmaktadır.

5. HDPE Parçaların Kaynaklı Birleştirmesi

Termoplastik malzemelerin birleştirme usullerinden birisi de kaynak teknolojisidir. Şekilde 1'de termoplastik malzemelerin kaynağı için kullanılan farklı yöntemler gösterilmiştir. Bu çalışmada sıcak gaz kaynağı ve ekstrüzyon kaynağı metotlarından bahsedilecektir.



Şekil 1. Termoplastik kaynak usulleri (Balkan, Demirer, Ezdeşir, & Yıldırım, 2008).

5.1. Sıcak gaz kaynağı

Kaynak kalitesinin tamamen kaynakçının kabiliyetine bağlı olduğu bu yöntemde dolgu malzemesi olarak kullanılacak olan kaynak çubuğu ve kaynak bölgesi eriyinceye kadar ısıtılır. Daha sonra kaynak çubuğu erimemiş kısmından tutularak el marifetiyle kaynak bölgesine bastırılır (Balkan et al., 2008). Bu usul ile birleştirme yapılırken kullanılan ekipman nispeten ufaktır. Bu sayede tekne üretimi sırasında erişimin zor olduğu dar bölgelerde bu teknik kullanılabilir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında ucuz ve basit bir teknik olmakla birlikte karmaşık ve müşteriye özel ürünlerin imalatında kullanıma uygundur. Sıcak gaz üfleme ekipmanının ucuna kimi uygulamalarda kaynak pabucu olarak tabir edilen ek bir aparat bağlanabilir (Balkan et al., 2008). Kaynak yapılacak yere bağlı olmakla birlikte, kaynak pabucu, dolgu malzemesi olarak kullanılacak olan kaynak çubuğu ve ortama gönderilen sıcak gaz için bir kılavuz görevi görmesi hasebiyle prosesi daha da kolaylaştırabilir. Sıcak gaz kaynağı tekne üretiminde parçaların işçilik resmine göre uygun konumlara montajı sırasında kullanıma uygun bir kaynak tekniği olarak öne çıkmaktadır.

Sıcak gaz kaynağında ana malzeme mukavemetinin %90'ına kadar kaynak mukavemeti elde etmek mümkündür. En uygun kaynak kalitesi için kaynak çubuğunun kaynak yapılacak parçalar ile aynı termoplastikten imal edilmiş olması gerekmektedir. Kaynak yapılmadan önce, birleştirilecek parçaların yüzeyi her türlü kirden arındırılmalıdır. Sıcak gazı ortama gönderen ekipmanın sıcaklık ayarı, kaynağı yapılacak malzeme ile uyumlu olmalıdır. Kaynak bölgesinden aşırı

ısı kaybını önlemek için kaynak ahşap bir yüzey üzerinde yapılmalıdır. Isı emici görevi gördükleri için metal tezgahlardan kaçınılmalıdır. Kaynak yapılacak tüm parçalar, kaynak yapma ve akabindeki soğuma sırasında hareket etmelerini ve çarpılmalarını önlemek için uygun bir şekilde sabitlenmelidirler. Kalın parçaların birleştirilmesi için birden çok kaynak pasosu uygulamak gerekebilir. Bu durumda yeni pasoyu atmadan önce birleşme bölgesinin soğuması beklenmedir. Ayrıca her pasodan önce kaynak bölgesi yeniden temizlenmelidir. Sıcak gaz kaynağının en büyük artısı kaynak ekipmanının hafif olması ve zor pozisyonlarda kullanımının kolaylığıdır (Troughton, 2008).

5.2. Ekstrüzyon kaynağı

Plastik malzemelerin kaynağında malzemeye gelecek yüklere dayanacak sağlıklı bir birleştirme yapılmalıdır. Aynı zamanda kaynak işlemi için kullanılan alet-edevat ile kaynak süresi ekonomik olmalıdır. Ekstrüzyon kaynağı, plastiklerin birleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemlerinden biridir. Bu teknoloji sıcak gaz kaynağından hareketle geliştirilmiştir.

Birleştirme işlemi yapılmadan önce kaynak bölgesi uygun bir şekilde temizlenmelidir. Bunun ardından ekstrüzyon kaynak işleminde kaynak bölgesi ön ısıtmaya tabi tutulur. Akabinde kaynak dolgu malzemesi kaynak ağzına gönderilir. Son olarak ise basınç uygulanarak birleşmenin gerçekleşmesi sağlanır. Ekstrüzyon kaynağında kaynak kalitesi ısıtma miktarına ve ana malzemedeki erimiş tabaka kalınlığına bağlıdır (Michel, 1989). Yine burada kaynak işleminden önce birleştirilecek parçaların sabitlenmesi gerekmektedir. Bunun için işkence gibi bir sıkıştırma sistemi kullanılabilir.

Ekstrüzyon kaynağı genellikle manuel olarak gerçekleştirilmektedir. İşlem sırasında birleştirilecek parçalar ile aynı malzemeden erimiş termoplastik kaynak ağzına doldurulur. Kaynak ağzının yumuşama sıcaklığına kadar önceden ısıtılması sayesinde birleşme bölgesine gönderilen basınçlı erimiş termoplastik birleştirilecek parçalar ile kaynaşır ve birleşme sağlanır. Sıcaklık önemli bir parametre olduğundan kaynak yapmadan önce ekstrüzyon ve ön ısıtma havasının sıcaklığı kontrol edilmelidir. Ayrıca ekstrüder temizlenmeli ve böylece namlusunda önceki kaynak işleminden bir kalıntı bulunmadığından emin olunmalıdır.

Kök pasosu olarak sıcak gaz kaynağı uygulanırsa hem tam penetrasyon sağlanmış hem de ekstrüzyon kaynağı için parçaların birbirine sabitlenmesi sağlanmış olur. Kaynak işlemi ekstrüder üzerine aşağı ve ileri doğru kuvvet uygulanması yoluyla gerçekleştirilirken, kaynak hızı ekstrüzyonun çıkış hızına göre ayarlanmalıdır.

Ekstrüzyon kaynağında tek pasoda kalın bir kaynak dikişi elde edilebilir. Böylece genellikle birden çok paso ihtiyacı bulunmaz. Bu avantajı sayesinde ekstrüzyon kaynağında üretim süreleri önemli ölçüde kısalmaktadır. Ekstrüzyon kaynağında yüksek bir kaynak mukavemeti elde edilebilir. Ekstrüzyon kaynak işleminin en önemli dezavantajı kaynak ekipmanının ağır ve büyük olmasıdır (Troughton, 2008). Tekne imalatı düşünüldüğünde özellikle dar bölgelerde ekstrüzyon kaynak kabiliyeti düşebilir. Ayrıca bu durum dikey kaynak gerçekleştirmeyi operatör için çok zor hale getirebilir.

6. Sonuçlar

Polietilenin son yıllarda kullanıldığı alanlardan birisi de tekne üretim sektörüdür. Her ne kadar kano gibi çok küçük deniz araçlarının imalatı için istisnalar bulunsa da nispeten büyük teknelerin imalatında kullanılan polietilen türü HDPE olmaktadır. Bakım ve boya istemeyen bir ürün olduğu için özellikle küçük hizmet teknelerinde yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. HDPE diğer tekne malzemelerine kıyasla daha esnek ve ısıya karşı daha duyarlı olduğundan HDPE'den üretilen bir teknede sıcaklık artınca meydana gelen yumuşama ve genleşme sebebiyle tekne ebadında değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Bu durum muhtelif sıkıntılara sebebiyet vermektedir.

Polietilen malzemeden kalıplı veya kaynaklı imalat usulleri ile tekne üretilmektedir. Kalıplı imalat nispeten daha küçük teknelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra denizde yüzen eğlence amaçlı oyuncaklarda ve modüler iskele yapımında kalıplı imalat kullanılmaktadır. Kaynaklı imalat yöntemi ile 20 m'yi aşan tekneler üretilebilmektedir. Tekne üretiminde uygulanan malzeme işleme tekniklerinin polietilenden üretilen diğer endüstriyel ürünlerin imalatında kullanılan tekniklerden bir farkı yoktur. Bu durum kendine has zorlukları olan tekne üretim sürecinde verimsizliğe yol açabilmektedir.

Polietilen üzerine boya uygulamak yerine genellikle renkler polietilen levhalar üretilirken hammaddeye eklenen renklendirme maddesiyle sağlanır. Tekne üretimi sırasında öncelikle kaynak ağzı hazırlanır ve parçalar birbirine hizalanır. Daha sonra işkence ile veya başka uygun bir şekilde sabitleme işlemi yapılır. Kaynak işlemine geçmeden önce kaynak ağzı iyice temizlenir. Daha sonra kaynak icra edilir. Birleştirmenin tamamlanmasının ardından kozmetik açıdan kaynak bölgesinde düzeltme işlemi yapılabilir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına dek soğuyana kadar işkenceler sökülmemelidir Ayrıca kaynak işlemi yapılan parçaların çabuk soğuması için harici bir soğutma işlemi uygulanmamalıdır. Bu durum muhtelif kaynak hatalarına sebep olabilir.

Kaynaklar

1. Baker, I. (2018). Polyethylene. In *Fifty Materials That Make the World* (pp. 163-168). Cham: Springer International Publishing.
2. Balkan, O., Demirer, H., Ezdeşir, A., & Yıldırım, H. (2008). Effects of welding procedures on mechanical and morphological properties of hot gas butt welded PE, PP, and PVC sheets. *Polymer Engineering & Science, 48*(4), 732-746. doi:https://doi.org/10.1002/pen.21014
3. Britannica, T. E. o. E. polyethylene. Retrieved from britannica.com/science/polyethylene
4. Burdett, I. D., & Eisinger, R. S. (2017). Ethylene Polymerization Processes and Manufacture of Polyethylene. In M. A. Spalding & A. M. Chatterjee (Eds.), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* (pp. 61-103): John Wiley & Sons.
5. Crawford, R. J. (1998). *Plastics engineering*: Butterworth-Heinemann.
6. Goswami, T. K., & Mangaraj, S. (2011). Advances in polymeric materials for modified atmosphere packaging (MAP). In J.-M. Lagarón (Ed.), *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging* (pp. 163-242): Woodhead Publishing.
7. Hauger, B. E. (2017). Pipe and Tubing Applications of Polyethylene. In M. A. Spalding & A. M. Chatterjee (Eds.), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* (pp. 1109-1123): John Wiley & Sons.
8. Ibeh, C. C. (2011). *Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods, and Applications*: CRC Pres.
9. Michel, P. (1989). An analysis of the extrusion welding process. *Polymer Engineering & Science, 29*, 1376-1381. doi:https://doi.org/10.1002/pen.760291908
10. Mure, C. R. (2017). Rigid Packaging Applications. In M. A. Spalding & A. M. Chatterjee (Eds.), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* (pp. 1091-1107): John Wiley & Sons.
11. Odetoye, T. E., Adeniyi, A. G., & Akande, O. (2020). Valorization of post-consumer polythene water sachet and Parinari polyandra shell residue for composites production. *SN Applied Sciences, 2*(1828), 1828. doi:10.1007/s42452-020-03641-x
12. Patel, R. M. (2017). Types and Basics of Polyethylene. In M. A. Spalding & A. M. Chatterjee (Eds.), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* (pp. 105-138): John Wiley & Sons.
13. Peacock, A. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications*: Marcel Dekker, Inc.

14. Schroeck, P., Minton, R., Healy, T., & Keefe, L. (2017). Chemical Blowing Agents for Polyethylene. In M. A. Spalding & A. M. Chatterjee (Eds.), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* (pp. 909-920): John Wiley & Sons.
15. Selke, S. E., & Hernandez, R. J. (2001). Packaging: Polymers in Flexible Packaging. In K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. Veyssière (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 6652-6656). Oxford: Elsevier.
16. Sen, S., & Raut, S. (2015). Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. *Journal of environmental chemical engineering, 3*, 462-473.
17. Troughton, M. J. (2008). *Handbook of plastics joining: a practical guide* (2 ed.): William Andrew Inc.
18. Zuo, F., & Finnegan, T. (2017). Light Stabilization of Polyethylene. In M. A. Spalding & A. M. Chatterjee (Eds.), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* (pp. 771-791): John Wiley & Sons.

ARAÇLARIN İNTERNETİ

Hakkı SOY

Kurum Bilgisi: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0003-3938-0381

1. Giriş

Otomotiv endüstrisi, İkinci Sanayi Devriminden bu yana teknolojik gelişmelere paralel olarak artan konfor ve güvenlik beklentileri yanında enerji tasarrufu ve düşük emisyon ihtiyacını karşılamak üzere modern araçların üretimini sürdürmektedir [1]. Bu gelişim süreci günümüzde elektrikli araçlar (electrified vehicles), otonom araçlar (autonomous vehicles) ve bağlantılı araçlar (connected vehicles) olmak üzere üç ana başlık altında devam etmektedir [2]. Üretilen araçlar ile birlikte ulaşım altyapını oluşturan kara, hava, deniz ve demiryolları da yeni teknolojiler ile akıllı şehir (smart city) yaklaşımına uygun olarak sürekli olarak iyileştirilmeye devam etmektedir [3].

Özellikle güçlü ekonomiye sahip ülkelerde güncel bilgi ve haberleşme teknolojilerinin (information and communication technologies, ICTs) araçlara ve ulaşım alt yapısına entegre edilmesi ile akıllı ulaşım sistemleri (intelligent transportation systems, ITS) olarak isimlendirilen uygulamalara geçiş için çalışmalara hız verilmiştir. ITS kapsamında algılama, veri analitiği ve haberleşme teknolojileri yanında yönetim stratejileri üzerinde güvenlik, verimlilik ve hareketlilik (mobility) bakımından iyileştirme sağlayacak çalışmalar yapılmaktadır [4-6]. Güncel ITS uygulamalarına örnek olarak trafik lambalarında sabit süreli zamanlama yapmak yerine kuyrukta bekleyen araç sayısını dikkate alarak uyarlamalı (adaptive) zamanlama yapılması ve böylece çevreye verilen olumsuz etkilerin azaltılması verilebilir [7].

Akıllı ulaşım için bağlantılı araçların geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, kablosuz haberleşme teknolojileri anahtar rol oynar. Son yıllarda literatürde sıkça kullanılan Araçların İnterneti (Internet of Vehicles, IoV) kavramı, mobil tasarsız ağ (mobile ad hoc network, MANET) modeli üzerinde geliştirilen geleneksel araçsal tasarsız ağ (vehicular ad-hoc network, VANET) mimarisinin Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) teknolojisine uyarlanmış hali olarak değerlendirilebilir [8]. IoV uygulamalarının öncelikli amacı, internet bağlantısı üzerinden akıllı ve bağlantılı araçlar ile yol altyapısı arasında bilgi alıverişi sağlanmasıdır. Bu şekilde başta yol güvenliğinin artırılması olmak üzere kazaların belirlenmesi, trafik sıkışıklığının azaltılması ve düşük yakıt tüketimi ile seyahat konforunun artırılması hedeflenmektedir [9].

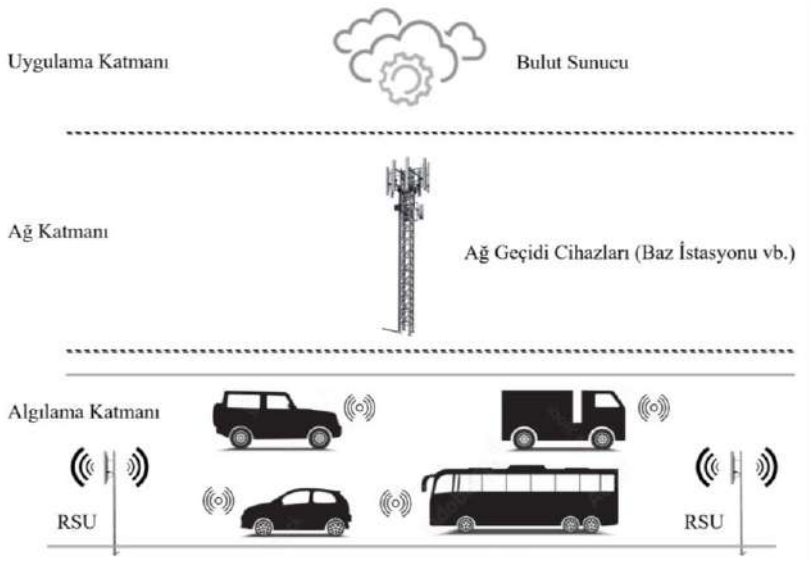
ITS kapsamında hayata geçirilen IoV uygulamalarında artan araç sayısıyla bağlantılı olarak toplanan veri miktarı her geçen gün artmaktadır. Yapılan uygulamalarda sürüş güvenliğini artırmak üzere sürücülere uyarı mesajlarının aktarılması ve yol alt yapısında alınacak önlemlerin tespit edilmesi ancak toplanan ham verilerin işlenmesi, veri kümeleri içinde gizli desenlerin açığa çıkarılması ve anlamlı öngörülerin belirlenmesi ile mümkündür. Bu ihtiyacın karşılanması için büyük veri analitiği (big data analytics) kullanımına

başvurulmaktadır [10]. Son yıllarda özellikle yapay zekâ teknikleri yardımıyla ulaşım sistemlerinin akıllı yönetimine yönelik çok sayıda veriye dayalı modelleme ve karar destek araçları geliştirilmiştir. Büyük veri kümelerinin depolanması ve analiz edilmesi için sınırlı kapasitesi ve işlem gücüne sahip lokal sunucuların kullanımı çoğu zaman mümkün değildir. IoV uygulamalarına esneklik kazandırmak için internet bağlantısıyla erişim sağlanan dünyanın farklı bölgelerinde konumlandırılmış bulut (cloud) adı verilen sunucu bilgisayarlar kullanılmaktadır. Bu model ile sunulan bulut hesaplama (cloud computing) hizmetleri sayesinde, trafikte yaşanan problemlerin çözümü için ITS uygulamalarına yeni bir boyut eklenmiştir [11].

2. Sistem Mimarisi

Tipik bir IoV uygulamasında araçlara ilişkin anlık durum bilgisinin (hız, konum, arıza, hırsızlık vb.) uzaktan takibi yanında, anlık yol ve trafik koşullarının (sıkışıklık, kaza, bakım çalışması, hava durumu, optimal rota bilgisi vb.) sürücülerle paylaşılması mümkündür. Oluşturulan araçsal tasarsız ağ içinde düğüm olarak, hareket halindeki araçlar üzerinde bulunan yerleşik birimler (on-board units, OBUs) ve sabit konumlu yol kenarı birimleri (road side units, RSUs) olmak üzere iki temel bileşen yer alır. OBU donanım olarak mikrokontrolör, RF haberleşme birimi, GPS, çeşitli sensörler ve dış dünya ile etkileşim için giriş-çıkış (I/O) arabirimine sahiptir. Araçların birbirleriyle doğrudan haberleşmesinin mümkün olmadığı durumlarda, araçlar arasında RSU'lar aracılığı ile bağlantı kurulması mümkündür. Yol boyunca dağıtılmış RSU'lar arasında çok atlamalı (multi-hop) veri transferi gerçekleştirilmesi halinde, araçsal ağın kapsama sahası genişletilebilir. Bu şekilde hücresel şebeke üzerinden araçlara internet erişimi sağlanamadığı durumlarda, RSU'lar üzerinden servis verilebilir [12].

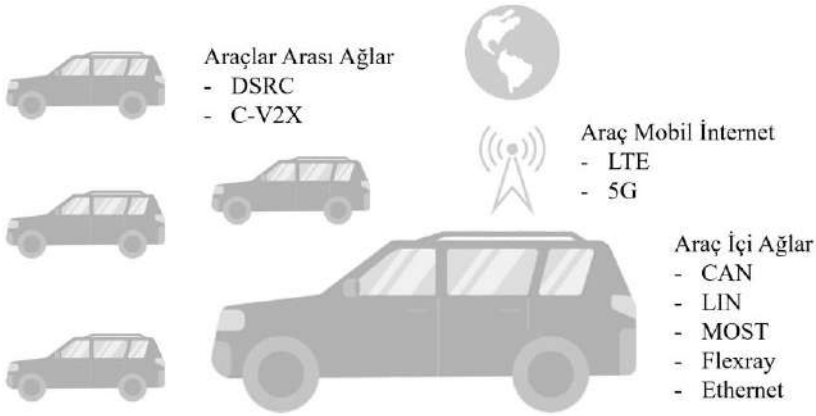
IoT sistem mimarisi referans alınarak, IoV uygulamaları için genellikle Şekil 1'de gösterildiği gibi algılama, ağ ve uygulama olmak üzere üç farklı katmandan oluşan sistem mimarisi ile uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Algılama katmanında araçlar ve yol altyapısı üzerinde yerleştirilen sensörler bulunur. Ağ katmanında toplanan sensör verilerinin uygulama katmanına aktarılmasından sorumlu ağ geçidi (gateway) vb. cihazlar yer alır. Mobil operatörler tarafından işletilen, kullanıma hazır altyapıya sahip olma avantajından dolayı bulut sunucu bağlantısı çoğu zaman hücresel haberleşme sistemlerine dahil baz istasyonları ile gerçekleştirilmektedir. Bunun dışında Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX vb. farklı haberleşme teknolojileri kullanılması halinde uygun ağ geçidi seçimine bağlı olarak sensör verilerinin uygulama katmanında bulunan uzak sunucuya aktarımı gerçekleştirilir [13].



Şekil 1. IoV uygulamaları için üç katmanlı ağ mimarisi

3. Haberleşme

IoV uygulamalarında araç sensör verileri bulut sunucusunda toplanır, toplanan veriler burada analitik yöntemlerle değerlendirilir ve bu değerlendirme sonucunda elde edilen anlamlı çıkarımlara dayalı olarak sürücülere ve trafik yönetim merkezlerine karar desteği sağlanır. Geniş bir coğrafi alan üzerinde dağıtılmış, farklı özellikte (heterojen) cihazlara donatılmış çok sayıda araç arasında etkin bir haberleşme sağlanması çok kolay değildir. Bu bağlamda IoV, farklı haberleşme teknolojileri kullanılarak araçların çevresiyle veri alışverişi gerçekleştirmesine imkân sağlayan karmaşık bir kablosuz ağ uygulamasıdır [14]. Veriye dayalı araç takibi ve trafik yönetimi için gerekli haberleşme fonksiyonları Şekil 2'de gösterildiği gibi araç içi (intra-vehicle) ağlar [15], araçlar arası (inter-vehicle) ağlar [16] ve araç mobil internet erişimi [17, 18] olmak üzere üç farklı bağlantı ile sağlanır.

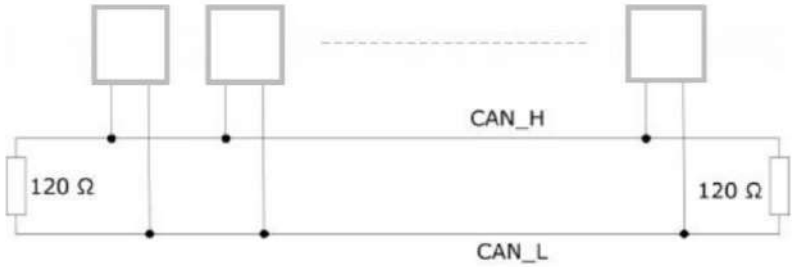


Şekil 2. IoV uygulamaları için haberleşme ağları

3.1. Araç İçi Ağlar

CAN (Controller Area Network) endüstriyel üretim yanında otomotiv uygulamalarında aşırı gürültülü ve zorlu ortamlarda güvenilir veri transferi yapmak üzere için 1986 yılında Bosch firması tarafından geliştirilmiş, hata toleransı yüksek bir seri haberleşme arabirimidir. CAN haberleşmesi kullanımı ile kablo karmaşıklığı ortadan kaldırılarak, tek bir veri yolu (bus) üzerinde yazılım kontrolüne dayalı iletişim sağlanması mümkündür. Bu avantajından dolayı kısa bir süre içinde otomotiv uygulamaları için temel standart hale gelmiştir [19].

Cihazların birbirleriyle olan bağlantısı eşlenmiş çift (twisted-pair) kablo ile sağlanır. Yayın şeklinde veri aktarımı yapıldığından gönderilen mesajlar veri yoluna bağlı tüm cihazlara ulaşır, fakat sadece gönderilen mesajın kendisiyle ilgili olduğu cihazlar tepki verir. CAN haberleşmesinde Şekil 3'de gösterildiği gibi High (CAN_H) ve Low (CAN_L) olarak isimlendirilen iki tel üzerinden veri iletimi gerçekleştirilir. Bir bit veri aynı anda hem CAN_H hem de CAN_L hattından zıt kutupta gerilim değişimi olarak gönderilir. Böylece diferansiyel sinyal ile gürültü bağışıklığı artırılır. Veri yoluna bağlı bütün cihazlar veri iletebilirken, bazı cihazlarda eş zamanlı olarak istekte bulunabilir. Usta (master) rolündeki cihaz tarafından yönetilebilecek çırak (slave) cihaz sayısı teorik olarak 2032 olsa da, pratikte donanım kısıtlamaları sebebiyle 110 cihaza kadar bağlantı yapılabilir. Veri yoluna bağlı birden fazla sayıda usta cihaz (multi-master) ile çalışmaya izin verilir. Maksimum veri hızı, veri yolu uzunluğuna bağlı olarak mesafe uzadıkça azalmaktadır. 40 metre mesafeye kadar 1 Mbps veri hızı ile haberleşme yapılabilir. Mesafe 1000 metreye çıkarsa, veri hızı 40 kbps'a kadar düşer [20, 21].



Şekil 3. CAN veri yolu üzerinde düğümlerin bağlantısı

CAN haberleşme protokolü OSI (Open Systems Interconnection) referans modelinin ilk iki katmanı olan fiziksel katman ve veri bağlantı katmanı özelliklerini tanımlar. Veri yoluna bağlı cihazlar arasında veri alışverişi için herhangi bir adresleme yapılmasına gerek duyulmaz. Bunun yerine gönderilen her mesajın kendisine özel tanımlayıcı (ID) kodu bulunur. Bu şekilde önceliklerine göre mesajların iletilmesi sağlanır. Tanımlayıcı kodu küçük olan bir mesaj paketinin önceliği daha yüksektir. 11 bit tanımlayıcı kod kullanılan standart CAN spesifikasyonu (CAN 2.0A) ve 29 bit tanımlayıcı kod kullanılan genişletilmiş CAN spesifikasyonu (CAN 2.0B) olmak üzere mesaj çerçevesi farklı formatlara sahip iki ayrı CAN versiyonu mevcuttur. Mesaj çerçevesi (frame) başına maksimum 8 bayt veri transferine izin verilir. Araç içinde dağıtılmış farklı alt sistemlerin kontrol eden elektronik kontrol birimleri (Electronic Control Units, ECUs) birbirlerine CAN veri yolu üzerinden bağlanır [22].

LIN (Local Interconnect Network) araç içi elektronik sistemler ve sensörler arasında veri aktarımında CAN protokolüne alternatif düşük maliyetli çözüm sağlamak için geliştirilmiş seri haberleşme arabirimidir. İlk spesifikasyonu 1999 yılında yayınlanmış olup, 2003 yılında BMW, Daimler Chrysler, Volkswagen Audi ve Volvo gibi otomotiv üreticilerinin oluşturduğu LIN konsorsiyumu tarafından LIN 2.0 olarak revize edilmiştir. Başlangıçta Avrupa'da kullanılmış olsa da sonradan SAE (Society of Automotive Engineers) tarafından J2602 standardı olarak benimsenerek Ford ve General Motors gibi farklı üreticilerin de ilgisini çekmiştir. LIN 2.0 için veri hızı maksimum 40 metre mesafe içinde 20 kbps iken, SAE J2602 spesifikasyonu ile veri hızı 10.4 kbps olarak sınırlandırılmıştır. Araçlarda kapı kilidi, çocuk kilidi, sun roof, yağmur sensörü vb. pek çok kontrol uygulamasında LIN arabirimi kullanılmaktadır [23].

LIN haberleşmesinde maliyeti düşürmek için tek bir tel üzerinden veri yolu oluşturulurken, araç gövdesi ortak toprak hattı görevi üstlenir. Veri yolu

üzerinde 1 usta ve 16 çırak rolünde cihaz bulunabilir. Ortak veri yolu üzerinde yayın (broadcast) şeklinde gönderilen mesajlar bağlı tüm cihazlar tarafından alınır. Kanal erişiminde birden fazla cihazın eş zamanlı paket gönderimi durumunda meydana gelecek çarpışma (collision) durumlarını algılayacak bir mekanizma bulunmadığından tüm mesajlar usta cihaz tarafından başlatılır. Çırak cihazlar yayınlanan önceden tanımlanmış mesajlar içinde tanımlayıcılara cevap üreterek haberleşebilirler. Usta cihazların daha üst katmandaki CAN ağına bağlanması halinde toplanan LIN mesajları kullanılarak konsol üzerinde uyarı mesajları gösterimi ve hataların teşhis edilmesine yönelik testlerin gerçekleştirilmesi mümkündür [21].

MOST (Media Oriented Systems Transport) veri yolu araçlarda genellikle ses, video, navigasyon vb. daha yüksek veri transfer hızı gerektiren multimedya içerikli uygulamalar için kullanılır. 1998 yılında BMW ve Daimler Chrysler tarafından geliştirilmiştir. Ortalama veri hızı senkron haberleşme için 28.8 Mbps ve asenkron haberleşme için 14.4 Mbps olup maksimum 64 cihazın veri yoluna bağlantısına izin verilir. Son yıllarda multimedya sistemlerin kullanımında artışa paralel olarak ihtiyaçlara cevap vermek üzere veri hızı 150 Mbps değerini destekleyecek şekilde yükseltilmiştir. Cihazlar arasında bağlantı için fiber optik, UTP ve koaksiyel kablolar kullanılır [15].

Flexray veri yolu gerçek zamanlı yüksek hız gerektiren uygulamalar için BMW ve Daimler Crysler firmaları tarafından 1999 yılında geliştirilmiştir. Hem UTP hem de fiber optik kablolar üzerinden 10 Mbps veri hızını destekler. Diğer veri yollarına göre en önemli avantajı hem tek hem de çift kanal bağlantı konfigürasyonlarını desteklemesidir. Çift kanallı çalışma durumunda eğer kanallardan biri kullanılamaz hale gelirse, diğer kanal üzerinden veri aktarımı sürdürülür. Böylece kritik uygulamalarda yedekli çalışma ile en yüksek seviyede güvenlik sağlanmış olur [15].

Son yıllarda araçlarda yeni nesil bilgi-eğlence (infotainment) sistemlerinin kullanılmaya başlaması yanında; daha fazla bant genişliği ve güvenli mesajlaşma gerektiren otonom sürüş için ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) işlevlerinin yerine getirilmesi amacıyla araç iç ağ haberleşmede Otomotiv Ethernet teknolojisinden faydalanılmaya başlanmıştır. Ethernet haberleşmesinin uzun yıllardır bilgisayar ağlarında tecrübe edilmiş başarısı yanında endüstriyel sahada ortaya koyulan başarılı uygulamalar, bu teknolojinin araç içi haberleşmede ortaya çıkan problemlerin çözümünde anahtar rol oynama potansiyeli olabileceği konusunda otomotiv üreticilerine ışık yakmıştır. Elektromanyetik girişime (EMI) karşı bağışıklığının düşük olması ile birlikte mikro saniye seviyesinde düşük gecikme (latency) garantisi sunmaması ve senkronizasyon desteği sağlamaması gibi eksiklikleri sebebiyle geleneksel

Ethernet ağının doğrudan araç içi haberleşme alt yapısında kullanılması uygun değildir. Otomotiv uygulamalarının ihtiyaçlarının karşılanmasını sağlamak üzere IEEE 802.3 ve 802.1 çalışma grupları tarafından yeni spesifikasyonlar ve revizyonlar gerçekleştirilerek, Otomotiv Ethernet olarak isimlendirilen yeni bir Ethernet ağı geliştirilmiştir [24].

2010 yılından bu yana sürdürülen çalışmalar halen devam etmekte olup nihai amaç, geçmişten beri araç içi ağ olarak kullanılan heterojen (CAN, LIN, MOST, Flexray) teknolojilerin tek bir çatı altında hiyerarşik-homojen Ethernet ağı olarak birleştirilmesidir. Bununla birlikte günümüzde örnekleri görülmeye başlayan otonom araçlar için araç içi ağ olarak Otomotiv Ethernet kullanılması zorunluluk haline gelmiştir. 4. seviye veya 5. seviye sürücüsüz bir otonom araç üzerinde birden fazla sayıda LiDAR, radar ve kamera modülü bulunduğu durumda Gbps - Tbps seviyesinde hızla veri üretmektedir. Mevcut araç içi ağ veri yolu standartları dikkate alındığında üretilen aşırı büyük boyutta sensör verilerinin gerçek zamanlı işlenmesi ve düşük gecikme ile transferi ancak Otomotiv Ethernet ağı ile mümkün olabilir [25].

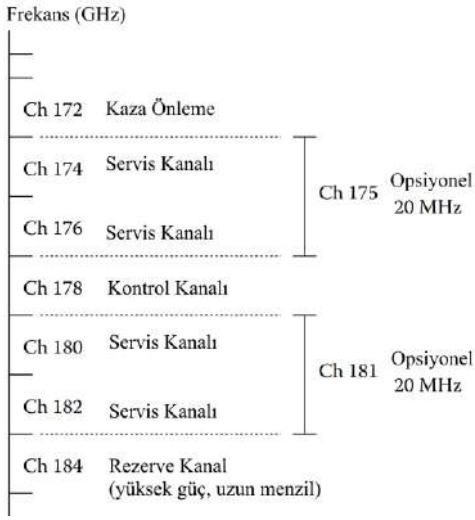
3.2. Araçlar Arası Ağlar

Kısaca VANET olarak isimlendirilen araçsal ağlar (vehicular networks), ağı oluşturan düğümlerin hareketli olmasından kaynaklanan değişken ağ yoğunluğu ve dinamik ağ topolojisi gibi geleneksel tasarsız ağlardan farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Araçsal ağlarda, sistem kaynaklarının yönetiminin aksamadan sürdürülebilmesi için tasarsız ağ mimarisi üzerinde düğümlerin kendi kendine organize olabilme (self-organization) yeteneği ile birlikte araç-araç (vehicle-to-vehicle, V2V) haberleşmesi ve araç-altyapı (vehicle-to-infrastructure, V2I) haberleşmesi için temel oluşturulur [26].

Araçlar arasında haberleşme için ilk olarak 1999 yılında Kuzey Amerika'da DSRC (dedicated short range communication) teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. DSRC bağlantısı için 75 MHz bant genişliği (5.850-5.925 GHz) ile 5.9 GHz frekansının lisanslı kullanımı 2003 yılında FCC (Federal Communication Commission) tarafından onaylanmıştır. Temel kullanım amacı trafik akışını hızlandırmak ve kazaları önlemek için herkese açık güvenlik mesajlarının (konum, hız, hareket yönü, acil durum araçlarının varlığı, rota optimizasyonu, ücretli geçiş ödemeleri, kavşaklarda çarpışma önleme ve kör nokta uyarısı, otonom sürüş desteği vb.) araçlar ve yol altyapısı arasında aktarılmasıdır. Toplam bant genişliği Şekil 4'de gösterildiği gibi yedi adet 10 MHz bant genişliğinde alt kanala bölünmüş olup 5.885–5.895 MHz bandı kontrol kanalı (Kanal 178) olarak sadece güvenlik mesajlarının iletimi için ayrılmıştır. Mevcut bant genişliğinin iki ucunda bulunan kanallar gelişmiş kaza

önleme uygulamaları için rezerve edilmiş olup, bunun dışında kalan kanallar güvenlik uygulamaları için kullanılabilir [27].

Dünyanın farklı bölgelerinde araçlar arası haberleşme uygulamalarına yönelik frekans tahsisi çalışmaları başlatılmıştır. Japonya'da DSRC uygulaması için belirlenen frekans spektrumu 5.770-5.850 GHz arasındadır. Avrupa'da her ülkenin kendi yetkili kuruluşları tarafından frekans tahsisi için yapılan çalışmalar oldukça uzun sürmüş olup 2008 yılında Avrupa Komisyonu tarafından Avrupa Birliği ülkelerinde yol güvenliği mesajlarının aktarımı için 5875-5905 MHz frekans bandının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu frekans bandının üzerindeki 20 MHz gelecekteki genişlemeler ve yüksek güçte uzun menzilli yayın için rezerve edilmiş olup, 5855-5875 MHz frekans bandı ise güvenlik harici mesajlara ayrılmıştır [28].



Şekil 4. DSRC teknolojisi için frekans spektrumu kanal tahsisi

DSRC teknolojisinin temeli, Wi-Fi bağlantısı için geliştirilmiş IEEE 802.11a standardı fiziksel katman özelliklerinin araçsal ağların spesifik gereksinimlerine göre değiştirilmesi ile ortaya çıkan IEEE 802.11p standardına dayanmaktadır. DSRC protokol yığınının üst katmanları IEEE 1609 çalışma grubu tarafından dört farklı başlık altında (IEEE 1609.1, 1609.2, 1609.3 ve 1609.4) standartlaştırılmıştır. IEEE 1609 standartlarına ilişkin özellikler Tablo 1'de verilmiştir. IEEE 802.11p ve IEEE 1609 standartları, toplu olarak WAVE (wireless access in vehicular environments) olarak isimlendirilir. WAVE protokol yığınında IEEE 802.11p standardına bağlı olarak kanal erişimi için CSMA/CA tekniği kullanılır. OFDM uygulaması ile bant genişliğine bağlı

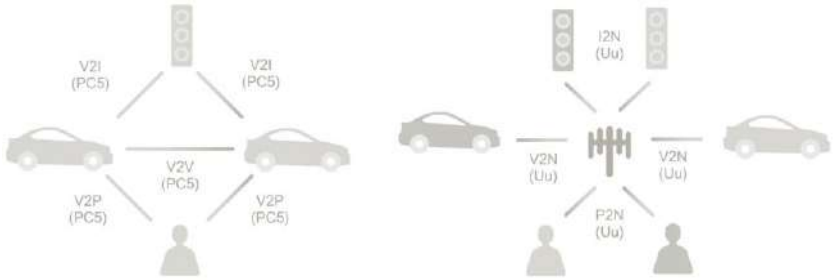
olarak 10 MHz kanal kullanımı durumunda 27 Mbps ve 20 MHz kanal kullanımı durumunda 54 Mbps veri hızlarına ulaşılabilir. 200 km/h hıza kadar V2V ve V2I haberleşmelerin ortama bağlı olarak 1000 metre menzil içinde yapılması mümkündür. Şehirsel alanlarda engeller sebebiyle iletim menzili genellikle 250 metre ile sınırlıdır [29, 30].

Tablo 1. IEEE 1609 standartları ve tanımlayıcı özellikleri

Standart	Tanım
IEEE 1609.1	WAVE kaynak yönetici uygulaması servis, arabirim ve mesaj veri formatını tanımlar.
IEEE 1609.2	Güvenli ve gizli mesaj oluşturma, işleme, değiş-tokuş özelliklerini tanımlar.
IEEE 1609.3	Mesaj yönlendirme ve taşıma servislerini tanımlar.
IEEE 1609.4	Çoklu kanal kullanım özelliklerini tanımlar.

Diğer yandan C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) teknolojisi araçsal ağlar için LTE, LTE-A ve 5G gibi hücresel haberleşme sistemleri üzerinde bir genişleme olarak geliştirilmiştir. Ulaşımda güvenliğin artırılması bakımından, C-V2X teknolojisi araçların görüş hattını uzatarak sürücüleri yol çalışması, sert hava koşulları ve potansiyel tehlikeler konusunda uyarır. Mobil operatörlere ait mevcut hücresel altyapının kullanılması sebebiyle araçsal ağlar için kurulması ve sürekli aktif kalması için bakımının yapılması gereken yol kenarı altyapısına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. DSRC teknolojisi ile karşılaştırıldığında, C-V2X verimlilik ve kapsama alanı bakımından daha iyi performans gösterir [31].

C-V2X teknolojisi araçlar arasında haberleşme uygulamaları için Şekil 5'de gösterildiği gibi iki farklı birbirlerini tamamlayıcı iletim moduna sahiptir. Kısaca Uu olarak isimlendirilen birinci mod, araçların çevresindeki yol koşulları ve trafik durumu hakkında 1 kilometreden uzun mesafede bilgi almasını sağlamak için hücresel ağlara dahil baz istasyonlarının kullanıldığı ağ haberleşmesidir. PC5 (Sidelink) olarak isimlendirilen ikinci mod, araçlar arasında (V2V), araçlar ile yol altyapısı arasında (V2I) ve araçlar ile yayalar (V2P) gibi diğer yol kullanıcıları arasında hücresel ağlardan bağımsız olarak 1 kilometreden kısa menzilde doğrudan haberleşme yapılmasını mümkün kılar [32, 33].



Şekil 5. C-V2X teknolojisi için PC5 ve Uu iletim modları

Mobil haberleşme sistemleri için protokoller geliştiren standart kuruluşların tümünü çatısı altına alan 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tarafından belirlenen spesifikasyonlar, farklı sürümler (releases) olarak gruplandırılmıştır. Böylece belirli bir sürümü oluşturan tüm spesifikasyonlar grubuna dayalı olarak yeni bir mobil sistem uygulamaya koyulmuştur. 3GPP Sürüm 12 ve 13 ile araçlar arası haberleşme için temel teşkil eden temel cihazlar arası (device to device, D2D) haberleşme temelleri ortaya koyulmuştur. Bunu takiben 3GPP Sürüm 14 ve 15 ile C-V2X teknolojisi tanımlanarak araçtan her şeye (V2X) haberleşme menzilinin ve güvenliğinin artırılmasına yönelik düzenlemeler yapılmıştır. 3GPP Sürüm 16 ile 5G NR teknolojisi desteği eklenerek otonom sürüş uygulamaları için gelişmiş güvenlik uygulamaları kapsam altına alınmıştır [34]. 3GPP Sürümleri için araçsal haberleşme yeteneklerinin gelişimi Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. 3GPP sürümleri için araçsal haberleşme özellikleri

Sürüm	R12/R13	R14/R15	R16
Tanım	D2D	C-V2X Faz 1 ve Faz 2	C-V2X Faz 3
Haberleşme Tipi	Broadcast	Broadcast	Broadcast + Unicast/Multicast
Hız	-	Yüksek	Çok Yüksek
Gecikme	-	Düşük	Çok Düşük
Güvenlik	-	Güvenli	Çok Güvenli

3.3. Araç Mobil İnternet Bağlantısı

IoV uygulamalarında araçların internet erişimi için gerçek zamanlı bağlantı yanında çok sayıda aracın bağlanmasına izin verecek şekilde ölçeklenebilir, yüksek hızlarda hareketlilik ve geniş kapsama alanı desteği sunan gelişmiş ağlara ihtiyaç vardır. Bu gereksinimlerin karşılanması için IoV uygulamalarında araçlar LTE, LTE-A, LTE-A Pro ve 5G bağlantısı üzerinden bulut sunucusuna bağlanması sağlanmaktadır. Özellikle 5G teknolojisi trafik kazalarının önlenmesi için gecikmeye duyarlı uygulamalara fırsat sağlayan URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) yeteneği sayesinde (1 milisaniye veya daha az gecikme, uçta uca güvenlik, 1×10^{-5} seviyesinde paket kaybı ve %99.999 güvenilirlik), bağlantılı otonom araçların (connected and autonomous vehicles, CAVs) hayata geçirilmesinde kritik öneme sahiptir. Günümüzde araçlara yerleştirilen yönlendirici (router) ve ağ geçidi cihazlar kullanılarak araç içi ağlar ile toplanan sensör verileri yanında araçlar arası ağlar ile toplanan yol ve trafik durumu bilgisinin hücresel şebeke üzerinden bulut sunucusuna aktarımı gerçekleştirilmektedir. Bu telemetri uygulamaları sayesinde ilgilenilen tüm verilerin uzaktan takibi mümkündür [35-37].

4. Sonuçlar

Dünya genelinde şehirleşme oranının artışına paralel olarak, özellikle metropol şehirlerde artan araç sayısına bağlı trafik sıkışıklığı giderek daha büyük bir problem haline gelmiştir. Bunun yanında sürücü hatası ve yol alt yapısından kaynaklanan sebeplerle yaşanan trafik kazaları can kaybına ve maddi hasarlara sebep olmaktadır. Özellikle son on yıllık süreçte gelişen teknolojinin araçları ve karayollarını modernize etmesi ile uygulamaya konulan akıllı ulaşım sistemleri sayesinde trafik kazalarının azaltılması, trafik sıkışıklığının azaltılması, seyahat konforunun artırılması, enerji tüketiminin düşürülmesi, hava kirliliği ve zaman kaybının azaltılmasına yönelik önemli faydalar elde edilmiştir. Günümüzde kesintisiz mobil internet erişimi, yollardaki araçları akıllı mobil cihazlara dönüştürmeyi başarmıştır. Akıllı ulaşım sistemlerinin gelişiminde güncel uygulamalardan biri de araçlara ve etkileşim halinde olduğu diğer araçların oluşturduğu yakın çevresine ait verilerin anlık olarak bulut sunucular üzerinden uzaktan takibine imkân veren Araçların İnterneti teknolojisidir. Kapsamında araç içi ağlar, araçlar arası ağlar ve araç mobil internet bağlantısı gibi farklı haberleşmeleri barındıran bu teknolojinin, özellikle 5G hücresel ağların devreye alınması ile birlikte kazanacağı üstün yetenekler sayesinde akıllı ulaşım sistemlerine yeni vizyonlar katılması muhtemeldir.

5. Kaynakça

[1] Papulováa, Z., Gažováa, A., & Šufliarský, Ľ. (2022). Implementation of Automation Technologies of Industry 4.0 in Automotive Manufacturing Companies. In Proceedings of the *3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, 200, 1488-1497.

[2] Vdovic, H., Babic, J., & Podobnik, V. (2019). Automotive Software in Connected and Autonomous Electric Vehicles: A Review. *IEEE Access*, 7, 166365-166379.

[3] Morningstar, M. (2021). Modernisation of city transportation and its impacts to citizens. Retrieved from https://www.aboutsmartcities.com/smart-city-transportation/

[4] Singh, B., & Gupta, A. (2015). Recent trends in intelligent transportation systems: a review. *Journal of Transport Literature*, 9(2), 30-34.

[5] Dey, K. C., Mishra, A., & Chowdhury, M. (2015). Potential of Intelligent Transportation Systems in Mitigating Adverse Weather Impacts on Road Mobility: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1107-1119.

[6] Jain, P. C. (2021). Trends in Next Generation Intelligent Transportation Systems. In M. Găiceanu (Ed.), *Self-driving Vehicles and Enabling Technologies* (pp. 1-11). Intech Open.

[7] Zhang, L., Khalgui, M., & Li, Z. (2021). Predictive Intelligent Transportation: Alleviating Traffic Congestion in the Internet of Vehicles. *Sensors*, 7330, 1-21.

[8] Sadiku, M. N. O., Gupta, N., Patel, K. K., & Musa, S. M. (2021). An Overview of Intelligent Transportation Systems in the Context of Internet of Vehicles. In N. Gupta, A. Prakash, R. Tripathi (Eds.), *Internet of Vehicles and Its Applications in Autonomous Driving* (pp. 3-12). Springer Nature.

[9] Lone, F. R., Verma, H. K., & Sharma, K. P. (2021). Evolution of VANETS to IoV: Applications and Challenges. *Tehnički glasnik*, 15(1), 143-149.

[10] Arooj, A., Farooq, M. S., Akram, A., Iqbal, R., Sharma, A., & Dhiman, G. (2021). Big Data Processing and Analysis in Internet of Vehicles: Architecture, Taxonomy, and Open Research Challenges. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(2), 1-37.

[11] Gebremeskel, G. B., Chai, Y., & Yang, Z. (2014). The Paradigm of Big Data for Augmenting Internet of Vehicle into the Intelligent Cloud Computing Systems. In Proceedings of the *Internet of Vehicles – Technologies and Services (IOV 2014)*, 247–261.

[12] Kiela, K., Barzdenas, V., Jurgo, M., Macaitis, V., Rafanavicius, J., Vasjanov, A., Kladovscikov, L., & Navickas, R. (2020). Review of V2X–

IoT Standards and Frameworks for ITS Applications. *Applied Sciences*, 10(12), 4314, 1-23.

[13] Tolba, A., & Altameem, A. (2019). A Three-Tier Architecture for Securing IoV Communications Using Vehicular Dependencies. *IEEE Access*, 7, 61331-61341.

[14] Sherazi, H. H. R., Khan, Z. A., Iqbal, R., Rizwan, S., Imran, M. A., & Awan, K. (2019). A Heterogeneous IoV Architecture for Data Forwarding in Vehicle to Infrastructure Communication. Mobile Information Systems, 3101276, 1-12.

[15] Tuohy, S., Glavin, M., Hughes, C., Jones, E., Trivedi, M., & Kilmartin, L. (2015). Intra-Vehicle Networks: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 534-545.

[16] Jawhar, I., Mohamed, N., & Usmani, H. (2013). An Overview of Inter-Vehicular Communication Systems, Protocols and Middleware. *Journal of Networks*. 8(12), 2749-2761.

[17] Kombate, D., & Wanglina. (2016). The Internet of Vehicles Based on 5G Communications. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings)*, pp. 445-448.

[18] Suciu, G., Hussain, I., Esanu, I. A., Beceanu, C., Vatasoiu, R.-I., & Vochin, M.-C. (2021). Role of 5G in Vehicular Network for Smart Vehicles in Smart Cities. . In Proceedings of the *IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 382-387.

[19] Avatefipour, O., & Malik, H. (2017). State-of-the-Art Survey on In-Vehicle Network Communication "CAN-Bus" Security and Vulnerabilities. *International Journal of Computer Science and Network*, 6. 720-727.

[20] Mohan, J., & Kishore, C. (2021). Smart vehicle monitoring for detecting anomalies on CAN bus. In Proceedings of the *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 1-6.

[21] Held, G., (2008). *Inter- and Intra-Vehicle Communications*. Auerbach Publications.

[22] Voss, W. (2021). Controller Area Network (CAN Bus) Tutorial - Message Frame Format. Retrieved from https://copperhilltech.com/blog/controller-area-network-can-bus-tutorial-message-frame-format/

[23] Ruff, M. (2006). Tech Tutorial: LIN and SAE J2602 drive more efficient automotive networking: Part 1. Retrieved from https://www.eetimes.com/tech-tutorial-lin-and-sae-j2602-drive-more-efficient-automotive-networking-part-1/

[24] Hank, P., Müller, S., Vermesan, O., & Van Den Keybus, J. (2013). Automotive Ethernet: In-vehicle networking and smart mobility. In Proceedings of the *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 1735-1739.

[25] Saxena, A. (2020). Automotive Ethernet: Driving In-Vehicle Communication for new-age vehicular functions. Retrieved from https://www.einfochips.com/blog/automotive-ethernet-driving-in-vehicle-communication-for-new-age-vehicular-functions/

[26] Jiménez, F. (2015). Connected Vehicles, V2V Communications and VANET. *Electronics*, 4(3), 538-540.

[27] FCC. (2022). Dedicated Short Range Communications (DSRC) Service. Retrieved from https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/mobility-division/dedicated-short-range-communications-dsrc-service

[28] Qian, Y., & Moayeri, N. (2009). Medium Access Control Protocols for Vehicular Networks. In H. Moustafa, Y. Zhang (Ed.), *Vehicular networks: techniques, standards, and applications* (pp. 41-62). Auerbach Publications.

[29] Çıbuk, M., & Ağgün, F. (2018). Karasal taşıt ağları için geliştirilmiş ortam erişim kontrol protokolleri üzerine bir inceleme. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(1), 121-131.

[30] Abdalla, G. M. T., Abu-Rgheff, M. A., & Senouci, S. M. (2007). Current trends in vehicular ad hoc networks. *Ubiquitous Computing and Communication Journal*, 1-9.

[31] Miao, L., Chen, S.-F., Hsu, Y.-L., & Hua, K.-L. (2022). How Does C-V2X Help Autonomous Driving to Avoid Accidents?. *Sensors*, 22(2), 1-15.

[32] Miao, L., Virtusio, J. J., & Hua, K.-L. (2021). PC5-Based Cellular-V2X Evolution and Deployment. *Sensors*, 21(3), 1-14.

[33] Ansari, K. (2020). Joint use of DSRC and C-V2X for V2X communications in the 5.9 GHz ITS band. *IET Intelligent Transport Systems*, 15(2), 213-224.

[34] Garcia-Roger, D., González, E. E., Martín-Sacristán, D., & Monserrat, J. F. (2020). V2X Support in 3GPP Specifications: From 4G to 5G and Beyond. *IEEE Access*, 8, 190946-190963.

[35] Storck, C. R., & Duarte-Figueiredo, F. (2019). A 5G V2X Ecosystem Providing Internet of Vehicles. *Sensors*, 19(3), 1-20.

[36] Yang, Y., & Hua, K. (2019). Emerging Technologies for 5G-Enabled Vehicular Networks. *IEEE Access*, 7, 181117-181141.

[37] Alalewi, A., Dayoub, I., & Cherkaoui, S. (2021). On 5G-V2X Use Cases and Enabling Technologies: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 9, 107710-107737.

NORMAL FAYLAR ETKİSİYLE OLUŞMUŞ JEOMORFOLOJİK YAPILAR

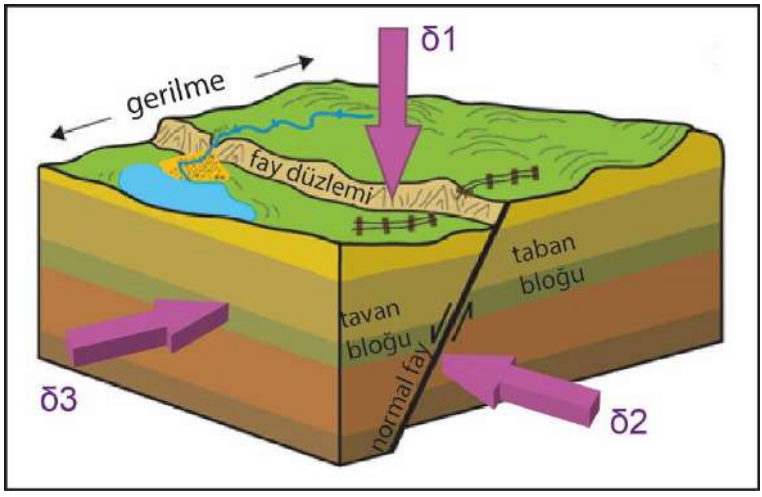
Serap ÇOLAK EROL

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1957-3012

Faylar, yaygın jeolojik yapılar olup yerkabuğundaki deformasyon enerjisinin artması sonucunda gelişen bir kırık türüdür. Kırılmadan önce karşı karşıya duran kayaç blokları, faylanma sonucunda kırık yüzeyi boyunca gözle görülecek kadar göreceli olarak hareket eder.

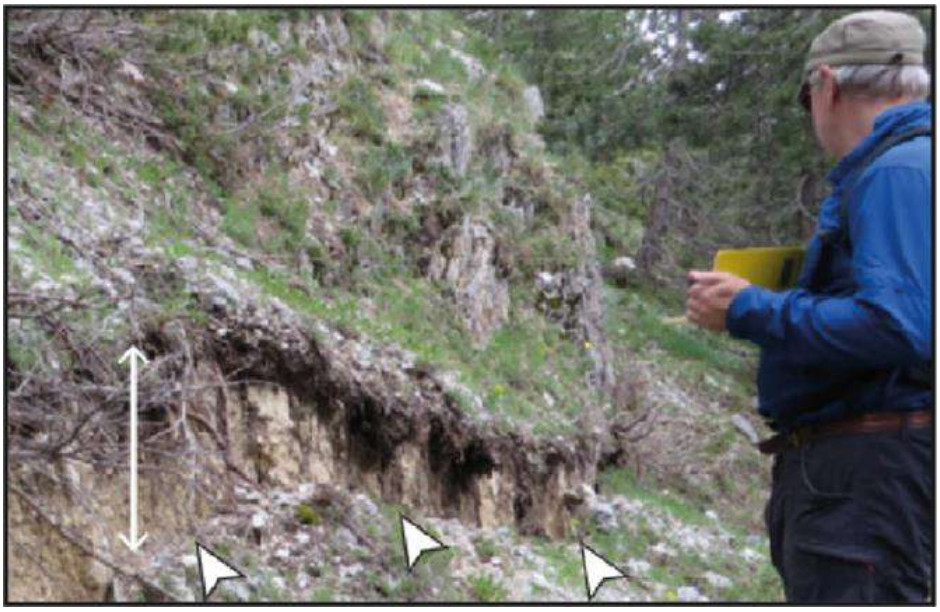
Faylar birçok kritere göre sınıflandırılmakla birlikte en sık kullanılanı, mekanik özelliklerine göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmada faylar, faylanmayı meydana getiren asal gerilme eksenlerinin yeryüzüne göre konumu dikkate alınarak normal, ters ve doğrultu atımlı olarak üçe ayrılırlar. Bu çalışmanın temelini teşkil eden normal faylarda tavan bloğu, taban bloğuna göre fay düzlemi boyunca aşağıya doğru hareket eder (Şekil 1). Hareket vektörü, fayın doğrultusuna dik; eğimine paralel ise eğim atımlı normal fay atımlı fay oluşur. Hareketin doğrultusunu da gösteren kayma çizikleri (fay çizikleri), fayın doğrultusuna dik değilse, eğik (verev, oblik, diyagonal) atımlı normal faylardan bahsedilir.

En büyük asal gerilme olan δ_1, düşey; orta asal gerilme olan δ_2 ve en küçük asal gerilme olan δ_3, yataydır. Düşey eksen olan δ_1, dünyanın gravitasyonel (yer çekimi) alanının ana ekseni olduğundan bu faylar, "gravite fayları" olarak ta isimlendirilir. Bunlar, yerkabuğunda genişleme, uzama ve incelmeyi temsil ederler. Bu faylar boyunca birçok yer şekli meydana gelir. Bunlardan en önemlileri, aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Normal faya ait blok diyagram ve kendisini oluşturan asal gerilmeler, [1]'den değiştirilerek

FAY DÜZLEMİ: Kayma hareketinin geliştiği düzlemdir. Fay düzleminin arazide görülmesi, fayın varlığının kesin kanıtıdır. Üzerinde, kayma hareketinin doğrultusunu gösteren kayma çizikleri ile kayma hareketinin yönünü gösteren kayma kertikleri bulunabilir. Bunlara "kinematik indikatörler (belirteç)" denir. Fay düzlemi, genel topoğrafya eğimindeki ani bir değişimle kendini gösterir (Şekil 1 ve 2). Anakaya ya da birikinti çökelleri içinde gelişebileceği gibi anakaya ile birikinti çökeli arasındaki dokunağı da belirleyebilir.



Şekil 2. Bir normal fay düzlemi

FAY SARPLIĞI / FAY DUVARI: Aynı fay üzerinde meydana gelen birçok deprem sonucu fay düzleminin, daha da büyüyüp sarplaşıp duvara benzer şekil almasıyla belirgindir (Şekil 3). Fay düzlemi, metreden kilometre boyutuna kadar yüzeyleme verebilir.

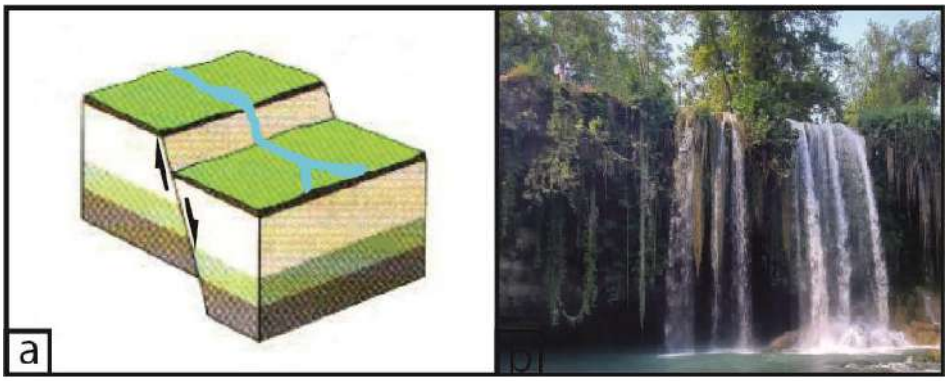
Şekil 3. Bir fay duvarı örneği

Fay düzlemi, üzerinde meydana gelen iki deprem arasındaki sürenin uzunluğuna bağlı olarak, atmosferik şartlarla bozuşmaya uğrar. Önce ortaya çıkan fay düzlemi ile sonra oluşan depremle yüzeye çıkan düzlemin devamı arasında atmosferik bozuşma kaynaklı renk tonu farklılığı oluşur. Şekil 4'te mavi oklarla gösterilen açık renkli taze yüzey, kireçtaşlarında gelişen fay sarplığının en son depremle ortaya çıkmış bölümüyken düzlemin koyu renkli üst bölümü ise daha eski tarihli depremleri göstermektedir [2].

Şekil 4. Fay sarplığının en son depremle ortaya çıkmış bölümü mavi oklarla işaretlenmiştir. [2]

Anakaya üzerinde gelişen eski fay sarplıklarında yüzey şartlarına bağlı olarak likenler veya bitki örtüsü, lapyalar, çatlaklar gelişir. Bunlar, düzlem üzerinde fayın mekanizmasını anlamamızı sağlayan kinematik indikatörlerin (belirteçlerin) silinmesine sebep olurlar. Taze fay yüzeylerinde ise kinematik indikatörler dediğimiz fay çizikleri, kertikler, breşler ve kalsit lifleri kolaylıkla saptanabilir.

ŞELALE / SU BASAMAĞI: Bir akarsu, belirgin bir normal faylanmaya uğrarsa akarsuyun eğim profilinde basamaklanma oluşur. Profil boyunca oluşan bu basamaklarda da, şelaleler meydana gelir (Şekil 5). Şelale yükseklikleri, birkaç metreden yüzlerce metreye kadar değişebilir. Jeomorfolojide, "gençleşme başı" olarak ta adlandırılmaktadır.

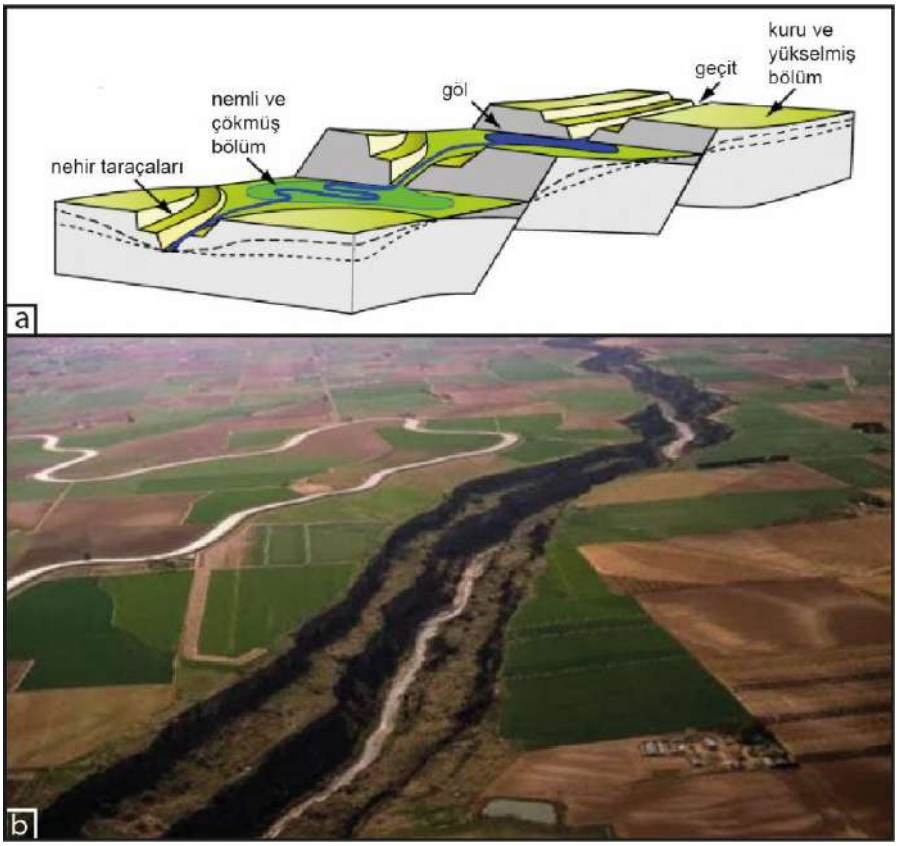


Şekil 5. a) Bir su basamağı oluşum mekanizması ve **b)** arazi örneği

TARAÇA / SEKİ: Akarsular, kendi yatağında biriktirdiği alüvyonları, yeniden aşındırma sonucunda eski taşkın ovalarını terk ederek derine doğru kazarlar. Yeni taban seviyesine göre yatağını ayarladığında tekrar biriktirme yapmaya başlar. Yeni seviye ile eski seviye arasında oluşan basamağa taraça denir. Bunlar, akarsuların eski vadi tabanları veya taşkın ovalarıdır (Şekil 6a, [3]'den değiştirilerek) ve 6b). Oluşum kökenleri, taban seviyesinde meydana gelen değişime bağlı olarak tektonik veya iklimsel olabilir.

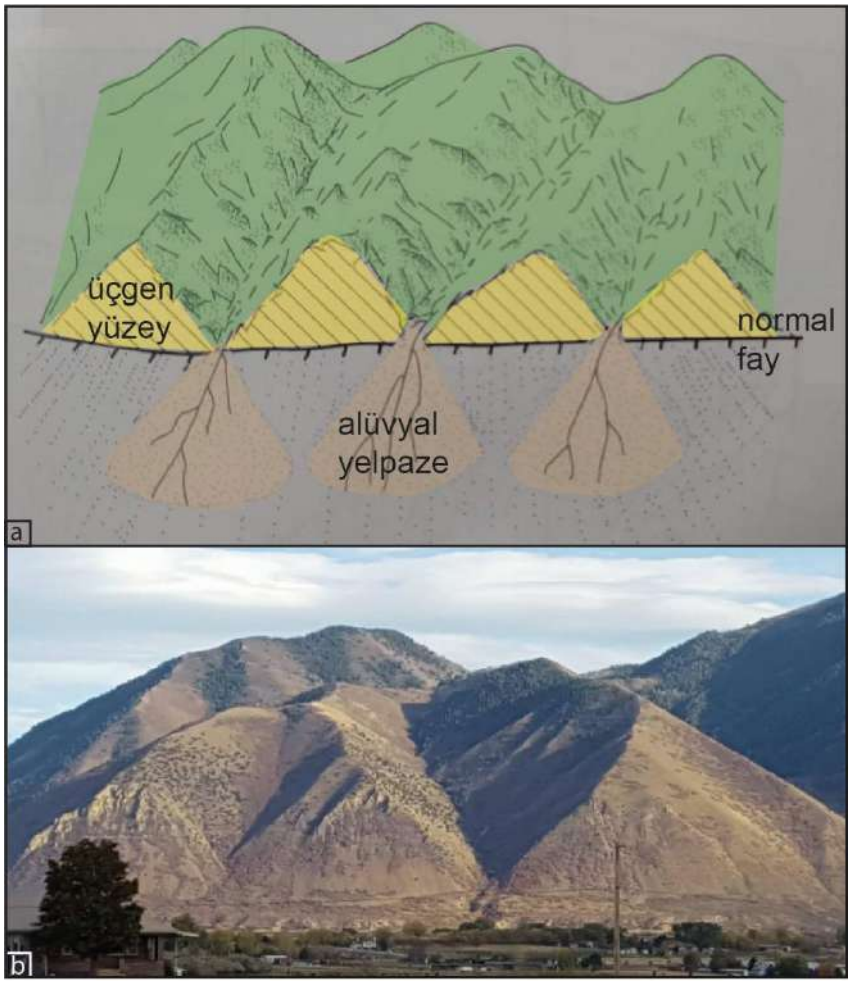
Akarsu, boyuna profili boyunca normal faylar tarafından dik ve ya dike yakın kesildiğinde taban bloğunda yükselme meydana geldiğinden akarsu, yatağını derine kazar. Tavan bloğunda oluşan tiltlenmeden (geriye eğimlenme) dolayı bir göllenme oluşur. Gölden taşan sular, tekrar akarsu olarak akışa geçer. Sintetik faylar boyunca bu döngü, devam eder.

Bu taraçalar, jeolojik önemlerinden dolayı kullanışlı bir jeomorfik belirteçtir. Taraçalar, özel tekniklerle yaşlandırıldığında ve yükseklikleri ölçüldüğünde kayma miktarını ve oluşum zamanını; buna bağlı olarak ta fayın kayma hızını buluruz.



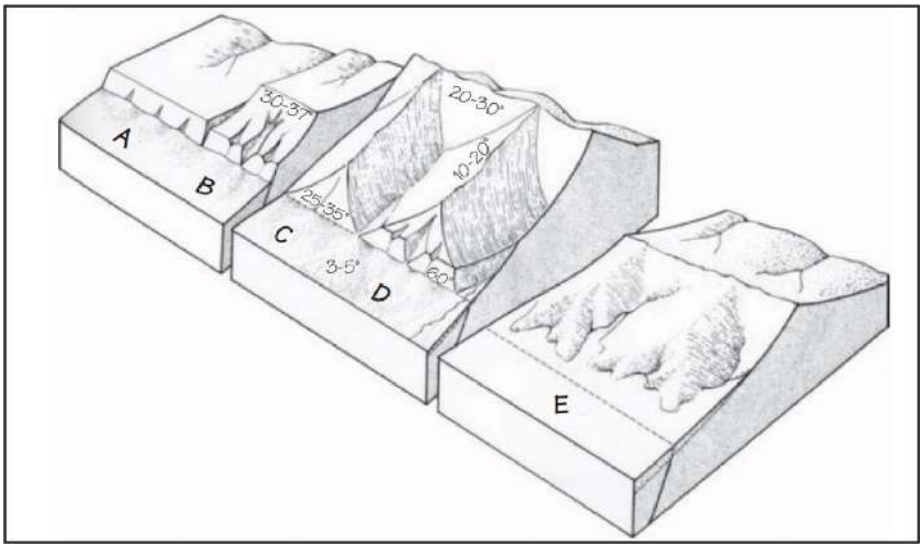
Şekil 6. a) Bir akarsu yatağının normal faylanmasıyla oluşan yerşekillerini gösteren blok diyagram [3], **b)** güncel taraça örneği [4]

ÜÇGEN YÜZEYLER / FAY FAÇETALARI / ÜTÜALTI YAPILARI: Uzun süren normal faylanmalar neticesinde oluşan fay duvarının, flüvyal süreçlerle fayın kendisine dik ya da dike yakın akarsular tarafından kesilmesiyle bir ütünün altına benzeyen, fay façetaları da denilen üçgen yüzeyler meydana gelir (Şekil 7a; [5]'ten değiştirilerek ve 7b). Bu üçgen yüzeyler, fay aynasının aşınmasıyla meydana gelen fay düzlemi parçalarıdır. Üçgen yüzeylerin büyüklüğü ve vadinin derinliği, fayın aktivitesiyle doğru orantılıdır. Akarsularda yanal bir ötelenme varsa bu, fayın doğrultu atım bileşeni de olduğunu, yani oblik olduğunu gösterir.



Şekil 7.a) Üçgen yüzey ve alüvyal yelpazeleri gösteren blok diyagram [5], **b)** üçgen yüzey örneği [6]

Şekil 8'de dağ önlerinde fay façetalarının evrimsel gelişimi gösterilmiştir. A evresi, genç evredir ve ilksel morfoloji görülür. B evresinde, topoğrafyanın yüzey süreçleriyle etkileşimiyle vadiler gelişir. Olgunlaşma evresi olan C'de, taban bloğunda vadiler derinleşir; keskin hatlarla birbirinden ayrılmış façetalar oluşur ve zamanla aşınmadan ötürü façetaların eğimi azalır. D evresinde, yükselme hızının aşınma hızından fazla olmasından kaynaklı mevcut façetalar, ilksel geometrilerini kaybederler ve önlerinde ikincil fay façetaları gelişir. İkincil façetalar, aynı düzlemin devamı da olabilir, sintetik faylarda da gelişebilir. Façetaların bu durumu, hareketin devam ettiğini gösterir. Yaşlılık evresi olan E evresinde aşınma hızı, fayın kayma hızından fazla olduğunda dağ önü çizgiselliğinin kaybolduğu morfolojiler gözlenir [7].



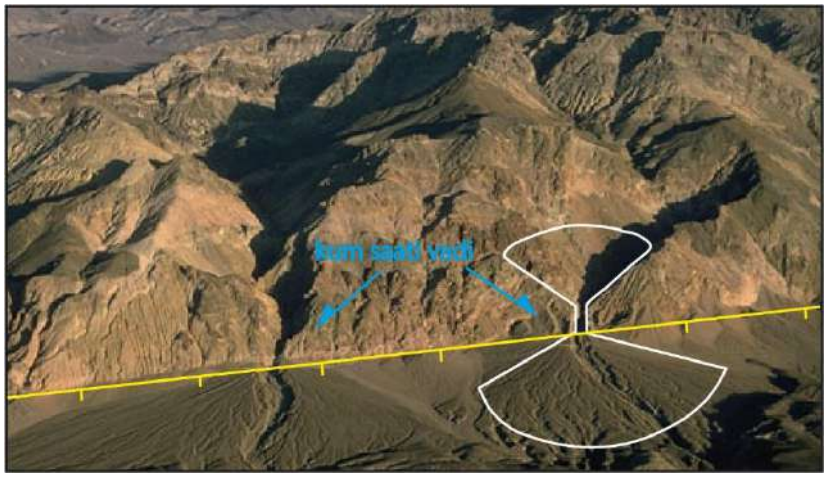
Şekil 8. Fay façetalarının evrimsel gelişimi [7]

Dağ önlerinde kullanılan farklı morfometrik indisler vardır. Dağ cephesi eğriselliği, genç evrede düz iken olgun evrede artmaktadır. Vadi genişliği, genç evrede dar iken olgun evrede genişlemektedir. Façetalar, genç evrede yüksek eğimliyken olgun evrede eğim düşmektedir. Yüzey erozyonu genç evrede az iken olgun evrede fazladır. Alüvyal yelpaze çökelleri, genç evrede daha fazla iken olgun evrede azalmaktadır [8].

ALÜVYAL YELPAZELER: Alüvyal yelpazeler, façetalarla beraber gözlenen jeomorfik yapılardandır. Façetaları sınırlayan vadilerden gelen akarsuların normal fayı aşıp geniş bir düzlüğe ulaştığı alanlarda görülür (Şekil 7a). Arazi eğiminin azalmasına bağlı olarak ortalama akış hızı düşerken dar bir kanala hapsolmuş akarsu, geniş bir yatağa kavuşur ve akarsu tarafından taşınan ayrışma malzemesi, yelpaze şeklinde depolanır. Oluşan bu depolanma dış bükey enine profile sahipken sistemin aşınma ve birikme bölümlerinin tamamı, içbükey bir profil sergilemektedir [5]. Alüvyal yelpazeler, oluşum ve biçim bakımından deltalara benzemekle birlikte tümüyle karada oluşmuşlardır. Bu yelpazeler, bir araya gelerek "bahada" denilen yapıları oluştururlar. Bahada, tipik olarak bitişik yelpazelerin birbirleriyle örtüşmesinden dolayı ondüleli bir yüzeye sahip olan geniş bir alüvyon örtüsüdür [9]. Bu yapı [10] tarafından "dağ eteği ovası" olarak adlandırılmıştır.

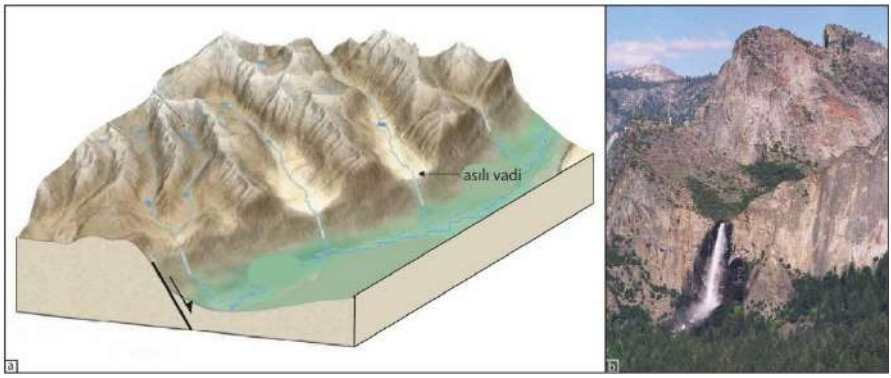
Aktivitesi hızlı olan faylarda büyük façetalar, derin vadiler ile küçük, dar ve dik alüvyal yelpazeler oluşurken aktivitesi yavaş olan faylarda küçük façetalar, sığ vadiler ile büyük, geniş ve düşük eğimli alüvyal yelpazeler oluşmaktadır.

ŞARAP KADEHİ / KUM SAATİ ŞEKLİNDEKİ VADİLER: Normal faylar üzerinde gelişen, karşıdan bakıldığında ve plan görünümde şarap kadehine ya da kum saatine benzer geometri sunan vadilerdir (Şekil 9, [11]'dan değiştirilerek). Burada kadehin tabanını, alüvyal yelpaze; kadehin ayağını, vadinin dar ağız kısmı; kadehin kendisini ise vadinin üstünde kalan geniş akaçlama kısmı oluşturur. Kayma hızı, yüksek olan normal faylarda façetalar arasında ve de genellikle kurak bölgelerde gelişirler.



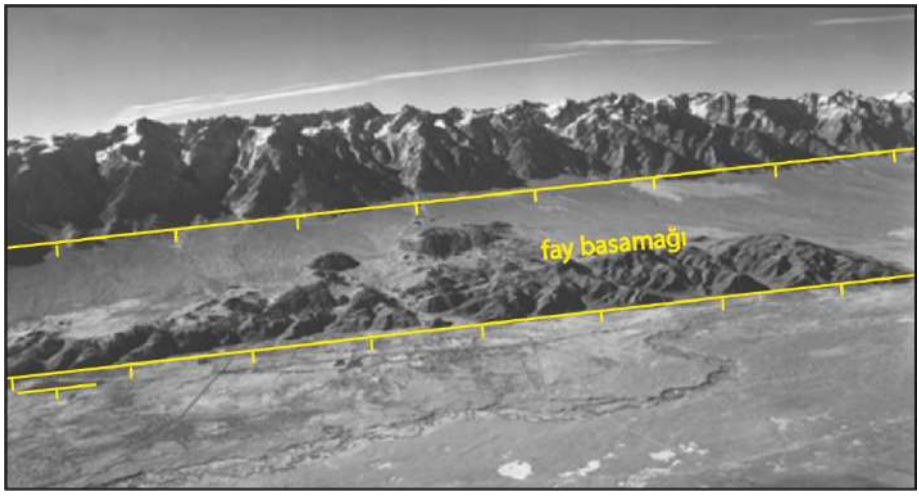
Şekil 9. Şarap kadehi / kum saati vadi örneği [11]

ASILI VADİLER: Dağ önünü sınırlayan normal fayı kesen tali vadilerin, ana vadiye inemeyip asılı kaldığı vadi tipidir. Normal fayın kayma hızının, tali vadilerin aşındırma hızından fazla olduğu yerlerde meydana gelir (Şekil 10 a, [12]'den değiştirilerek). Asılı vadiler, buzullarda da oluşabilmektedir. Buzul aşındırmasına uğrayan alanlarda, ana vadinin buzulla fazla aşınması sonucu, ana vadiye açılan tali vadilerin yüksekte kalmasıyla oluşurlar. Buzulların yüzeyleri aslında aynı yükseklikte olduğundan tali vadi, ana vadinin üzerinde asılı gibi görünmektedir. Tali vadilerde akış varsa şelaleler meydana gelir (Şekil 10 b).



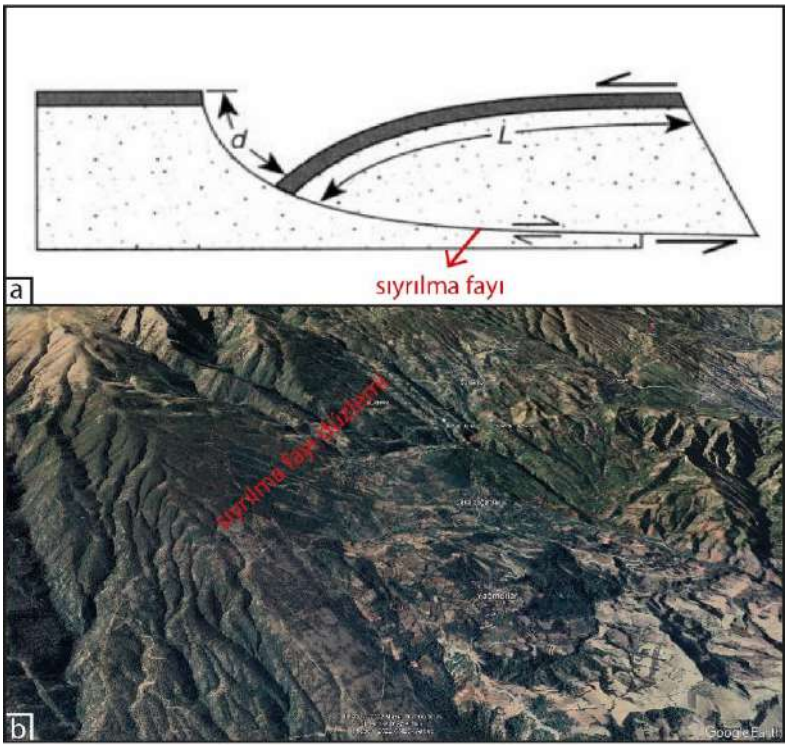
Şekil 10. a) Asılı vadi oluşum mekanizması [12], **b)** asılı vadi örneği [13]

FAY BASAMAĞI: Ana normal faya paralel olarak gelişen eşlenik fayların oluşturduğu yükselti farkından kaynaklanan basamak benzeri yapılardır (Şekil 11, [14]'den değiştirilerek). Horst ve grabenlerin kenarlarını da sınırlayabilirler. Dağın hemen önündeki fay, iç dağ önü fayı; havzaya yakın olan ise dış dağ önü fayı olarak isimlendirilir.



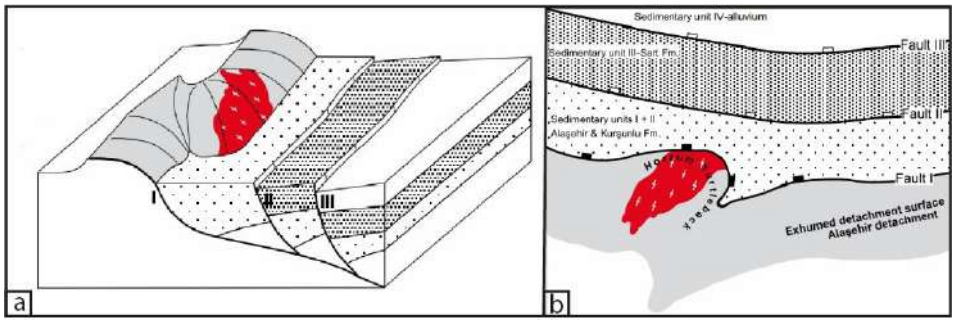
Şekil 11. Fay basamağı örneği [14]

DÜŞÜK EĞİMLİ FAY YÜZEYLERİ: Eğimi 45^0'den düşük, genellikle 30^0 olan normal faylara sıyrılma fayı (detachment) denir (Şekil 12 a, [15]'ten değiştirilerek). Eğim, yüzeyden uzaklaştıkça yataylaşır. Fayın tavan bloğu, aşağı doğru kilometrelerce kaydığından taban bloğundaki sıyrılma yüzeyi (tilted surface), net olarak gözlenir. Bu faylar, Ege Bölgesi gibi gerilme hızının çok yüksek olduğu alanlarda oluşurlar (Şekil 12 b).



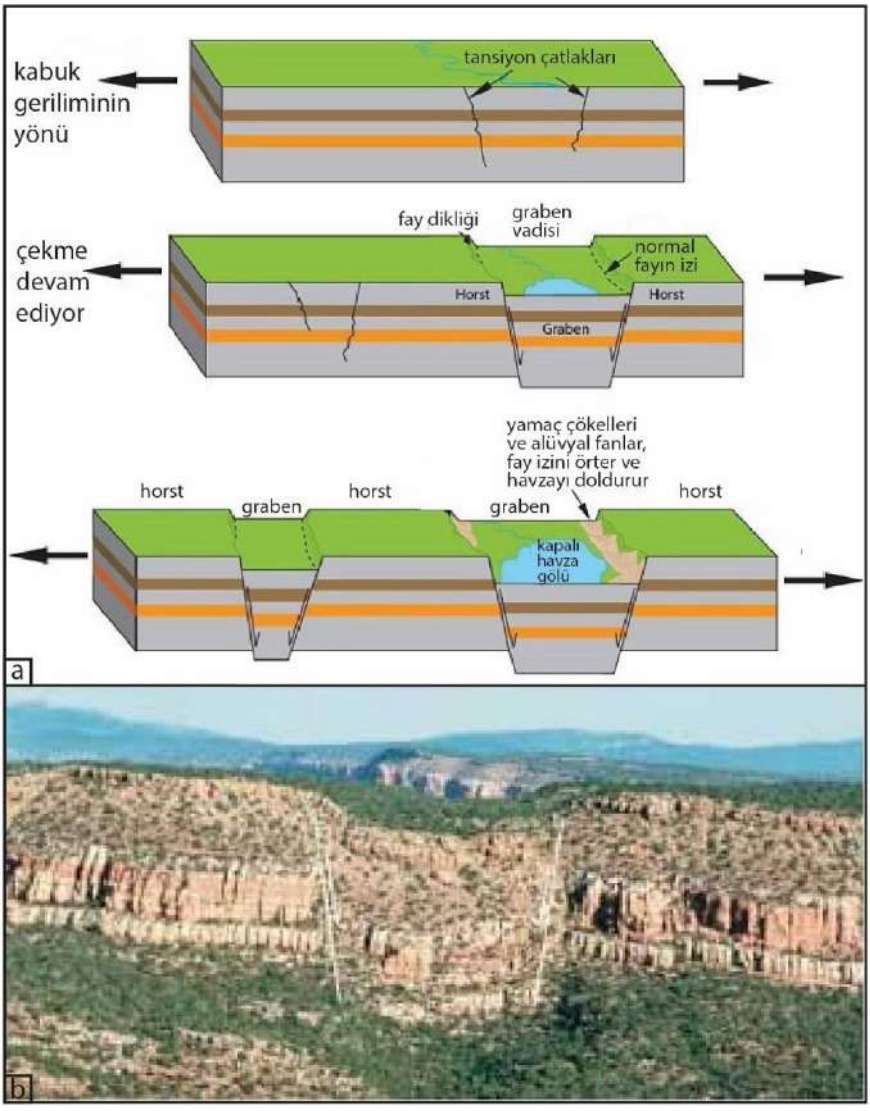
Şekil 12. a) Sıyrılma fayı oluşum mekanizması [15], **b)** Google Earth'ten sıyrılma fayı örneği [16]

KAPLUMBAĞA SIRTI YAPILARI: Gerilmenin çok yüksek olduğu alanlarda normal fay aynasında, alttan intrüzyonların yüzeye çıkmasıyla oluşan kaplumbağa kabuğuna benzer yapılardır. Bu yapının oluşması için üç temel unsur gerekmektedir. Bunlar; 1) normal fay üzerinde dönen bir eklem mekanizması, 2) normal fayın segmentleri arasında bir aktarım rampası (relay ramp), 3) normal fayın taban bloğunda görülen orta kabuk seviyesine ait olan bir sokulum ([17], Şekil 13)



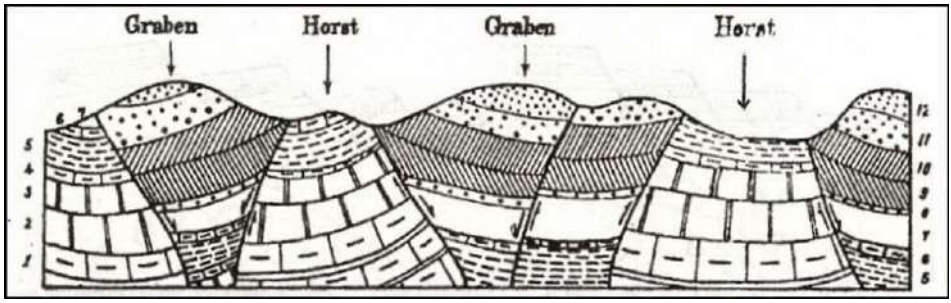
Şekil 13. Kaplumbağa sırtı yapısının [17] **a)** oluşum mekanizması, **b)** harita görünümü

HORST VE GRABEN YAPILARI: Yerkabuğunda çekme gerilmelerinin etkin olduğu bölgelerde yapısal açıdan önemli olan, bölgesel ölçekli iki yer şekli meydana gelir. Bunlar, bir arada bulunan horst ve graben yapılarıdır. Horst, çekme kuvvetine dik gelişen iki normal fay arasında bulunan ve nispi olarak yukarı doğru yükselmiş fay bloğu; graben ise yine iki normal fay arasında bulunan ve nispi olarak aşağı doğru çökmüş fay bloğudur. Horstlar, dağları; grabenler, uzun, düz ve dar havzaları oluşturur (Şekil 14a [18]'den değiştirilerek) ve 14b). Bu yapıları oluşturan fayların eğimleri 45^0'nin üzerindedir ve fay düzlemi, düzdür; yani derinlere doğru eğim değişmez, tilting yoktur; dolayısıyla basamaklanma vardır. Birbirini tamamlayan bu jeomorfolojik yapılar, tansiyon kuvveti etkisiyle meydana gelip yerkabuğunda, uzama, incelme ve genişlemeye sebep olurlar.



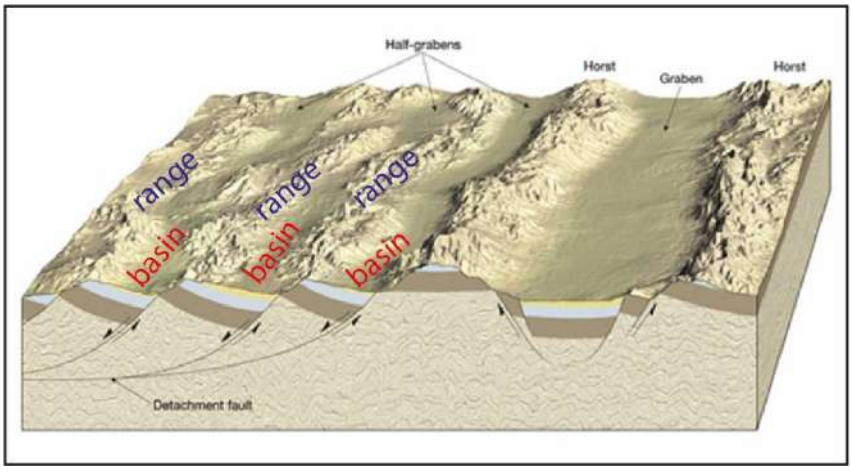
Şekil 14. a) Horst ve grabenin oluşum mekanizması [18], **b)** arazi örneği [19]

Horstlar, dağları; grabenler, havzaları oluşturmakla beraber bazı hallerde horstları meydana getiren kayaçların dayanımı, düşük olabilmektedir. Bu arazilerde, aşınma çok daha hızlı olacağı için aslında bir yükselim olması gereken horstlar, alçak bir topografya; grabenler ise yüksek bir topografya meydana getirebilirler. Bu olaya "morfoloji terslenmesi" veya **"**rölyef terslenmesi" denir (Şekil 15).



Şekil 15. Horst ve grabenlerde morfoloji terslenmesi [20]

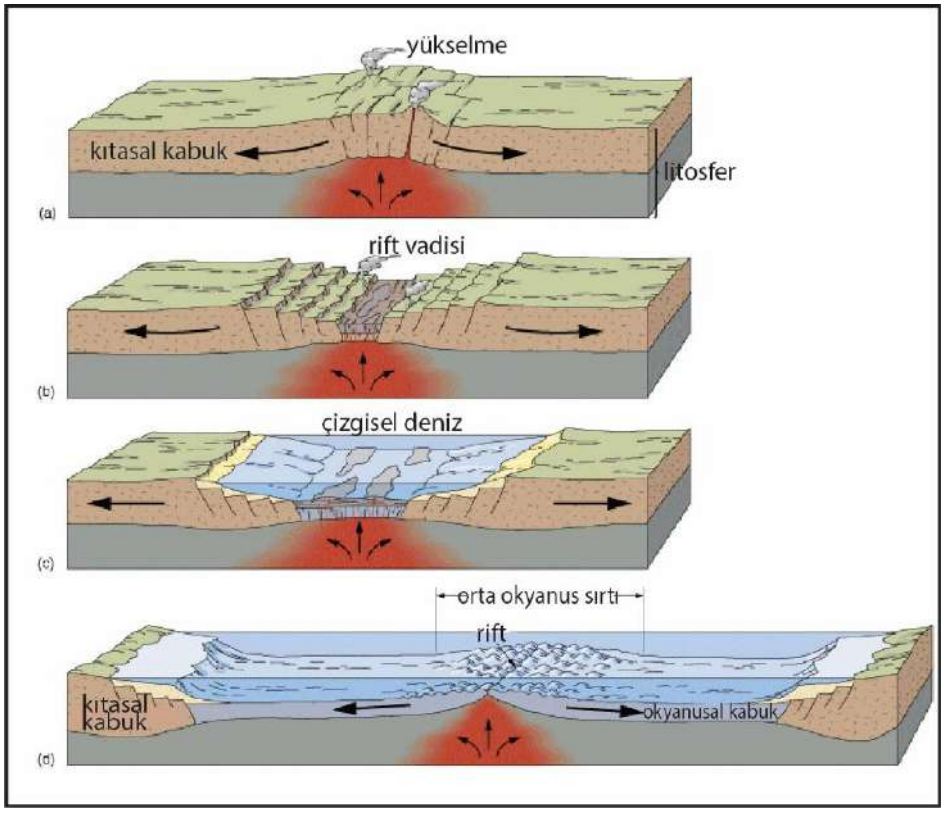
Horst ve grabenin tek tarafı, normal faylarla sınırlıysa "yarı horst" ve "yarı graben" adını alır. Eğer bu yarı horst ve grabenler, listrik ve sıyrılma fayı (detachment) üzerinde gelişirse bloklarda fayın eğim düşüklüğünden kaynaklı tiltlenme meydana gelecektir. Bu durumda gelişen havzalar, düzlüğünü kaybedecektir. Basin and Range bölgesinin oluşumu, bu duruma örnektir. Basin, yarı grabene; range ise yarı horsta karşılık gelmektedir (Şekil 16).



Şekil 16. Basin and Range bölgesinin oluşum mekanizması [21]

RİFT VADİLERİ: Bir kıtanın altına magma sokulduğu zaman kabuk başta yükselmekte, gerilmekte ve incelmekte olup bunun sonucunda normal fayları ve rift vadilerini oluşturur. Bu aşamada magma, kırıkların içine sokularak silleri, daykları ve lav akıntılarının oluşturur; lav akıntıları, çoğunlukla rift vadisinin tabanını kaplar. Bu kıta parçalanması aşamasının en iyi örneği, Doğu Afrika Rift Vadisi'dir. Yayılma ilerledikçe kıtasal litosfer, parçalanıp iki kıta bloğuna ayrılır ve dar, çizgisel bir deniz haline gelinceye kadar uzamaya ve derinleşmeye devam eder. Arabistan Yarımadasını Afrika'dan ayıran Kızıldeniz, riftleşmenin daha

ileri aşamasını gösteren bir örnektir. Yeni oluşan dar deniz, genişlemeye devam ettiğinde bugün Kuzey-Güney Amerika ve Avrupa-Afrika'yı binlerce km uzaklaştıran orta okyanus sırtı (Atlas Okyanusu) gibi geniş bir okyanus havzası haline gelebilir [9]. Bu da, riftleşmenin en ileri aşamasıdır (Şekil 17).



Şekil 17. Riftleşme aşamaları [22]

Rift ve grabenler, oluşum mekanizması açısından aynı olmakla beraber ölçek yönünden birbirlerinden ayrılırlar. Grabenler, bölgesel ölçekli; riftler ise kıtasal ölçekli yapılardır. Aynı zamanda grabenler, kabukla sınırlı olup riftler ise litosferi keserler.

KAYNAKLAR

[1] https://opentextbc.ca/geology/chapter/12-3-fracturing-and-faulting/ Kasım 2022

[2] Iezzi, F., Mildon, Z., Walker, J. F., Roberts, G., Goodall, H., Wilkinson, M. and Robertson, J. 2018. Coseismic throw variation acrossalong-strike bends on active normalfaults: Implications for displacementversus length scaling of earthquakeruptures. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 9817–9841. https://doi.org/10.1029/2018JB016732

[3] https://www.ipgp.fr/en/tecto/landscapes-of-human-evolution Kasım 2022

[4] http://www.cografyasozlugu.com/index/index/S/934 Kasım 2022

[5] Keller E.A. and Pinter N., 2002. Active tectonics: Eartquake, uplift and landscape (2th Edition). Prentice Hall, Inc, New Jersey, pp. 362.

[6] https://tr.pinterest.com/pin/320670435951985851/ Kasım 2022

[7] Bull, W.B., 2007. Tectonic geomorphology of mountains. Blackwell Publishing, UK, pp 316.

[8] Topal, S., Keller, E., Bufe, A. and Koçyiğit, A., 2016. Tectonic geomorphology of a large normal fault: Akşehir fault, SW Turkey. Geomorphology, 259, 55-69.

[9] Dirik, K. ve Şener, M., 2005. Fiziksel Jeoloji. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Çeviri Serisi, No: 1, ss 642.

[10] Charlton, R., 2008. Fundamentals of fluvial geomorphology. London: Routledge, pp 234.

[11] https://www.marlimillerphoto.com/SrA-06.html Kasım 2022

[12]https://evrimagaci.org/buzul-nedir-buzullarin-olusturdugu-yeryuzu-sekilleri-nelerdir-7888 Kasım 2022

[13] https://tr.wikipedia.org/wiki/Vadi Kasım 2022

[14] https://pubs.usgs.gov/imap/2617/ Kasım 2022

[15] Twiss, R. J., and Moores, E. M., 1992. Structural geology. Macmillan.

[16] Google Earth görüntüsü Kasım 2022

[17] Seyitoğlu, G., Işık, V. and Esat, K., 2014. A 3D model for the formation of turtleback surfaces: the Horzum Turtleback of western Turkey as a case study. Turkish Journal of Earth Sciences, 23, 479-494.

[18] https://www.nps.gov/articles/horst-and-graben.htm Kasım 2022

[19] https://www.google.com/imgres?imgurl/ Kasım 2022

[20] Ketin, İ., 1994. Genel Jeoloji: Yerbilimlerine Giriş. İTÜ vakfı yayınları.

[21] https://cografyahocasi.com/kpss/turkiyenin-daglari-2.html Kasım 2022

[22] https://www.quora.com/What-is-a-rift-Valley-and-how-is-it-formed Kasım 2022

TERS FAYLAR ETKİSİYLE OLUŞMUŞ JEOMORFOLOJİK YAPILAR

Serap ÇOLAK EROL

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1957-3012

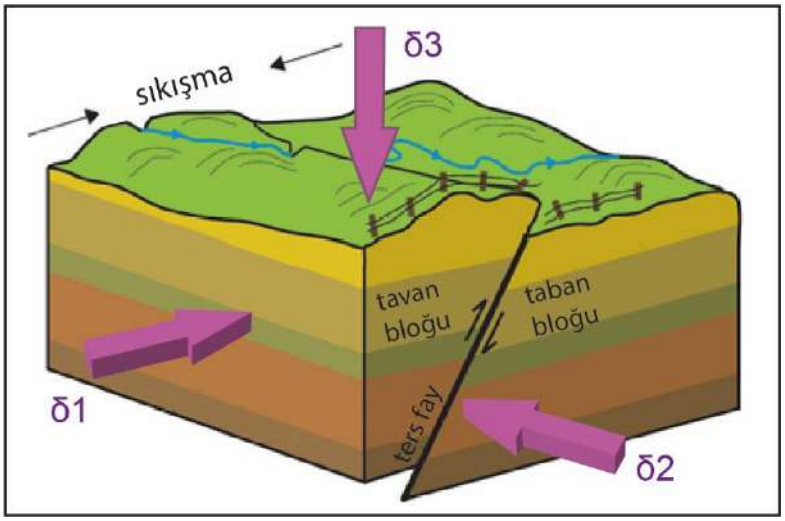
Faylar, yaygın jeolojik yapılar olup yerkabuğundaki deformasyon enerjisinin artması sonucunda gelişen bir kırık türüdür. Basınç kuvvetleri, kayaçların dayanımlarını aştığında, o ana kadar kıvrılarak plastik deformasyonla cevap vermiş olan kayaçlar bu kez kırılarak ters fayları oluştururlar.

Faylar birçok kritere göre sınıflandırılmakla birlikte en sık kullanılanı, mekanik özelliklerine göre yapılan sınıflamadır. Bu sınıflamada faylar, faylanmayı meydana getiren asal gerilme eksenlerinin yeryüzüne göre konumu dikkate alınarak normal, ters ve doğrultu atımlı faylar olarak üçe ayrılırlar. Bu çalışmanın temelini teşkil eden ters faylarda tavan bloğu, taban bloğuna göre fay düzlemi boyunca göreceli olarak yukarıya doğru hareket eder (Şekil 1). Hareket vektörü, fayın doğrultusuna dik; eğimine paralel ise saf eğim atımlı ters fay oluşur. Hareketin doğrultusunu da gösteren kayma çizikleri (fay çizikleri), fayın doğrultusuna dik değilse, eğik (verev, oblik, diyagonal) atımlı ters faylardan bahsedilir. En büyük asal gerilme olan δ_1 ve orta asal gerilme olan δ_2 yatay; en küçük asal gerilme olan δ_3 ise düşeydir.

Fay düzleminin yatay düzlemle yapmış olduğu açıyı ifade eden eğim açısı, 45º'den büyükse büyük açılı ters fay; 45º'den küçükse küçük açılı ters fay; 10º-35º arasında ise bindirme fayı veya şaryaj; 0º-10º arasında ise örtü fayı veya nap adını alırlar.

Ters faylarda genelde yaşlı birimler, genç birimlerin üzerine gelir. Fay boyunca alınan düşey kesitte stratigrafi, tekrarlanır. Bunlar, yerkabuğunun kısalma ve kalınlaşmasına sebep olurlar.

Ters faylar, her ölçekte gelişebilirler. Ölçekleri büyüdükçe atımları da büyümektedir. En küçük ters faylarda atım, milimetreden metreye; dağ ölçeğindeki ana bindirme zonlarında atım, onlarca, yüzlerce kilometreye; konverjan levha sınırlarında ise atım, binlerce kilometreye çıkmaktadır. Bu faylarla ilişkili olarak aşağıda verilen birçok yer şekli meydana gelir.



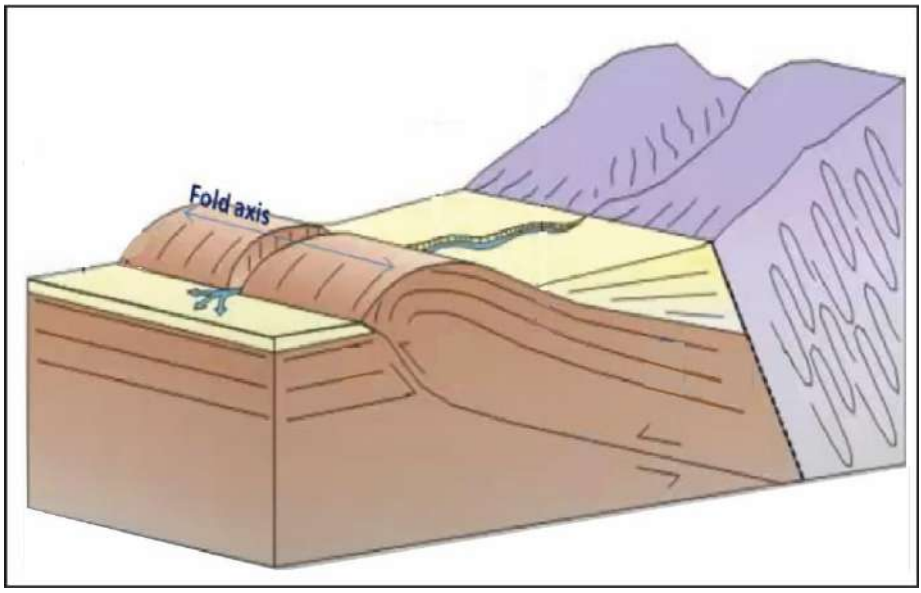
Şekil 1. Ters faya ait blok diyagram ve kendisini oluşturan asal gerilmeler, [1]'den değiştirilerek

FAY DÜZLEMİ: Kayma hareketinin geliştiği düzlemdir. Fay düzleminin arazide görülmesi, fayın varlığının kesin kanıtıdır. Fay düzlemi, düşey kesitte aynı birimin tekrarlanmasıyla; harita görünümündeyse kabarmalarla kendini gösterir (Şekil 1-3). Bindirme hareketi sonucu oluşan kabarmalara bağlı olarak yükselen bloğun ön kesiminde oldukça düzensiz şekilli bir fay dikliği gelişir. Ters fayın eğim açısı düştükçe topoğrafya üzerindeki fay izi de, V kuralına uygun olarak daha girintili çıkıntılı bir yüzeyleme verir. Bindirmenin uç tarafındaki kayaçlar, aşınarak ön kesimindeki çukurluklarda depolanır. Aktif bindirmeli bölgelerde, bindirme fayı bu yığışımlar üzerine itilmeye devam eder. Fayın atımı, yüzeye yaklaştıkça azalır.

Şekil 2. Ters fay [2]

Şekil 3. Ters faylanmış bir atletizm pistinin [3] **a)** hava fotoğrafı, **b)** yakından görünümü; kabaran bölge tavan bloğunu göstermektedir.

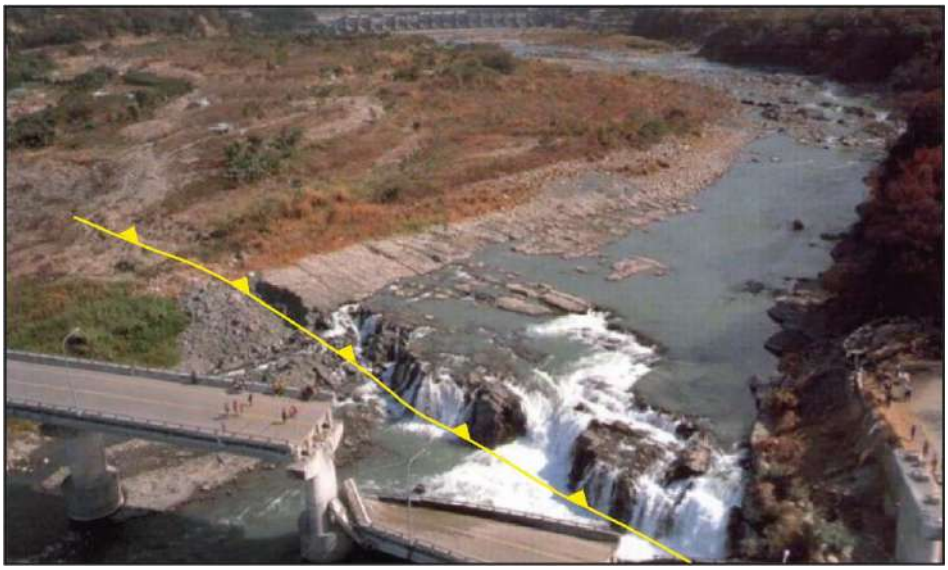
FAY SARPLIĞI: Aynı fay üzerinde meydana gelen birçok deprem sonucu fay düzleminin daha da büyüyüp sarplaşmasıyla belirgindir (Şekil 4). Fay düzlemi, metreden kilometre boyutuna kadar yüzeyleme verebilir.



Şekil 4. Bir fay sarplığı örneği [4]

ŞELALE / SU BASAMAĞI: Bir akarsu, belirgin bir ters faylanmaya uğrarsa akarsuyun eğim profilinde basamaklanma; profil boyunca oluşan bu basamaklarda da şelaleler meydana gelir (Şekil 5, [5]'ten değiştirilerek). Şelale

yükseklikleri, birkaç metreden yüzlerce metreye kadar değişebilir. Jeomorfolojide, "gençleşme başı" olarak ta adlandırılmaktadır.



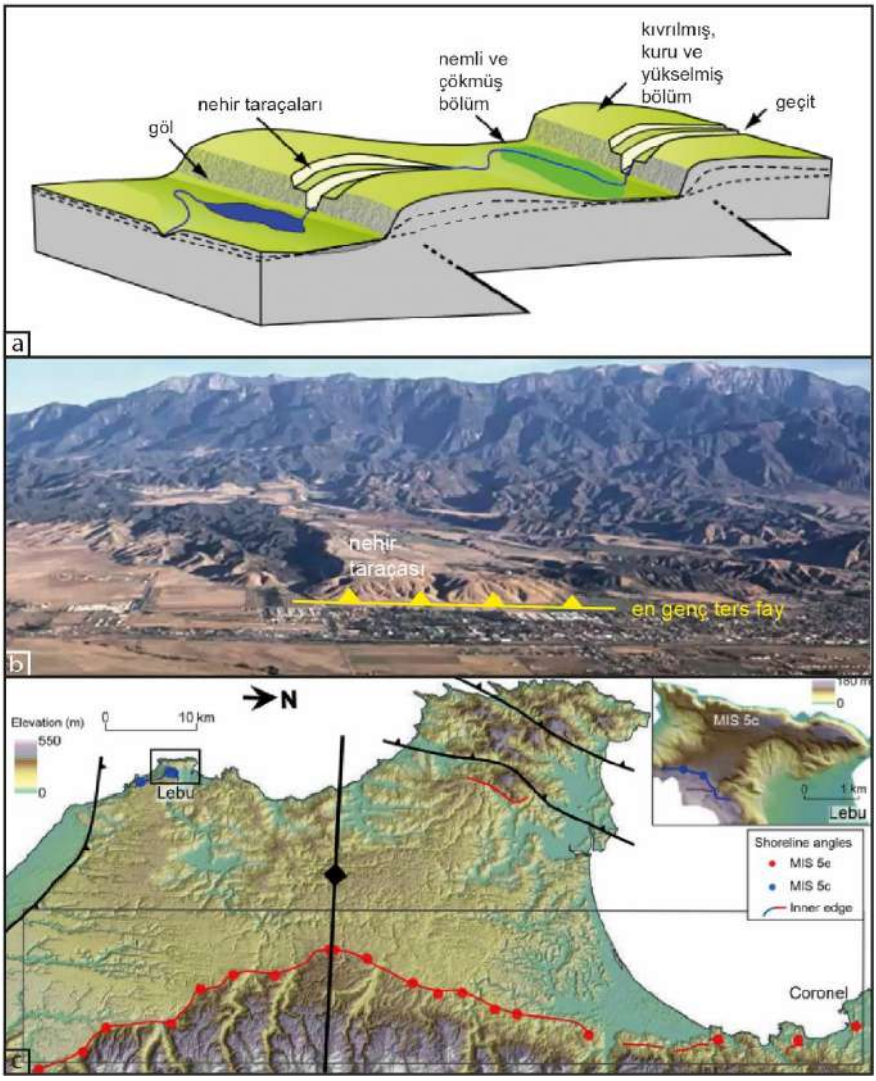
Şekil 5.) Bir su basamağı arazi örneği [5]

TARAÇA / SEKİ: Akarsular, kendi yatağında biriktirdiği alüvyonları, yeniden aşındırma sonucunda eski taşkın ovalarını terk ederek derine doğru kazarlar. Yeni taban seviyesine göre yatağını ayarladığında tekrar biriktirme yapmaya başlar. Yeni seviye ile eski seviye arasında oluşan basamağa taraça denir. Bunlar, akarsuların eski vadi tabanları veya taşkın ovalarıdır (Şekil 6a, [6]'den değiştirilerek; 6b, [7]'den değiştirilerek). Oluşum kökenleri, taban seviyesinde meydana gelen değişime bağlı olarak tektonik veya iklimsel olabilir.

Akarsu, boyuna profili boyunca ters faylar tarafından dik veya dike yakın kesildiğinde tavan bloğunda yükselme meydana geldiğinden akarsu, yatağını derine kazar. Taban bloğunda oluşan tiltlenmeden (geriye eğimlenme) dolayı bir göllenme oluşur. Gölden taşan sular, akarsu olarak tekrar akışa geçer. Sintetik faylar boyunca bu döngü, devam eder.

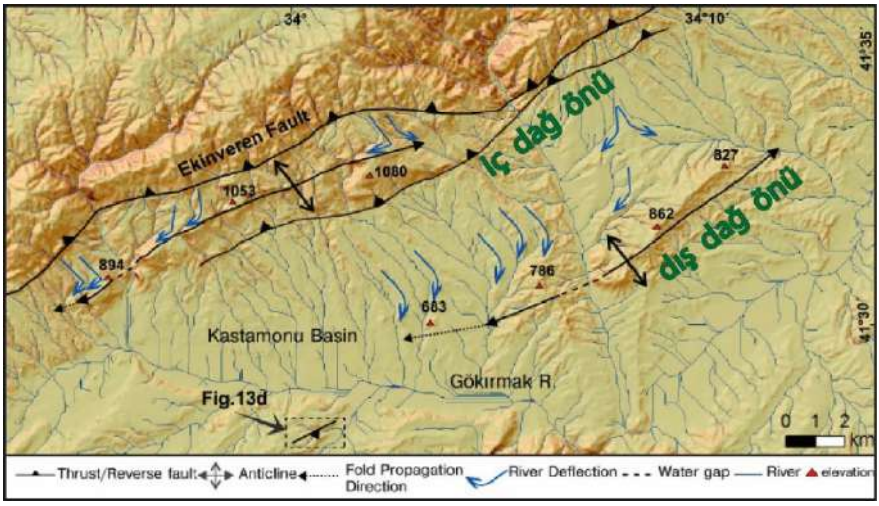
Bu taraçalar, jeolojik önemlerinden dolayı kullanışlı bir jeomorfik belirteçtir. Taraçalar, özel tekniklerle yaşlandırıldığında ve yükseklikleri ölçüldüğünde kayma miktarını ve oluşum zamanını; buna bağlı olarak ta fayın kayma hızını buluruz.

Teraslar, akarsular boyunca oluştukları gibi deniz kenarlarında da oluşabilmektedir. Fayın ilerlemesine bağlı olarak bindirme faylarının tavan bloğu üzerinde yükselmiş denizel taraçalar, fayın yükselim hızı hakkında bilgi verirler (Şekil 6c).



Şekil 6. a) Bir akarsu yatağının ters faylanmasıyla oluşan yer şekillerini gösteren blok diyagram [6], **b)** güncel taraça örneği [7], c) denizel taraçaların sym üzerinde görünümü [8]

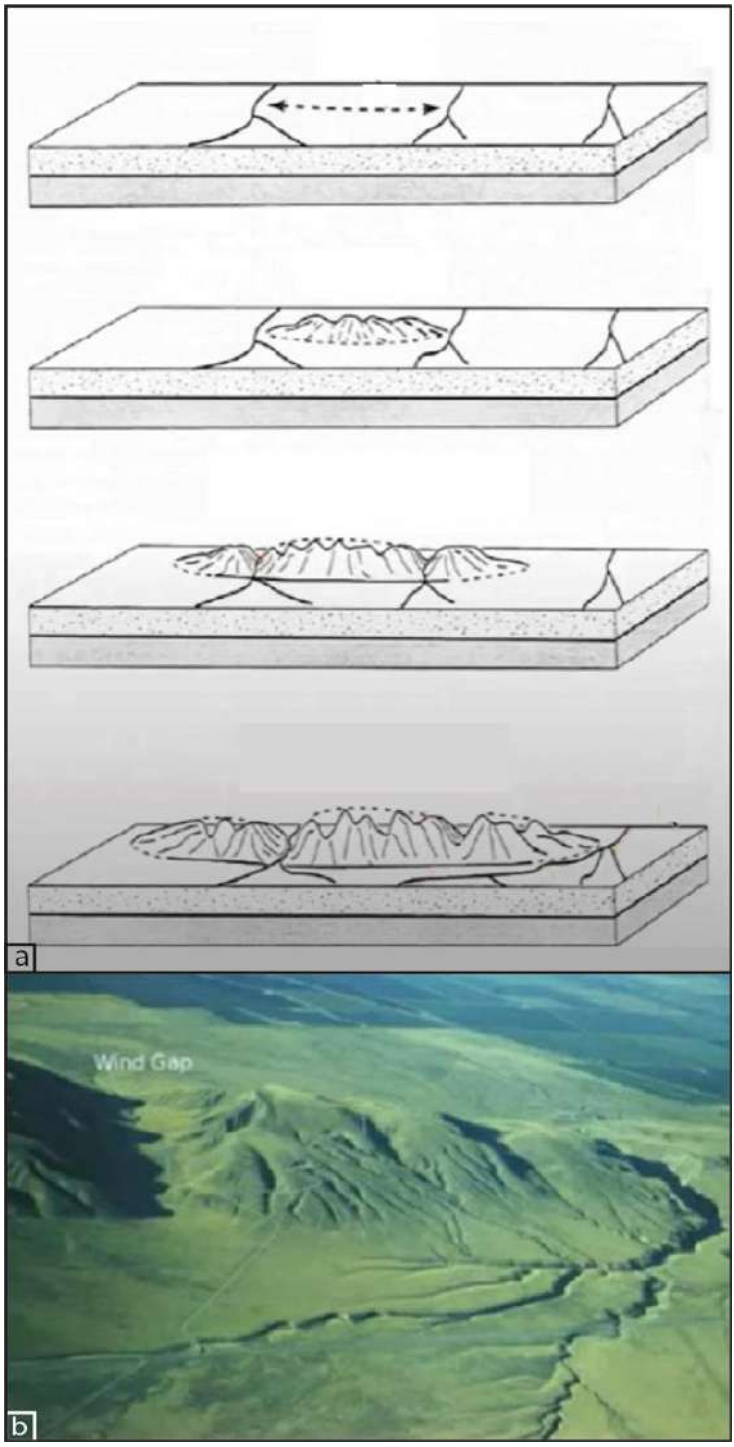
İÇ VE DIŞ DAĞ ÖNÜ FAYLARI: Genellikle sintetik ters faylar, havzaya doğru ilerleme eğilimindedirler. Dağ ile havzayı ayıran ilk faya, "iç dağ önü fayı"; havzaya en yakın olan faya ise "dış dağ önü fayı" denilmektedir. Bu ilerleme esnasında ters faylar, daha yaşlı ve büyük olan iç dağ önlerini terk edip kendilerine daha genç ve küçük olan dış dağ önleri oluştururlar. İç ve dış dağ önü ters fayları, birbirlerine yaklaşık paraleldirler. Kırıklarla beraber kıvrımlar da gelişir (Şekil 7, [2]'den değiştirilerek).



Şekil 7. İç ve dış dağ önleri [2]

EĞİMLENMİŞ ÇÖKELLER: Faylar, iç dağ önünden havzaya doğru ilerledikçe normalde ilksel konumlarında yatay olması gereken pediment (dağ eteği ovası / düzlüğü), alüvyal yelpaze ve akarsu taraçaları gibi yapıları geriye doğru eğimlendirir / tiltlendirir. Bu geriye doğru eğimlenmeye sebep olan genç ters fay, yüzeye kadar çıkmayıp gömülü / kör bir fay da olabilir.

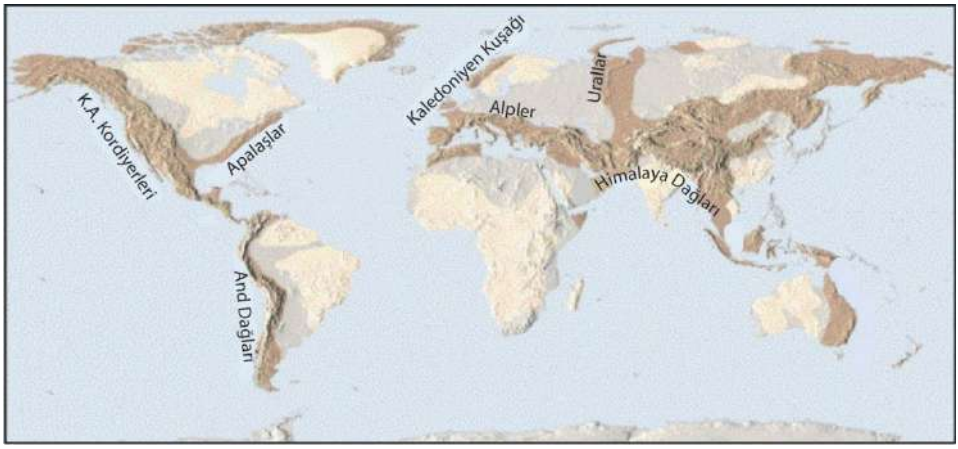
AKARSU SAPMASI: Kıvrımlar ya da yüzeye kadar çıkmayan kör faylar dahi, dış dağ önünde gelişirken alüvyal çökelleri kıvrımlandıracaklardır. Bu zemin üzerinde akan bir akarsu sistemi varsa ve akarsuyun aşındırma hızı, kıvrım / ters fayın yükselme hızından fazlaysa akarsu hareketine devam edecektir. Ancak akarsuyun aşındırma hızı, kıvrım / ters fayın yükselme hızından az ise akarsu yatağını yana doğru saptıracaktır. Bu olaya "akarsu sapması" denir. Şekil 8.a'da soldaki akarsuyun aşındırma kuvveti, kıvrım / ters fayın yükselme hızından fazla olduğu için akarsu yatağında akmaya devam etmiştir. Ancak sağdaki akarsuyun aşındırma hızı, kıvrım / ters fayın yükselme hızından az olduğundan yatağını sağa doğru saptırmıştır. Şekil 7 ve 8.b'de ise bu olayın güncel bir örneği verilmiştir. Akarsuyun terk ettiği yatak, "kuru vadi" ya da "rüzgâr boşluğu" olarak adlandırılır. Kuru vadideki akarsu çökelleri yaşlandırıldığında, vadinin terkedilme yaşı; buna bağlı olarak ta kıvrım / ters fayın yükselme hızı bulunur.



Şekil 8. a) Bir kıvrımın gelişmesiyle akarsuyun sapması arasındaki ilişkiyi gösterir blok diyagram [9], **b)** güncel örneği

OROJENİK KUŞAKLAR: Levha tektoniği ölçeğindeki sıkışma yapıları olan orojenler, kıvrımlı-bindirmeli sıradağların daha dış kesimlerindeki kıvrılma ve faylanma ile daha iç kesimlerindeki plastik kıvrımlanma, plutonizma ve metamorfizma tarafından oluşturulan yapılarla temsil edilen bir kuşaktır. Dar ve uzun bir geometriye sahip olan bu orojenik kuşaklar içerisinde birbirine paralel dağ sıraları bulunmaktadır. Bu tür dağ sıraları, levhaların birbirine yaklaştığı ya da aralarındaki okyanusun tamamen kapanıp kıtaların çarpıştığı yerlerde oluştuğundan, yapılarında birbirine paralel çok sayıda ters fay (özellikle de bindirme fayları), antiklinal ve senklinaller bulunur. Ülkemizdeki en iyi örneği, Bitlis Kenet Kuşağı (Bitlis Sütur Zonu) boyunca gelişmiş olan sıkışma yapılarıdır. Çarpışma sonucunda kenet boyunca dağ kuşakları yükselmiş ve sığ denizel ortam, molas havzalarına dönüşmüştür.

Orojenik kuşaklara dünyadan, Kuzey Amerika Kordiyerleri (Kayalık Dağları), Güney Amerika And Dağları, Pireneler, Alp-Himayala Dağ Kuşağı gibi devasa yapılar örnek olarak verilebilir (Şekil 9). Bu orojenik kuşaklar içerisinde orojenik platolar da yer alır. Platolar, yüksek rakımlı, düşük rölyefli yer şekilleridir. Bunlara örnek olarak İran ve Tibet platoları verilebilir.



Şekil 9. Dünyadaki orojenik kuşaklar [10'dan değiştirilerek]

KAYNAKLAR

[1] https://opentextbc.ca/geology/chapter/12-3-fracturing-and-faulting/ Kasım 2022

[2] Yildirim, C., Schıldgen, T. F., Echtler, H., Melnıck, D., and Strecker, M. R., 2011. Late Neogene and active orogenic uplift in the Central Pontides associated with the North Anatolian Fault: Implications for the northern margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey. Tectonıcs , vol.30.

[3]https://cantilevered.blog/2019/01/23/the-extraordinary-921-earthquake-museum-of-taiwan/ Kasım 2022

[4] http://www.tabasenc.ir/tabas-earthquake/ Kasım 2022

[5] https://tr.pinterest.com/pin/157485318204300140/ Kasım 2022

[6] https://www.ipgp.fr/en/tecto/landscapes-of-human-evolution Kasım 2022

[7]https://geomaps.wr.usgs.gov/archive/socal/geology/inland_empire/compressional_faults.htm Kasım 2022

[8] Julius Jara-Muñoz, Daniel Melnick, Dominik Brill, Manfred R. Strecker, Segmentation of the 2010 Maule Chile earthquake rupture from a joint analysis of uplifte marine terraces and seismic-cycle deformation patterns, 2015. Quaternary Science Reviews, Volume 113, 171-192.

[9] Keller E.A. and Pinter N., 2002. Active tectonics: Eartquake, uplift and landscape (2th Edition). Prentice Hall, Inc, New Jersey, pp. 362.

[10]https://docplayer.biz.tr/96474571-The-lecture-notes-has-been-compiled-from-the-following-sources.html Kasım 2022

GÖL TUZUNUN KURUTULMASINA HAVA HIZININ ETKİSİ

Sultan PEKTAŞ[1], Soner ÇELEN[2], Aytaç MORALAR[3]

[1] ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2922-5871
[2] ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5254-4411
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3964-4909

1. GİRİŞ

Günümüzde tuz, gıda alanında tat vermek dışında kimya ve sanayi alanında da kullanılmaktadır. Tuzun üretiminde kurutma prosesi yer almakta olup, işleneceği alana uygun değerlere getirilmektedir. Uzun ömürlü olması ve bozulmaması için kurutma tuz üretiminde önemli bir yer almaktadır (Demirkol, Çiftçi ve Çiftçi, 2018).

Kurutma, bir ısı kaynağı yardımıyla bir maddeden nemin uzaklaştırılması işlemidir (Durmuş vd., 2012). Kurutma, aynı anda ısı ve kütle transferini içeren karmaşık bir işlemdir. Su molekülü taşınması, kılcal hareket, sıvı difüzyon, buhar difüzyonu ve hidrodinamik gibi moleküler difüzyon dahil olmak üzere kurutma işlemi ile yakın bir ilişkiye sahiptir (Çelen vd., 2017). Kurutma günümüzde birçok endüstride kullanılan bir işlemdir. Bunlardan biri de gıda sektörüdür. Genel olarak tarım ürünlerinin büyük bir kısmı doğal kurutma yöntemleri ile kurutulmaktadır. Bu şekilde kurutulan ürünler hem iç hem de dış piyasada kalite ve değer kaybı gibi ekonomik sorunlarla karşılaşılmaktadır. Ayrıca açık havada yapılan doğal kurutma işlemi nedeniyle kuru bir ürün elde etmek uzun zaman almaktadır (Çelen vd., 2018).

Kurutulacak ürünün yapısı, kullanılacak enerji kaynağı ve kurutma kapasitesi gibi koşullar kurutma tipini belirlemektedir. Akışkan yataklı kurutucular, nemli ürünü akışkanlaştırarak, ürünün havada belli bir süre asılı kalmasını sağlayarak, kurutma işlemi yapılan proses sistemleridir. Ürünün havada asılı kalması için alttan hava beslenir ve partiküle etki eden yerçekimi kuvveti yenilir. Bu sayede hava ile temas yüzeyi arttırılarak maksimum kurutma sağlanmış olur. Tasarım giriş ürün değerleri ve istenilen çıkış ürün değerlerine uygun belirlenmelidir. Ürünün yapısına uygun seçilen kurutma sıcaklığı, kapasite doğrultusunda belirlenen yatak yüksekliği ve akışkanlaşma için gerekli hava kapasitesi makinenin dış ölçülerini belirlemekte önemli kriterleri oluşturmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında statik akışkan yataklı kurutucuda tuz ürünün kurutulması incelenmiştir. Kurutma performansını etkileyen hava hızı (1.36 m/s, 1.66 m/s ve 1.96 m/s), hava sıcaklığı (120°C) ve yatak yüksekliği (70 mm) parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Parametrelerden yatak yüksekliği, sıcaklık sabit tutularak hava hızı değiştirilmiştir. Basınç düşümü değerleri hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda pilot bir akışkan yataklı kurutucuda tuz ürünün kurumasına bu parametrelerin nasıl etki ettiği saptanarak daha sonra imal edilecek ana makine için temel oluşturması hedeflenmektedir (Pektaş, 2022).

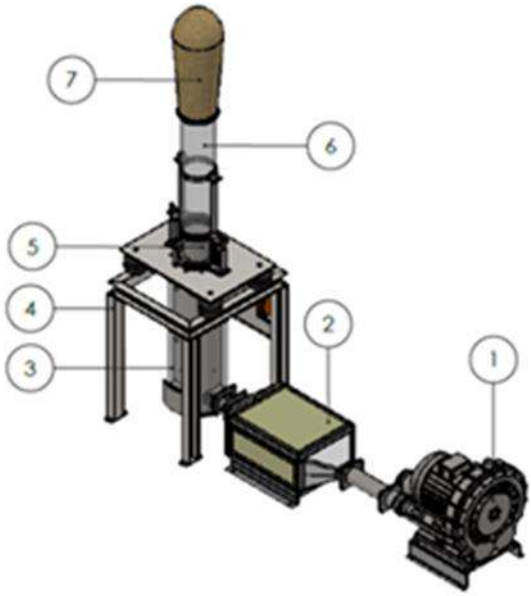
2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Denemelerde Kullanılan Materyaller

Bu çalışmada kullanılan tuz, İzmir Tuz Gölü'nden alınan göl tuzu olup, yerel bir firmadan temin edilmiştir. Deneylerde kurutmaya tabi tutulan tuz ham tuz olmayıp, belirtilen işletmede belirli işlemlerden (ön işlemler, buharlaştırma, öğütme, yıkama, santrifüj vb.) geçirilerek kurutma şartlarına getirilen tuzdur.

Kurutma sistemi

Denemeler, Şekil 2.1' de gösterilen Asos Proses Makine firmasına ait laboratuvar tip statik akışkan yataklı kurutucuda yapılmıştır.



Şekil 2.1. Laboratuvar tip statik akışkan yataklı kurutucu sistemi

1: Basınçlı kurutma havasının sağlandığı fan ekipmanı, 2: Rezistanslı ısıtıcı, 3: Sıcak havanın makine içerisine aktarıldığı kanal, 4: Kurutucu şasesini, 5: Ürün haznesini, 6: Cam kolon, 7: filtre bezi

Nem Tayin Cihazı

Bu çalışmada Şekil 2.2'de görseli yer alan Radwag marka MA50.R model nem tayin cihazı kullanılmıştır. Çalışma prensibi; nem değeri ölçülmek istenilen numunenin başlangıç ağırlığı ve kurutma işlemenin sonunda oluşan yeni ağırlık değeri arasında farkı hesaplayarak yüzde olarak nem değerini vermektedir.

Şekil 2.1. Radwag MA50.R nem tayin cihazı

Elek Sarsım Cihazı

Elek sarsım cihazında, ölçülmek istenilen ürünün partikül çapları göz önüne alınarak elek seçimi yapılmaktadır. Seçilen elekler en büyük delik açıklığına sahip elekten başlayarak yukarıdan aşağıya doğru küçülen açıklık olacak şekilde dizilmektedir. Eleme işlemi tamamlandığında eleklerin üzerinde toplanan ürünler tartılarak o partikül boyutunda ne kadar ürün olduğu sonucuna ulaşılır. Toplam elenen ürün miktarı tane boyutu bazında oranlayarak boyutsal dağılım yapılmaktadır. Bu çalışmada Şekil 2.3'te görseli mevcut olan Retcsh marka As 200 Basic model elek cihazı kullanılmıştır.

Şekil 2.3. Retcsh As 200 Basic marka elek cihazı

Yapılan elek analizinde test 90 d/dak değerinde 10 dakika süre boyunca yapılmıştır. Elek analizinde öncelikle 200 gram tane dağılımı yapılacak ürün tartılarak hazırlanmıştır. Ardından kullanılacak eleklerin ağırlıkları tartılmıştır. Eleme cihazında işlem tamamlandıktan sonra elekler yeniden tartılarak elek üzerinde kalan tuz miktarları bulunmuştur.

2.2 Analiz Yöntemi

Yaş baza göre nem miktarı, bir ürün içerisindeki su miktarının toplam ürün ağırlığına olan oranı olarak tanımlanır. Denklem 2.1'de yaş nem miktarının denklemi verilmiştir.

$$\text{Nem Miktarı} = \frac{Ms}{My} x100 \qquad (2.1)$$

M_s: üründeki su kütlesi, M_y: ürün yaş kütlesi

Partiküller ile hava arasındaki Syamlal-O'Brien sürükleme modeli türbülanslı akışkanlaştırma da yatağın hidrodinamiğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Analizlerde partikül çapı Ø2,4 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 2.4'de uygulanan kurutucu modeli gösterilmektedir. Hava girişi geometrinin altından, hava çıkışı ise üst kısımdan, yan duvarlar ise kaymayan yüzey olarak tanımlanmıştır. Geometri, x yönünde 200 mm, y yönünde ise 1500 mm 'dir. Analiz 2 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizde hava sıcaklığı değişken olarak alınmıştır.

Şekil 2.4. Kurutucu modeli

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

3.1 Tuz Ürününün Elek Analiz Sonucu

Çizelge 3.1'de kurutma denemelerinin yapılacağı tuzun elek analiz sonuçları verilmiştir. Yapılan elek analizinde Şekil 3.1'de elek testinden sonra eleklerin üzerinde kalan tuz miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Tuz elek analiz sonuçları

Numune Miktarı (g)		Devir Sayısı (d/dak)			Test Süresi (dak)	
200		90			10	
Elek No	Partikül Boyutu (mikron,μ)	Delik Boyutu (mesh)	Boş Elek Ağırlığı (g)	Dolu Elek Ağırlığı (g)	Numune Ağırlığı (g)	% Ağırlık Değeri
1	2000	10	339,4	399,8	60,4	30,2
2	1000	20	347,4	390,8	43,4	21,7
3	500	30	345,2	356,2	11	5,5
Elek altı	0	-	311	311,6	0,6	0,3

Şekil 3.1. Elek analizi sonucunda elek yüzeyinde kalan tuz miktarları

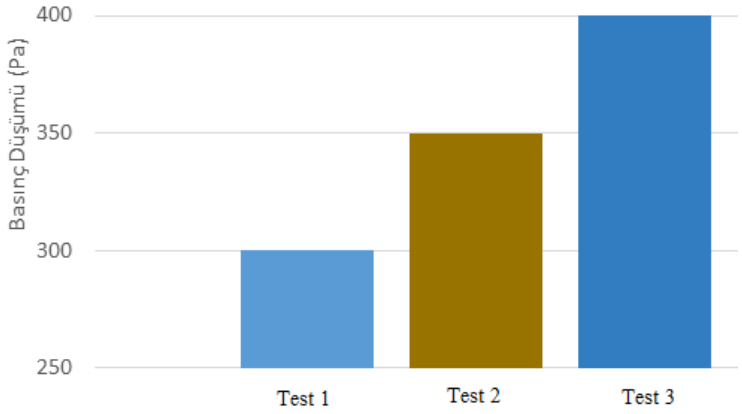
3.2 Test Basınç Düşümü Sonuçları

Laboratuvar denemelerinde kurutucu içerisinde ürün olmadan sistem 1,36 m/s hava hızlarında çalıştırılmıştır. Bu şekilde istenilen hava hızında eleğin yarattığı basınç değerine ulaşılmıştır. Testte yatağın yarattığı basıncı yenip akışkanlaşmaya geçme anında manometrede ani artışlar, dalgalanmalar yaşanmış ve akışkanlaşma gerçekleştiğindeki manometre değeri sabit kabul edilmiştir. Kurutma testlerinde üründen kaynaklı olan basınç düşümü değeri, kaynama anındaki manometre değerinden elek altı basınç değeri çıkarılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2 Kurutma testi basınç düşümü sonuçları

Test No	Hava hızı (m/s)	Kurutma sıcaklığı (°C)	Yatak Yüksekliği (mm)	Elek Altı Basınç (Pa)	Kaynama Sırasında Manometre Değeri (Pa)	Ürünün Yarattığı Basınç Değeri (Pa)
1	1,36	120	70	800	1100	300
2	1,66	120	70	900	1250	350
3	1,96	120	70	1000	1400	400

Şekil 3.2'de deneme planı sırasıyla ürünün yarattığı basınç düşümü değerleri grafik metodu ile gösterilmiştir. Testler kendi aralarında kıyaslandığında hız artıkça basınç düşümünün arttığı gözlenmiştir.



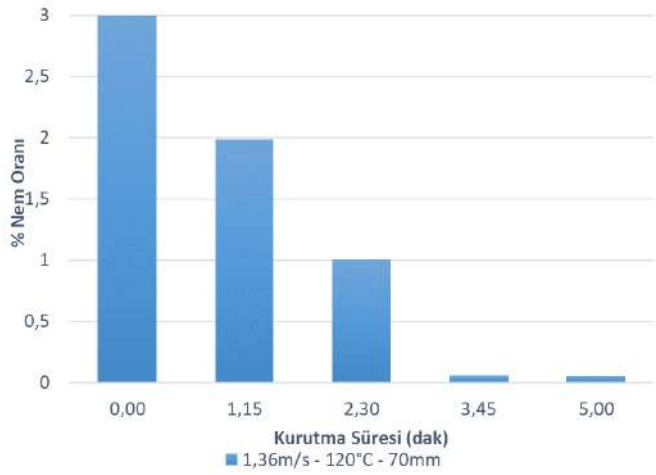
Şekil 3.2. Akışkanlaşmış tuz ürünün basınç düşümüne etki grafiği - Test

3.3 Test Kuruma Sonuçları

Test süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.3'te alınan numunelerin nem değerleri yer almaktadır. Bu çalışmada ortalama olarak 3 dakikada ürün kuru kabul edilecek nem değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Kurutma süresine hangi parametrenin daha etkili olduğunu tartışmak için 2,5 dakikada alınan numunelerin nem değerlerine bakılmıştır. Şekil 3.3'te yapılan denemelerin nem sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Denemeler incelendiğinde kurutma hızı arttıkça üç denemede de nem değerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 3.2. Kurutma testi nem ölçüm sonçları

Test No	Hava hızı (m/s)	Kurutma sıcaklığı (ºC)	Yatak Yüksekliği (mm)	Giriş Nem Değeri	1.Numune Nem Değeri	2.Numune Nem Değeri	3.Numune Nem Değeri	Çıkış Nem Değeri
1	1,36	120	70	3	1,988	1,008	0,057	0,051
2	1,66	120	70	3	1,502	0,527	0,052	0,037
3	1,96	120	70	3	1,471	0,503	0,036	0,04



Şekil 3.3. Zamana göre nem değişim grafiği - Test

4. Sonuçlar

Bu çalışmada akışkan yataklı kurutucu performansını etkileyen faktörlerin etki oranları incelenmiştir. Bu faktörler; hava hızı, sıcaklık ve yatak yüksekliği parametreleridir. Parametrelerden hız üç farklı değişken olup, kurutma sıcaklığı ve yatak yüksekliği sabit tutulmuştur.

Akışkan yataklı kurutucularda temel prensip katı ürünün yer çekimini yenip sıvı gibi davranması yani akışkanlaşmasıdır. Bu nedenle bu tip kurutucularda hızın belirlenmesinin ilk kriteri her zaman minimum akışkanlaşma hızını sağlamaktır. Bu çalışmada hız parametresi Denklem 3.4'teki minimum akışkanlama formülü ile hesaplanarak akışkanlaşmanın gerçekleşeceği hız değerleri; 1,36m/s olarak seçilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar olarak, bu çalışmada laboratuvarlarının kullanımına izin veren Asos Proses Makina' ya teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

1. Durmuş, M., Bilen, K., Uzun, İ. "Isı Pompalı Tekstil Kurutma Makinelerinde Kurutma Havası Debisinin Kurutucu Performansına Etkisinin Deneysel Analizi," Mühendis ve Makina, 2012, cilt 53, sayı 635, s. 40-50.
2. Çelen, S., Haksever, A. ve Moralar, A. The Effect of Microwave Energy to the Drying of Apple (Gala) Slices, Karaelmas Fen ve Mühendislik dergisi, 7 (1): 228-236, 2017.
3. Çelen S, Arda S. O. ve Karataşer M. A., Güneş Enerji Destekli Mikrodalga Konveyör Kurutucu Kullanılarak Kuruma Davranışının Modellenmesi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 5, No: 1, 2018 (267-271).
4. Demirkol, Ş., Çifçi, İ., & Çifçi, H. (2018, Kasım 01-03). Kaya tuzunun gastronomi ve inanç açısından önemi: Hacıbektaş kaya tuzu. Uluslararası Turizmde Yeni Jenerasyonlar ve Yeni Trendler Konferansı, Sapanca, Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/329101961_Kaya_Tuzunun_Gastronomi_ve_Inanc_Acisindan_Onemi_Hacibektas_Kaya_Tuzu
5. Pektaş, S. (2022). Akışkan Yataklı Kurutucu Performansını Etkileyen Faktörlerin Optimizasyonu, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, Türkiye.

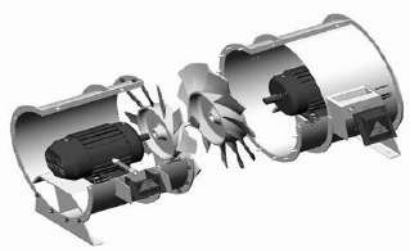
EKSENEL AKIŞLI SOĞUTMA FANLARI İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAKLAŞIMIYLA AKIŞ ANALİZİ UYGULAMASI

Aytaç MORALAR

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3964-4909

1. GİRİŞ

Fanlar, atmosferde serbest halde bulunan gazlara (havaya) basınç kazandırarak belirlenmiş bir akış yolu içerisinde hareket ettirmeye yarayan türbo makinalardır. Fanlar hava ve benzeri akışkanlar üzerinde bir basınç farkı oluşturarak transferini sağlarlar. Fanlar genellikle hareketini bir elektrik motorundan alırlar. Elektrik motorunun miline bağlanan bir pervane aracılığıyla hava akımı yaratılmış olur. Şekil 1. de örnek bir fanın resmi görülmektedir. Fanlar soğutma makineleri, laboratuvar cihazları, konutlar, klima dış üniteleri, sıcak ve soğuk hava apareylerinde ve endüstriyel soğutma grupları gibi çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır.



Şekil 1. Fan de-monte görünüm (Keklikoğlu 2019)

1.1. Fan Çeşitleri

Fanlar endüstrinin hemen her alanında yaygın olarak kullanıldıklarından dolayı farklı ihtiyaçlara göre çeşitlilik göstermektedirler. Fanları Farklı farklı gruplandırmak mümkündür.

Kullanıldıkları alanlara göre;

- Emiş fanları
- Egzoz Fanları
- Basma fanları

Olarak sınıflandırabiliriz.

Fanlar ayrıca üzerinden geçen havanın akış yönüne göre de sınıflandırılmaktadırlar. Hava akış yönüne göre fanlar;

- Radyal (santrifüj) fanlar
- Eksenel fanlar
- Karışık akışlı fanlar
- Çapraz akışlı fanlar

Fanlar ayrıca endüstride çok düşük hava akımlarından çok yüksek hava akımlarına kadar farklı alanlarda kullanılabilmektedir (Ekim 2019). Bu anlamda da fanları kapasitelerine göre sınıflandırabiliriz.

- Blowerler
- Körükler
- Alçak basınç fanları
- Orta basınç fanları
- Yüksek basınç fanları

1.2. Fanların Kullanım Alanları

Endüstride eksenel fanlar genel olarak soğutma kulesi sistemlerinde istenilmeyen ısıların bertaraf edilmesinde veya atmosfere atılmasında, hava soğutma sistemli chiller uygulamalarında kondenseri soğutmak amacıyla, ısı geri kazanımsız kojenerasyon sistemlerinde gaz motorlarının soğutma sularının soğutulmasında, havalandırmaya ihtiyaç duyulan ortamlarda egzoz, duman gazları ve kötü kokuların atmosfere atılmasında, her türlü kurutma uygulamalarında hava akımının yaratılmasında vb pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kullanım alanlarını sektörel bazda aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

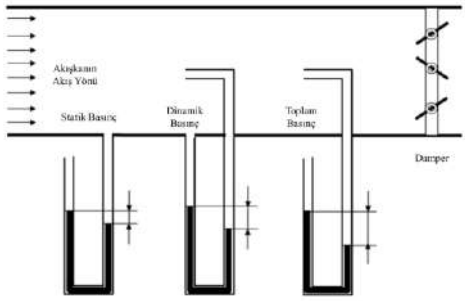
- Bina Malzeme ve Çimento Endüstrisi,
- Seramik Endüstrisi,
- Toz Toplama Teknolojisi,
- Elektrik Endüstrisi,
- Egzoz Havalandırmaları,
- Duman Gazı Emicileri,
- Metal üretim ve demir Endüstrisi,
- Pnömatik İşlem Teknolojisi,
- Baskı Atölyesi,
- Çatı Fanları,
- Lastik Endüstrisi,
- Yüzey İşleme Teknolojileri,
- Tekstil Endüstrisi,
- Atık Isı Geri Kazanımları
- Tünel Havalandırması,
- Hvac Sistemleri,
- Demir-Çelik,
- Cam,
- Çimento,
- Ahşap Sanayi,
- Karayolu-Demir Yolu Tünel Havalandırması,
- Madencilik,
- Elektrik Santralları,
- Soğutma Kuleleri,
- Otopark Havalandırması,
- Petrokimya,
- Kimya,
- Rüzgar Tüneli,
- Taşımacılık
- Şeker,
- Kağıt Ve Ahşap Endüstrisi,
- Çevre Endüstrisi,
- Endüstriyel Havalandırma

1.3. Fan Testleri

Bir fanın pratikte de tasarım şartlarına göre çalıştığından emin olmak, fanın gerçek performansının imalatçı tarafından yayınlanan katalog verileriyle eşleştiğini bilmek çok önemlidir. Bunu belirlemenin en doğru yolu ise uluslararası bir standarda uygun olarak tasarlanmış bir hava akış test sistemi kullanılarak fanların test edilmesidir (Turna 2020). Şekil 2 de Eksenel fanlar için tasarlanmış bir test düzeneği verilmektedir.

Şekil 2. Eksenel fanlar için örnek test düzeneği

Fan testleri yapılırken basınç kontrolünün mutlaka yapılması gerekmektedir. Basınç bir akışkanın birim alana uyguladığı dik kuvvet olarak tanımlanabilir. Fanlarda statik basınç, dinamik basınç ve toplam basınç olmak üzere 3 farklı basınçtan söz etmek mümkündür. Statik basınç, hat veya kanalın (yani fanın yer aldığı sistemde) içerisindeki akışkanın hat veya kanalın her noktasına uyguladığı basınçtır. Dinamik basınç ise hat veya kanal boyunca akışkanın hareketi doğrultusunda, önündeki engellere uyguladığı ve akışkanın hızı sebebiyle sahip olduğu basınçtır. Şekil 3 te bir hatta/kanalda statik, dinamik ve toplam basınç ölçüm sistemi verilmiştir.

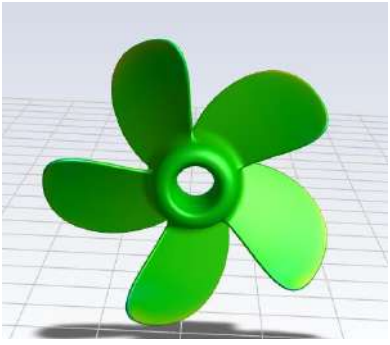


Şekil 3. Bir hatta ve kanalda statik, dinamik ve toplam basınç ölçüm sistemi (Turna 2020)

Fan sistemlerinin test edilmesi için kurulan bu sistemler oldukça maliyetli olabilmekte ve denemeler çok fazla süre alabilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte, bilgisayar ve mühendislik yazılımlarındaki başarılar, ANSYS ve benzer hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD - Computational Fluid Dynamics (CFD)) yönteminin kullanıldığı paket programların kullanımını arttırmıştır. Bu programların kullanıldığı sanayide ve akademi de yapılan çalışmalar gösteriyor ki; laboratuvar ortamında yapılan denemeler de elde edilen sonuçlar bilgisayar ortamında hesaplanabilir hale gelmiştir (Yılmaz ve Çiçek 2017). Bu çalışmada da, soğutma sistemlerinde kullanılan bir pervaneler için uygulamalı akışkanlar dinamiği ile akış analizlerinin çıkarımı incelenmiştir. Soğutma sistemi için 5 kanatlı bir pervane tasarımı hazırlanmıştır. Pervane akış analiz programında farklı hız değerlerinde çalıştırılarak kanatlar üzerinde ki davranışlar modellenmiştir. Dönüş hızının akış tipine olan etkileri deneysel olarak çıkarılmıştır.

2. ÖRNEK UYGULAMA

Hidrolik güç kaynağı soğutma evapatörü için Solidworks programında 5 kanatlı bir bir fan pervanesi tasarlanmıştır. Pervane alüminyum malzemeden tasarlanmıştır. Tasarlanan pervane kanadına ait örnek bir resim şekil 4 de gösterilmektedir.



Şekil 4. Fan Pervanesi

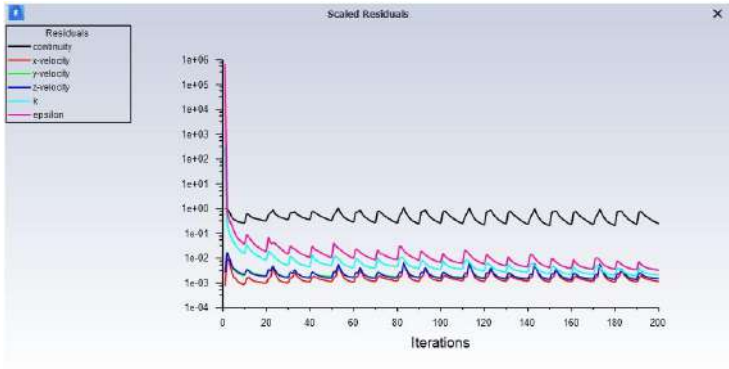
Pervanenin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri Ansys programı ile yapılmıştır. Tasarlanan model step dosyası olarak Ansys programına aktarılmıştır. Programda havanın giriş ve çıkış kanalları tanımlanarak 0,1 in üstünde Orthagonal kalite mesh ataması yapılmıştır. Toplamda 2745983 elemanlı bir mesh ataması yapılmıştır. Mesh kalite tablosu şekil 5 te gösterilmektedir.

```
Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality =  1.62565e-01 cell 335855 on zone 4 (ID: 200673 on partition: 0) at location ( 3.54134e-02
3.69558e-02 -2.05027e-03)
(To improve Orthogonal quality , use "Inverse Orthogonal Quality" in Fluent Meshing,
 where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)
```

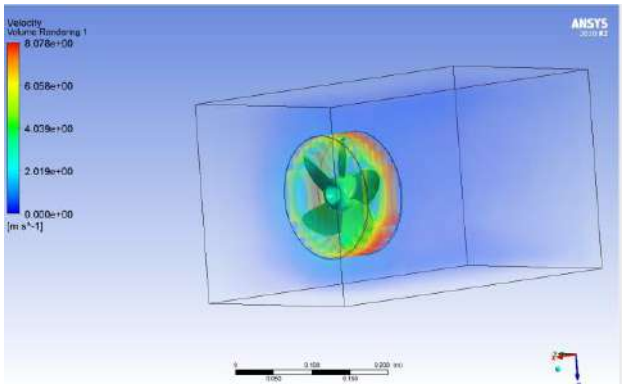
Şekil 5. Mesh kalite tablosu

Sistemin giriş kısmında hava durağana yakın olarak 0,1 m/s olarak belirlenmiştir. Eksenel olarak çalışacak pervane üzerine gelecek yüklerde etkili olacak yer çekimi kuvveti 9,81 m/s2 belirlenmiştir. Sistem zamana bağlı olarak tasarlanmıştır. Vizkoz model k-epsilon olarak ayarlanmıştır. Akışkan olarak ta hava seçilmiş ve farklı dönüş hızlarında fan üzerindeki değişimler incelenmiştir. Pervane üzerine gelen kuvvet değişimleri şekil 6 da gösterilmektedir.

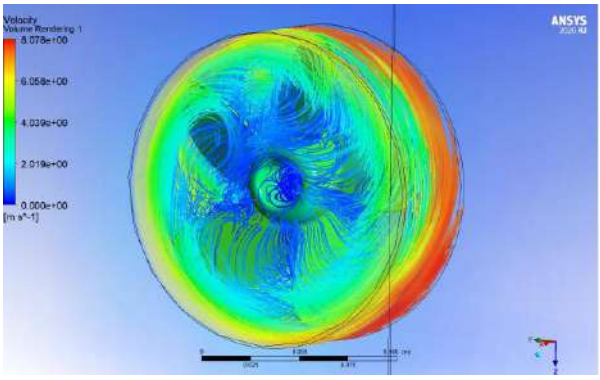


Şekil 6. Zamana bağlı kuvvet dağılım grafiği

Pervane üzerine uygulanan hız uygulamasında pervanenin kanal içerisindeki davranışı kanat profillerinin üzerinde oluşan akış dağılımları şekil 7 de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere hız ve basınç dağılımlarının en fazla kanatların uç notalarında oluştuğu görülmektedir.



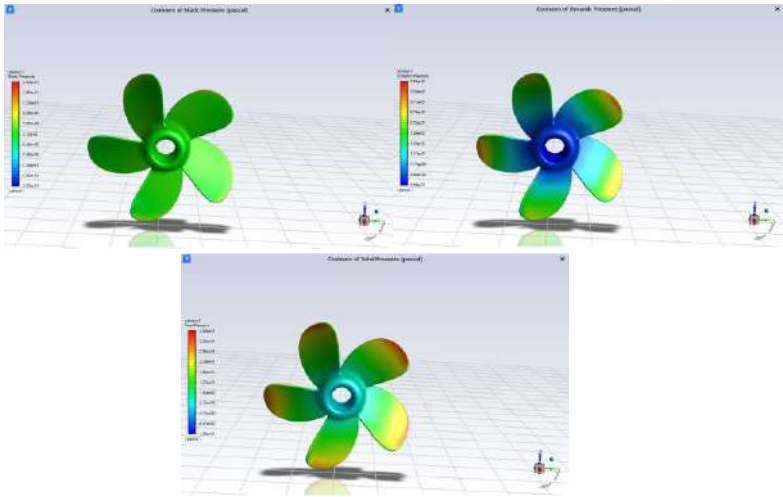
Şekil 7. Hız dağılımı



Şekil 8. Hız dağılımı detay görünümü

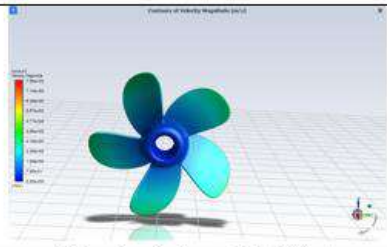
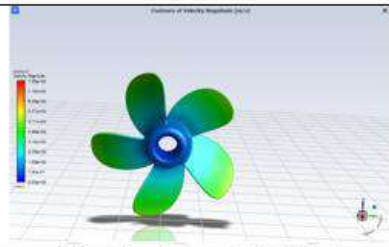
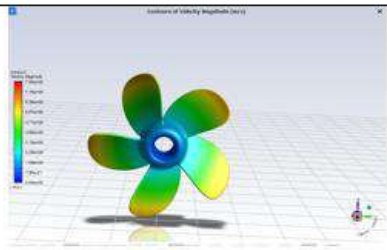
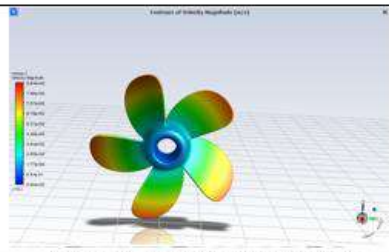
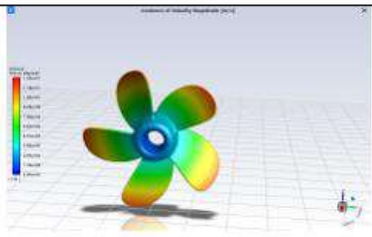
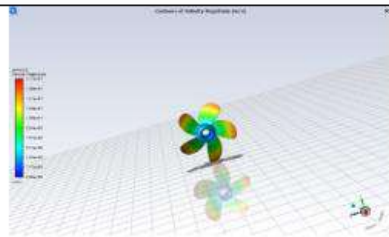
2.1. Örnek Uygulama Sonuçları

Yapılan analiz sonuçlarına göre, 1000 d/d dönüş hızında kanadın ön tarafında -19,96 Pa statik basınç oluşurken arka tarafında 20,04 Pa oluştuğu gözlemlenmiştir. Dinamik basıncın pervane kanatlarının uçlarına göre dağıldığı ve en düşük 0,0036 Pa, en yüksek 38,85 Pa olduğu bulunmuştur. Toplam basınca bakıldığında yine kanadın ön tarafında -13.77 Pa, arka tarafında 39,20 Pa olarak hesaplanmıştır. Statik, dinamik ve toplam basıncın ekran görüntüleri şekil 1.5 te verilmiştir.



Şekil 9. Statik, dinamik ve toplam basınç dağılımları

Tablo 1. Devre bağlı hız büyüklükleri tablosu

	
400 rpm'de velocity magnitude 7,950 m/s	600 rpm'de velocity magnitude 7,950 m/s
	
800 rpm'de velocity magnitude 7,950m/s	1000 rpm'de velocity magnitude 18,76122 m/s
	
1500rpm'de velocity magnitude 13,26 m/s	2000rpm'de velocity magnitude 17,68 m/s

Tablo 1. den görüldüğü gibi pervaneye uygulanan farklı devirler kanatlara gelen hız dağılım büyüklükleri verilmiştir. Pervane 2000 d/d ya kadar farklı hız kademelerinde döndürülmüştür. 1000 d/d ya kadar kanatlardaki hız dağılım büyüklüklerinde değişim olmadığı, 1000 d/d da ciddi bir artış olduğu ve daha büyük devir kademelerinde hız dağılımının düzensizlik gösterdiği görülmektedir. Pervanelerin uygun devirde çalıştırılmaması, kanat profillerinde ciddi hasarlara yol açabileceği grafiklerden de açıkça görülebilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Çiçek İ., Yılmaz N., (2017). "Standart Test Pervanesi Analizleri ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Altyapısının Doğrulanması" Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 6(4), 681 – 690, 2017 e-ISSN: 1308-6693
2. Ekim S., 2019. "Amonyaklı Soğutma Tünellerinin Evaporatör Fanlarında Meydana Gelen Ses Gürültüsünün Azaltılması" Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
3. Keklikoğlu H.Ö., 2019. "Design, Construction And Performance Evaluation Of Axial Flow Fans" The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Master Thessis.
4. Develi S.D., Ayder E., (2019). "Radyal Fanlarda Kanat Profili Biçiminin Performansa Etkisi" 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 17-20 Nisan 2019/İzmir
5. Turna B., (2020). "Eksenel Fanlarda Enerji Verimliliği: Tekstil Sanayi Örneği" Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
6. Bulten, N., & Oprea, A. I. (2006, September). Evaluation of McCormick′s rule for propeller tip cavitation inception based on CFD results. In Sixth International Symposium on Cavitation. Wageningen: American Institute of Physics.
7. Fidan S., 2022 "Aerodinamik Kanatlı Radyal Fan Tasarımı Ve Sayısal Analizi" Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi

ALİAĞA (İZMİR) BAZALTLARININ MEKANİK STABİLİZASYON TEMEL PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Hakan ELÇİ [1], Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU[2]

[1]Doç. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Geoteknik Programı İzmir. hakan.elci@deu.edu.tr ORCID:0000-0003-2945-2548

[2]Öğr. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Doğal Yapı Taşları Teknolojisi Programı, İzmir ramazan @deu.edu.tr ORCID-0000-0002-2054-6559

1. Giriş

Temel tabakaları, kaplama ve banket gibi yol üst yapılarına temel teşkil eden granüler malzemelerin bağlayıcılı veya bağlayıcısız olarak, farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde uygulaması ile elde edilen ve kaplamalar için gerekli olan stabiliteyi, drenajı sağlayan yol alt yapılarıdır (Tunç, 2001).

Temel tabakaları;

Granuler Temel veya Mekanik Stabilizasyon Temel (MST),

Plentmiks Temel

Çimento Stabilizasyon Temel

olmak üzere üç farklı şekilde inşa edilir (KTŞ, 2013).

MST, belirli fiziksel özelliklere ve gradasyona sahip agreganın optimun su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra silindirler ile maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkılaştırılması sonucu elde edilen stabil bir temel tabakasıdır. MST, plentmiks ve çimento stabilizasyon temel tabakalarına nazaran daha az stabil fakat daha ekonomik olarak inşa edildiğinden daha yaygın olarak uygulanır (Tunç, 2001). Birden fazla agrega grubunun karıştırılması durumunda agregalar Tablo 1'de verilen gradasyom limitlerini sağlamalı ve iyi derecelenmiş olmalıdır. Ayrıca Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'de verilen özelliklerde belirtilen şartname limitlerinin hepsini sağlamalıdır (KTŞ, 2013 ve HKTŞ-I-0575/1, 2019).

Tablo 1. MST agregaların gradasyon limitleri. A, B, C ve D: (KTŞ, 2013), E: (HKTŞ-I-0575/1, 2019)

Elek açıklığı		% Geçen				
Elek	İnç	A	B	C	D	E
75	-	-	-	-	-	
50	2	100	100	-	-	
37,5	1 1/2	80-100	85-100	-	-	100
25	1	60-90	70-95	100	100	70-100
19	3/4	-	-	75-100	80-100	60-92
9,5	3/8	30-70	40-75	50-85	60-100	40-75
4,75	No:4	25-55	30-60	35-65	50-85	30-60
2	No:10	15-40	20-45	25-50	40-70	20-45
0,425	No:40	8-20	10-25	12-20	20-45	20-25
0,075	No:200	2-8	0-12	0-12	0-12	0-12

Bu çalışmada İzmir'in Aliağa ilçesi, Bozköy yerleşim alanının batısında yüzlek veren (Şekil 1) bazaltik kayaçlardan üretilen agregalarının, MST için uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ, 2013) ve Hava Kuvvetleri

Komutanlığı Teknik Şartnamesi (HKTŞ-I-0575/1, 2019)'a uygunluğu laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile araştırılmıştır.

Tablo 2. MST, kaba agregaların genel özellikleri (KTŞ, 2013)

Özellik	Şartname	Deney standardı
Hava tesirine karşı dayanıklılık, Mg_2SO_4 ile (%)	≤ 20 (MS_{20})	TS EN 1367-2
Los Angeles Parçalanma Direnci (%)	≤ 35 (LA_{35})	TS EN 1367-2*,
Kil Topakları ve Dağılabilen Tane Oranı (%)	≤ 1	ASTM C-142
Yassılık İndeksi (%)	≤ 30	BS 812
	≤ 25 (FL_{25})	TS EN 933-3
Organik Madde (% NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1
Su emme (Kaba ve İnce Agregalarda)	≤ 3 ($wa_{24}3$)	TS EN 1097-6

*Referans Metot

Tablo 3. MST, İnce agregaların genel özellikleri (KTŞ, 2013)

Özellik		Şartname limitleri	Deney standardı
Likit Limit (%)		Non plastik	TS 1900-1, AASHTO T 89
Plastisite indisi (%)		Non plastik	TS 1900-1, AASHTO T 90
Organik Madde (% NaOH ile)		Negatif	TS EN 1744-1
Metilen Mavisi (g/kg)	İnce agrega 0-2 mm	≤ 3 (MB_3), ≤ 4,5 ($MB_{4,5}$)*	TS EN 933-9
	Magmatik agrega 0-2	≤ 4,5 ($MB_{4,5}$)*	

*Magmatik kökenli kayaçlarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada, istenen şartname değerinin sağlanmaması durumunda bu şart aranacaktır.

Tablo 4. MST agregaların genel özellikleri (KTŞ, 2013)

Özellik	Şartname limitleri	Deney standardı
Maksimum sıkışma (%)	98	Modifiye Proctor, TS 1900-1, AASHTO T 180
	95	Titreşimli Tokmak, TS 1900-1, BS 1377
Optimum su içeriği (%)	W(opt-2)- W(opt-1) Wopt ± 1	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

Tablo 5. MST agregaların genel özellikleri (HKTŞ-I-0575/1, 2019)

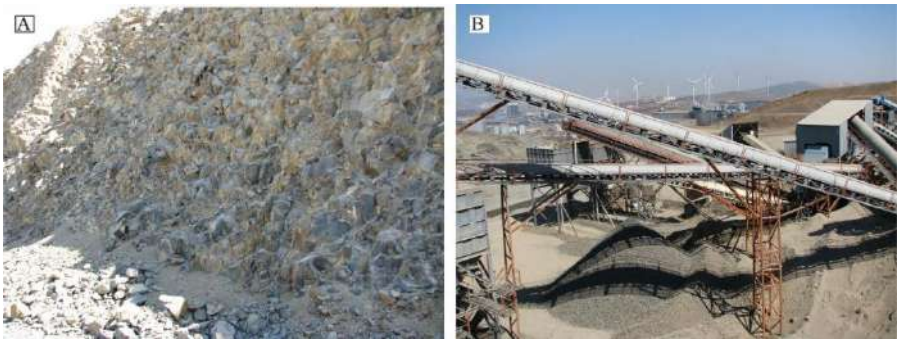
Özellik	Kabul edilebilir sınır değerler
Na_2SO_4 ile dayanıklılık (iri agrega)	Maksimum % 10 (AASTHO T 104-99), % 20 (TS EN 1367-2)
Los Angeles Parçalanma (iri agrega)	Maksimum % 35
Likit Limit (ince agrega)	Non plastik
Plastisite indisi (%)	Non plastik
Kaliforniya Taşıma Oranı (Yaş) (Tüvenan)	Minimum % 65
Şişme Yüzdesi (ince agrega)	Maksimum % 0,5 (ince agrega)
Su Emme Oranı (iri agrega)	Maksimum % 3
Kum Eşdeğeri (ince agrega)	Minimum % 35 (ince agrega)
Metilen Mavisi (ince agrega)	Mag. kayaçlar için Max. % 4,5, karbonat kayaçlar için Max. % 3
Yabancı ve Zararlı Madde (ince agrega)	Olmayacak

Kırma taş ocağında bazaltlar grimsi siyah renkli, ortalama 10-15 cm çapında bloklar halindedir. Süreksizlikler boyunca (soğuma çatlakları), kahverengi sarımsı ayrışma rengi oldukça belirgindir. Ocak içerisindeki mevcut işletme aynalarında bazalt, az-orta derecede ayrışma gösterir (Şekil 2A).

Kırma taş ocağında bazaltlardan agrega üretimi için, ana kayadan delme-patlatma yöntemi ile koparılan bazalt blokları, önce kırma eleme tesisinde kırılıp, elenerek ihtiyaç duyulan agrega boyutlarına indirgenir (Şekil 2B). Daha sonra boyutlandırılan bu agregalar demiryolu balastı, asfalt agregası için yıkama tesisinde yıkanarak tanelerin etrafındaki ince malzemeden (< 75 μm) arındırılmaktadır.

Demir yolu balastında ince malzemeler balast kirliliğini artırdığı için, asfalt agregasında ise agreganın bitüm ile yaptığı bağ kuvvetini zayıflattığı için hem demiryolu balastı üretimi hem de asfalt agregası üretimi için agreganın ince malzeme miktarı ilgili standartlarda sınırlandırılmıştır. Bu nedenle kırma taş tesisinde üretilen demiryolu balastı ve asfalt agregaları yıkanarak ince malzemeden ayrılmakta ve temiz bir şekilde kullanıma gönderilmektedir.

Şekil 1. Agrega üretimi yapılan bazalt ocağı



Şekil 2. (A) Agrega üretimi yapılan bazalt yüzleği, (B) Kırma eleme tesisi

2. Materyal Metot

2.1. Materyal

Çalışmada, ince ve iri karışımdan oluşan tüvanan bazalt agregası kullanılmıştır. MST uygunluğu araştırılan tüvanan agregaya herhangi bir yıkama işlemi uygulanmamıştır.

2.2. Metot

Çalışma iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada bazaltların mineralojik, petrografik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada bazalt agregasının malzeme özellikleri belirlenmiştir.

Bazaltın mineralojik ve petrografik özellikleri kırma taş sahasından alınan bazalt örneklerinden hazırlanan ince kesitler ile belirlenmiştir. Hazırlanan ince kesitlere TS EN 12407 (TSE, 2019)'a göre Olympus BX41 marka polarizan mikroskopta çift nikol 10X büyütmede petrografik analiz yapılarak mineral yüzdeleri (modal analizi) belirlenmiştir. Bazaltların kimyasal özellikleri ise Acme Laboratuvarında (Kanada) Endüktif Eşleşmiş Plazma Emisyon

Spektrometresi (ICP-ES) metodu kullanılarak ana oksitleri (%) belirlenmiştir. Ayrıca bazalt agregasının çok ince malzemesine XRD analizi yapılarak içerdiği kil minerallerinin türü tespit edilmiştir.

Bazalt MST karışımının dane çapı dağılımı TS EN 933-1 (TSE, 2012a)'e göre, su emme değeri TS EN 1097-6 (TSE, 2022)'e göre ve 20-37,5 mm çaplı agregalarda belirlenmiştir. Yassılık indeksi TS EN 933-3 (TSE, 2012b)'e göre hem 20-37,5 mm çaplı hem de 10-14 mm çaplı agregalarda belirlenmiştir. Parçalanma direnci ve dona karşı direnç 10-14 mm çaplı agregalarda, sırasıyla TS EN 1097-2 (TSE, 2020)'e ve TS EN 1367-2 (TSE, 2011)'e göre, likit limit ve plastiste indisi de 0,425 mm'den daha ince malzemede ve TS 1900-1 (TSE, 2006a)'a göre belirlenmiştir. Bazalt agregasının Kaliforniya taşıma oranı (yaş) ve şişme yüzdesi, 20 mm'den küçük agrega karışında TS 1900-2 (TSE, 2006b)'a göre belirlenmiştir. Kum eşdeğeri ve metilen mavisi değeri, 0-2 mm agregalarda sırası ile TS EN 933-8 (TSE, 2015)'e göre ve TS EN 933-9 (TSE, 2022)'e göre ve yabancı-zararlı maddelerin varlığı da TS EN 1744 (TSE, 2013)'e göre belirlenmiştir.

3. Bulgular

3.1 Agrega Üretilen Bazaltın Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

İncelenen kayacının temel bileşimi plajioklas, piroksen mineralleri ile yaygın olarak matriksten (volkanik cam ve mikrolitler) oluşur. Bu minerallerin yanı sıra, az oranda olivin, amfibol ve opak mineral olarak manyetit de mevcuttur (Tablo 6).

Piroksen mineralleri fenokristal şeklinde yaygın olarak gözlenir. Plajioklaz, yuvarlaklaşmış olivin, amfibol feno kristalleri ise daha az oranda bulunur (Şekil 3). Kayacın matrix bölümü yaygın olarak üç mineralin mikrolitlerinden ve volkanik camdan oluşur. Bunlar, plajioklaz, piroksen ve az oranda olivin mineralleridir. Piroksen ve Plajioklaz minerallerinin lata şeklinde mikrolitleri belirgindir (Şekil 3). Kayaçta orta derecede, kısmen de ileri derecede ayrışma mevcuttur. Özellikle piroksen minerallerinde kenar kısımlarından merkeze doğru demir oksidasyonu reaksiyon kuşağı gözlenir ve yaygın opasite gözlenmektedir.

Bazı piroksen mineralleri bütünüyle opaklaşmış olmakla birlikte, yenmiş, kısmı opaklaşmış piroksen iskeletleri de mevcuttur. Diğer taraftan doku içerisinde en yaygın feno kristal olarak gözlenen Piroksen minerallerinde, klivaj ve düzensiz kırıklanmalar bulunur. Feldispat mineralleri (Plajioklaz) ayrışmaya uğramıştır ve net tipik ikizlenme yapısı gözlenir (Şekil 3). Hipokristalin porfiritik dokuya sahip olan bazalt kayacı, feno kristaller ve matrix içerisindeki mikrolitlerde akmaya bağlı kısmı rotasyon gözlenir (Şekil 3).

Tablo 6. Bazalt örneklerinin modal analizi

Mineral (%)	B1	B2	B3	B4
Plajioklas	37	35	36	35
Olivin	2	1	1	1
Piroksen	14	15	14	14
Opak	1	1	1	2
Matriks	46	48	48	48
Toplam	100	100	100	100

B1: B2, B3, B4: Orta derecede ayrışmış bazalt örnekleri

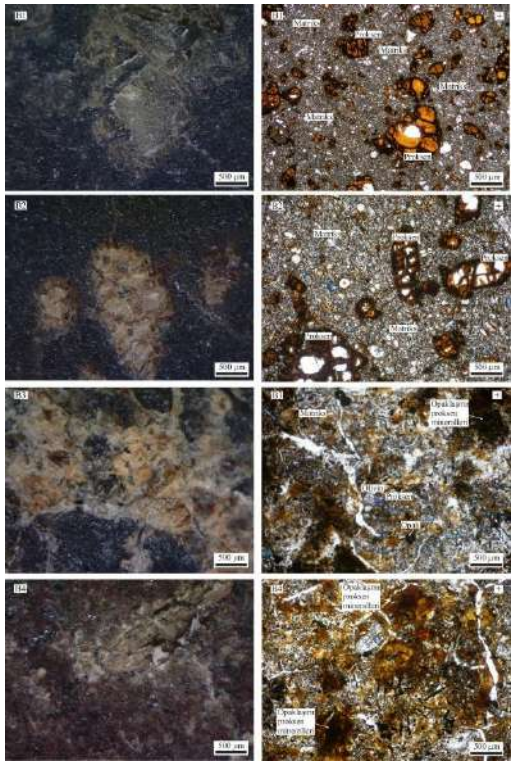
3.2 Bazalt Örneklerinin Kimyasal Bileşimleri

Bazalt örnekleri sahip olduğu SiO_2 değerleri ile tipik bir bazik kayaç özelliğindedir. (Tablo 7). Bazalt agregasının çok ince malzemesine yapılan XRD analizinde, çok ince malzemenin kuvars dolomit ve hamatit ile birlikte iillit, montmorillonit ve kaolonit gibi kil minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4).

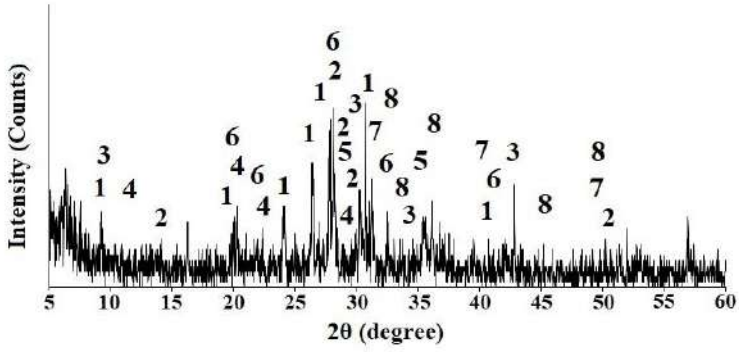
Tablo 7. Bazalt örneklerinin ana oksit yüzdeleri ve nadir toprak elementleri

No	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	Cr_2O_3	Ba	Ni	Sr	Zr	Y	Nb	Sc	*KK	Top.
	%											ppm							%	
B1	47,96	11,49	9,15	11,18	8,55	2,24	2,71	1,73	0,46	0,13	0,099	323	205	459	444	21	23	25	3,9	99,7
B2	47,011	11,88	9,25	9,25	6,70	1,62	2.71	1,53	0,46	0,11	0,081	513	166	397	380	20	22	19	9,1	99,7
B3	48,54	11,64	8,44	9,68	9,56	2,38	2,34	1,57	0,47	0,11	0,101	292	292	535	394	19	25	21	6,7	99,7
B4	46,76	11,85	9,37	12,05	7,92	2,18	2,44	1,61	0,46	0,13	0,103	292	248	409	400	19	20	21	5,3	99,7

B1, B2, B3, B4: Orta derecede ayrışmış bazalt, KK: Kızdırma kaybı, Top: Toplam



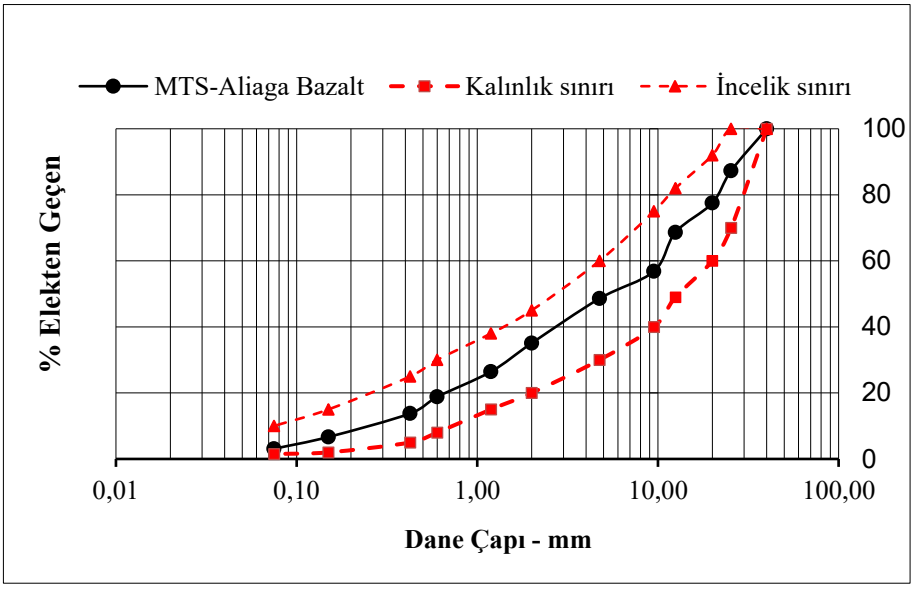
Şekil 3. Bazalt örneklerinin binoküler yüzey görüntüsü (A) ve ince kesit görüntüleri (B). +: çift nikol.



Şekil 4. Bazalt çamurunun XRD grafiği. 1:İllit, 2:Albit, 3-Montmorillonit, 4:Kaolinit, 5:Kalsit, 6:Kuvars, 7:Dolomit, 8:Hematit.

3.3 Bazalt MST Agregasının Özellikleri

MST agregasının su emme değeri (% 1.1) oldukça düşük ve parçalanmaya (% 11.1) ve dona karşı (% 4,2) oldukça dirençlidir. Likit limit değer, % 30, plastisite indisi ise % 6'dır. Bu kıvam limiti değerleri ile MST agregasının çok ince malzemesi düşük plastisiteli kil özelliği gösterir. Kaliforniya taşıma oranı % 85 ve şişme yüzdesi ise % 0,03'tür. Yabancı ve zararlı malzeme bakımından temiz olan MST agregasının kum eşdeğeri % 70 ve metilen mavisi değeri ise % 5,63 tür (Tablo 8).



Şekil 5. Bazalt MST agregalarının karışım oranı

Tablo 8. Bazalt MST agregasının malzeme özellikleri.

Özellik	Art. ort. ± Std. sap.	Kullanılan Standart
Su Emme (20-37,5) (%)	1,096 ± 0.011	TS EN 1097-6
Parçalanma Direnci (10 -14 mm) (%)	11,11± 1,57	TS EN 1097-2
Dona Karşı Direnç, Kütle Kaybı (10-14 mm) (%)	4,191± 0,037	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi (20-37,5) (%)	18	TS EN 933-3
Yassılık İndeksi (10-14) (%)	13	TS EN 933-3
Likit Limit (0 - 0,425 mm) (%)	30	TS 1900 - 1
Plastisite İndisi (0 - 0,425 mm) (%)	6	TS 1900 - 1
Kaliforniya Taşıma Oranı (Yaş) (< 20 mm) (%)	85	TS 1900 - 2
Şişme Yüzdesi (< 20 mm) (%)	0,028	TS 1900 - 2
Kum Eşdeğeri (0 - 2 mm) (%)	69,39 ± 0,098	TS EN 933-8
Metilen Mavisi (0 - 2 mm) (g/kg)	5,63	TS EN 933-9
Yabancı ve Zararlı Madde (0 - 37,5)	Yok	TS EN 1744-1

4. Sonuçlar

Aliağa'ya bağlı (İzmir) Bozköy yerleşim alanının batısında yüzlek veren bazaltik kayaçlar çoğunlukla az-orta derecede, kısmen da ileri derecede ayrışmaya uğramış bazaltlardır. Bu bazaltlardan üretilen agregalarda ayrışmadan dolayı çok ince malzeme miktarı fazladır. Çok ince malzemenin türü ise bazalt kayacını oluşturan alüminyum silikatlı minerallerin ayrışmasından kaynaklanır ve çoğunlukla kil minerallileridir. Balast ve asfalt agregasında çok ince malzeme miktarının varlığı, balast kirliliğine neden olduğu için, asfalt üretiminde ise agrega tanesinin bitüm ile bağlanmasını olumsuz etkilediği için ocakta, demiryolu balastı ve asfalt agregası amacı ile üretilen agregalar, üretimin son aşamasında yıkama işlemine tabi tutulur ve kil içerikli çok ince malzemeden arındırılır. Yıkama işlemi uygulanmayan MST karışımında ise, çok ince malzeme içerdiği kil minerallerinden dolayı düşük plastik özellik gösterir. İçerdiği kil mineralleri nedeniyle düşük plastik özellik gösteren bazaltik MST agregası, her iki şartnamede (KTŞ, 2013; HKTŞ-I-0575/1, 2019) belirtilen likit limit, plastisite indisi ve metilen mavisi şartname limitlerini sağlamaz. Yabancı ve zararlı madde içermeyen bazaltik MST agregası, parçalanmaya, dona karşı oldukça dirençlidir ve su emmesi düşüktür. Sahip olduğu bu özellikleri iki teknik şartnamenin de limit değerlerinin çok altındadır. KTŞ, (2013) de belirtilen sıkıştırma limit değerini sağlamaz iken HKTŞ-I-0575/1, (2019)'da belirtilen sıkıştırma limitleri için uygundur. Bazaltik MST agregası, KTŞ, (2013)'den farklı olarak, HKTŞ-I-0575/1, (2019)'da belirtilen şişme yüzdesi ve kum eşdeğeri limit değerleri için de uygundur. Sonuç olarak bazaltik MST agregası, agrega üretiminin son aşamasında yıkama işlemi ile kil mineralleri içeren ince malzemeden arındırılırsa, HKTŞ-I-0575/1, (2019)'da belirtilen tüm limit değerleri sağlar.

Referanslar

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (ASSHTO) T 89, 2022. Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils.
2. ASSHTO T 90, 2020. Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. American Association of State Highway and Transportation Officials.
3. ASSHTO T 96, 2022 Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
4. ASSHTO T 104-99, 2020. Standard Method of Test for Soundess of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
5. ASSHTO T 180, 2020. Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop
6. American Society for Testing and Materials (ASTM) C 142, 2017. Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.
7. British Standards (BS) 812, 1991. Testing Aggregates Part 1: Methods for Determination of Particle Size and Shape. British Standards Institution
8. BS 1377, 2020. Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 2: Classification tests and determination of geotechnical properties
9. Hava Kuvvetleri Komutanlığı Teknik Şartnamesi (HKTŞ-I-0575/1), 2019. Temel Mekanik Stabilize Teknik Şartnamesi. Hava Kuvvetleri Komutanlığı Hava Lojistik Komutanlığı, Ankara
10. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ), 2013. Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara
11. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), 2012a TS EN 933-1. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
12. TSE, 2012b. TS EN 933-3. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şeklinin tayini – Yassılık endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
13. TSE , 2014. TS EN 933-9+A1. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 9: İnce malzeme tayini-Metilen mavisi deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
14. TSE, 2022. TS EN 1097-6. Agregaların Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

15. TSE, 2020. TS EN 1097-2. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 2-Parçalanma Direncinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
16. TSE, 2011. TS EN 1367-2. Agregaların Termal Bozunma Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 2-Mağnezyum Sülfat Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
17. TSE, 2013. TS EN 1744-1+A1. Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Kimyasal analiz, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
18. TSE, 2006a. TS 1900-1. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
19. TSE, 2006b. TS 1900-2. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
20. TSE, 2019. TS EN 1240. Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Petrografik inceleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. Tunç A, 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Aktas Yayın Dağıtım İstanbul.

ÇAM İĞNESİNİ KULLANARAK SiO2 ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Doç.Dr. Başak MESCİ OKTAY[1]
Prof. Dr. Feza GEYİKÇİ [2]

[1]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1204-0195
[2]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Kimya Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4789-1026

1.GİRİŞ

Silika, birbirine bağlı bileşenlerden oluşan genel formülü SiO2 olan bir silisik asit polimeridir. Doğada kum, cam, kuvars vb. halde bulunmaktadır. Doğal olarak oluşan silika doğada amorftur. Sentetik olarak elde edildiğinde ise kristal yapıdadır.

Silika, elektronik, seramik, eczacılık, deterjanlar, yapıştırıcılar ve polimer malzemeler gibi endüstriyel açıdan önemli ürünlerin üretiminde ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılan temel bir hammaddedir. Küçük çaplı partikülleri nedeniyle ultra ince silis tozları tiksotropik ajanlar, ısı yalıtkanları, kompozit dolgu maddeleri vb. gibi birçok teknolojik uygulamaya sahiptir [1]. Silisyum (Si) oksijenden sonra dünya yüzeyinde en bol bulunan ikinci elementtir. Toplam ağırlığının yaklaşık %32'sidir. Sonuç olarak, toprakta köklenen bitkiler dokularında her zaman bir miktar silisyum içerir [2].

Kimyasal uygulamalarda kullanılan silika, silikat çözeltisinden veya silan reaktiflerden sentezlenmektedir. Sol-jel tekniği [3] silika sentezinde en yaygın yöntemdir. Eşzamanlı hidroliz ve yoğuşma reaksiyonunu içermektedir. Bu süreçte bir sodyum silikat çözeltisi veya silikon alkoksit veya halojenür, polimerik bir jel ağına dönüştürülür. Su ve etanol ile karıştırıldığında ortosilikatın kısmi hidrolizi gerçekleşir [4].

Nanoteknoloji, son on yılda dünya çapında hızla büyüyen geniş bir disiplinler arası araştırma, geliştirme ve endüstriyel faaliyet alanıdır. Nanoparçacıkların daha iddialı oldukları kullanım alanları, kirlenmiş ortamların biyoremediasyonu, kokuların, biyositlerin ve tekstil ürünleri üzerindeki antifungallerin kontrollü salınımı uygulamalarıdır [5]. Nanopartiküller genellikle 1 ila 100 nm boyutundadır, düzensiz şekillidir ve ayrıca kaynaşmış veya kümelenmiş formlarda da bulunabilirler [6].

Nano-SiO_2 tozu, silikadan oluşan bir nanomalzemedir ve ortalama parçacık boyutu 20–60 nm den 100 nm'ye kadardır. Nano-SiO_2 bu nedenle nanopartiküllerin ve mikro parçacıkların bir karışımıdır [7]. Şekilsiz, beyaz, toksik olmayan, tatsız ve çevreyi kirletmeyen bir maddedir [8]. Silika nanokompozitler, termal bozunma davranışları ve kromatografi, tıp, optik vb. alanlardaki uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Bazik Silika nanoyapılar tıp [8], biyopolimerler [9], nanokompozitler, biyosensörler [10], beton [11-12], kaplamalar [13] ve nem sensörleri [14-15] gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanlarına sahiptir.

SiO_2, geleneksel doğal kuvars kaynaklardan saf halde çıkarılabilir fakat bu işlem yüksek üretim maliyeti içermektedir [16]. Bitkisel amorf yapıdaki silika (yüksek silika içeriği), daha düşük sıcaklıkta ekstrakte edilebilir özelliktedir ve

mevcut yüksek enerjili silis çıkarma yöntemlerine alternatif olarak düşük enerjili bu yöntem ile sentezlenebilmektedir [17].

Pinus cinsi (Pinaceae familyası), yaklaşık 100'ü kapsayan, dünyadaki en yaygın ağaç türlerinden biridir [18]. Dünyada üç yüze yakın çam türü bulunmaktadır. Uzun ömürleri olan çam ağaçları, Türkiye'de özellikle Akdeniz ikliminin görüldüğü Ege ve Akdeniz Bölgelerinde yetiştirilmektedir. Çam ağaçları ticari açıdan en önemli ağaç türleri arasında yer alır ve bu yaprak dökmeyen ağaçların odunsu tohum taşıyan konileri ve iğne şeklinde yaprakları vardır. Bu ağaçlar, süs ve gölgelik olarak ve kereste, odun hamuru ve terebentin, çam yağı için yaygın olarak yetiştirilmektedir [19-20]. Hızlı büyüme, yenilenebilirlik, nispeten yüksek mukavemet ve iyi esneklik gibi çeşitli avantajlara sahip olan çam iğneleri tüm yıl boyunca hasat edilebilmekte ve genellikle iki dönümlük çamdan bir ton iğne toplanabilmektedir [21].

Çam ağaçların iğnelerinin, toplam ağırlıkça yaklaşık %0.08–1,37 (kuru ağırlık) oranında biyojenik silika içerdikleri tespit edilmiştir [22]. Bu miktar ağaçların cinsine göre değişiklik göstermektedir. Daha önceki çalışmalarda, pirinç samanı ve pirinç kabuğu külü [23] ile biyojenik silika örnekleri bulunmaktadır. Silika, çeşitli endüstrilerde kullanılan çok önemli bir bileşiktir. Silikanın ekonomik yollardan eldesi için tarımsal kaynakların tercih edilmesi söz konusudur [24] . Bu bilgi ışığında literatürde sınırlı araştırması olan çam kozalağı, silika eldesi için kullanılacak doğal materyallerden biridir. Literatürde sınırlı araştırması olmasına rağmen temini kolay olan tarımsal bir kaynaktır.

Birçok çalışma, saf amorf silisin ucuz bir şekilde hazırlanabileceğini göstermiştir [25-26]. Hindistan cevizi kabuğu, meyve kabukları, meyve tohumları dahil olmak üzere pirinç kepeği, mısır koçanı, hurma yağı ve buğday kabuğu vb. çeşitli tarımsal atıklar, nanomalzeme sentezinde kullanılabilmektedir [27]. Bu çalışmada çam ağacının iğne yaprağından silika eldesi ve bu işleme etki eden optimum koşulların belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kullanılan Materyaller

2.1.1 Çam İğnesi

Bu çalışmada kullanılan çam iğnesi Samsun'un Atakum ilçesinde bulunan Ondokuz Mayıs Üniversitesi kampüsünden temin edilmiştir. Toplanan yeşil renkteki iğneler önce yıkanmış, oda sıcaklığında kurutularak küçük parçalara bölünmüş, deneysel çalışmalar için hazırlanmıştır.

2.1.2 Kimyasal Maddeler

Çalışmada 3M sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi hazırlanarak belirli miktarlarda kullanılmıştır.

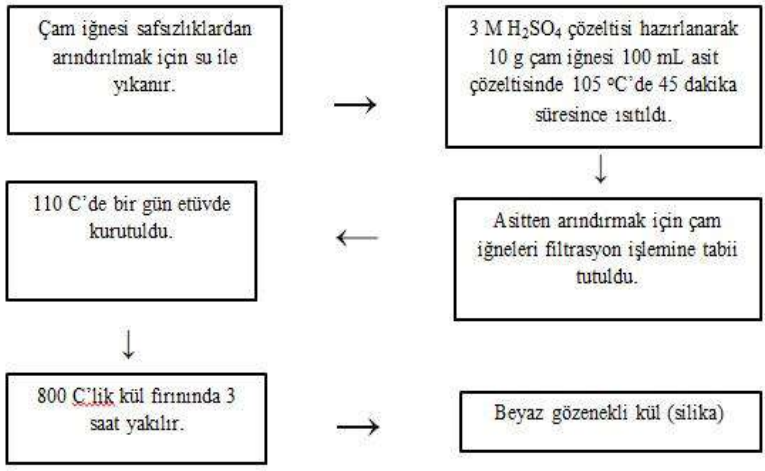
2.1.3 Kullanılan Cihazlar

Bu çalışmada nanosilika eldesi için deneysel çalışmalarda etüv, kül fırını, öğütücü kullanılmıştır. Elde edilen nanosilika, Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FT-IR), Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri (SEM) kullanılarak nanopartiküller karakterize edilmiştir.

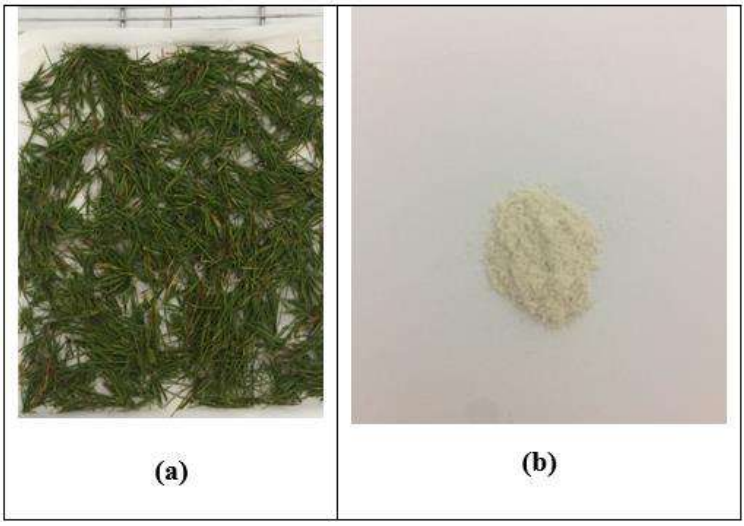
2.2 Metod

2.2.1 Çam İğnesinden Nanosilika Eldesi

Deneysel çalışmalar için hazırlanan çam iğnesi parçacıkları 3 M H_2SO_4 çözeltisi ile karıştırılarak 105 ^oC de 45 dakika tutulmuştur. Ardından oluşan karışımın katı ile sıvı ayırılmış ve silika içeren katı kısım 110 ^oC de 1 gün boyunca etüvde bekletilerek kuruması sağlanmıştır. Kalsinasyon işlemi için; sıcaklığın, elde edilen silika miktarına etkisini gözlemlemek amacıyla 600°C, 700°C ve 800°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta inceleme yapılmıştır. Şekil 1' de nanosilika eldesi için akış diyagramı verilmiştir. Çam iğnelerinin termal ayrışması ile nanosilika parçacıkları hazırlanmıştır. Yakma işlemi sonucunda çeşitli miktar ve verimde kül elde edilmiştir. Şekil 2.a)'da çalışmada kullanılan çam iğnesinin, Şekil 2.b)'de ise elde edilen nanosilikanın görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. Çam İğnesinden Silika Eldesinin Şematik Gösterimi



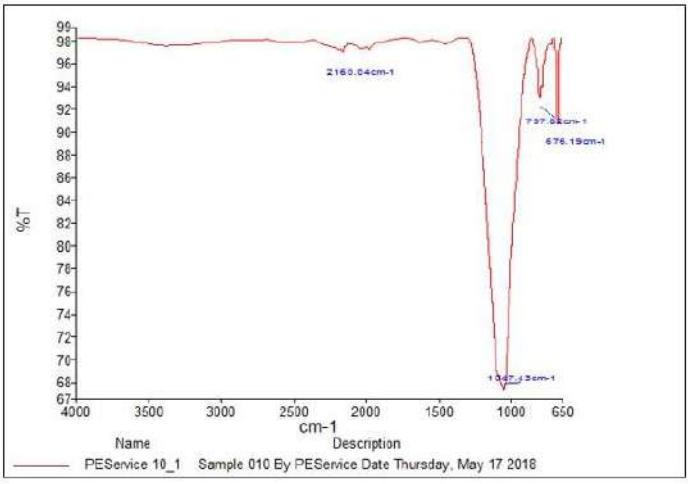
Şekil 2. a) Çalışmada kullanılan çam iğnesi b) elde edilen silika

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde çam iğnesinden elde edilen naonosilikanın karakterizasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Çam iğnesinden elde edilen nanosilikanın yapısı FT-IR ve SEM-EDS analizleri ile belirlenmiştir.

3.1. FT-IR Analizi

Çam iğnesinden elde edilen silikada bulunan fonksiyonel gruplar FT-IR analizi ile belirlenmiştir. Silikanın FT-IR spektrumu Şekil 3'de verilmiştir.

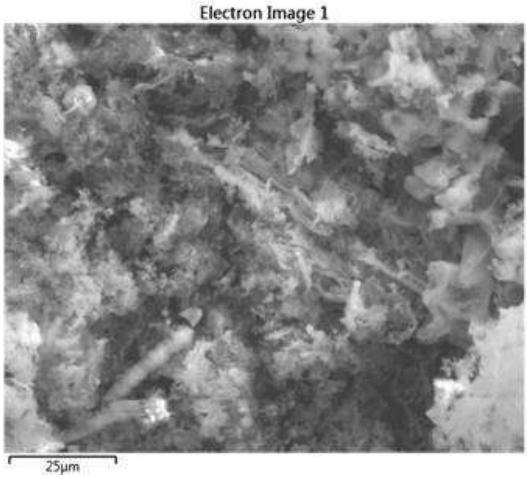


Şekil 3. Çam İğnesinden Elde Edilen Silikaya Ait FT-IR Spektrumu

Spektruma bakıldığında belirgin pikler 1047 ve 797 $cm^{-1'}$ de görülmektedir. Silikanın varlığını gösteren bu pikler sırasıyla Si-O-Si gerilme ve bükülme titreşiminden kaynaklanmaktadır [37].

3.2 SEM-EDS Analizi

Şekil 4'de verilen silikanın SEM görüntüleri incelendiğinde, yapının düzensiz bir şekle sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Çam İğnesinden Elde Edilen Silikanın SEM görüntüleri

Yapıdaki elementler EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) analizi ile belirlenmiş ve silikanın kütlece %51.88 oksijen, %28.28 silisyum içerdiği tespit edilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çam İğnesinden Elde Edilen Silikanın SEM-EDS Sonuçları

Element	%
O	51,88
Si	28,28
Na	0,35
Mg	0,44
Al	3,10
P	2,85
S	1,43
K	1,40
Ca	9,19
Ti	0,58
Fe	0,50
Toplam	100

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, kullanım alanı ve ekonomik değeri fazla olan nanosilikanın çam iğnesinden eldesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan çeşitli deneyler sonucunda 800 °C'de elde edilen külün safsızlığının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yakma işlemi sırasında optimum süreninde 3 saat olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan diğer sıcaklık çalışmalarında sonuç istenilen şekilde olmamıştır. 700 °C'deki kalsinasyon işleminden sonra elde edilen külün içeriğinde siyah partiküller gözlemlenmiştir. 600 °C'de ise siyah partiküllerin çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bu açıdan bakıldığında en iyi sonuç 800 ° C 'de gözlemlenmiştir.

800 ° C, 3 saat yanma süresinden sonra oluşan külün FT-IR analizi yapıldığında 1047 ve 797 cm^{-1} 'de iki adet belirgin pik gözlemlenmiştir (Şekil 4). Bu pikler literatür ile karşılaştırıldığında Si-O-Si silanol grubu varlığı tespit edilmiştir.

Yapılan SEM karakterizasyonu sonunda ise 800 ^{0}C'de Si elementinin kütlece yüzdeliği 28,28 ve Oksijen elementinin kütlece yüzdeliğinin 51,88 olduğu görülmüştür.

10 gram çam iğnesinin 800 °C'de 3 saat kalsinasyonu sonrasında, geriye 0,0251 gram kalmıştır. Bu veriler doğrultusunda verim hesabı yapıldığında %0,25 verim elde edilmiştir.

Çam iğnesinin kullanıldığı bir alan bulunmuyor olması, ekonomik olarak maliyetinin olmaması, nanosilika eldesi için cesaret verici olmuştur. Maliyeti bulunmayan bir üründen katma değeri yüksek olan bir ürün nanosilikanın elde edilmesi çalışmanın verimli olduğunu kanıtlamıştır. Literatürde çam iğnesi ile ilgili çok fazla çalışma bulunmadığından yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların literatüre bilimsel bir katkısı olacağı düşünülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Sun, L., Gong, K. (2001). Silicon-based materials from rice husks and their applications. Ind Eng Chem Res, 40, 5861–77.

[2] Chen H, Wang F, Zhang C, Shi Y, Jin G, Yuan S. Preparation of nano-silicamaterials: the concept from wheat straw. J Non-Cryst Solids 2010;356:2781–5.

[3] Mohammadpour, Z., .Zare, H.R. (2021). The role of embedded 2-ABT@Cu-BTC MOF on the anti-corrosion performance of electro-assisted deposited silica sol-gel composite film. Physics, 267, 124590.

[4] Jal, P.K., Sudarshan, M. Saha, A., Patel, S., Mishra, B.K. (2004). Synthesis and characterization of nanosilica prepared by precipitation method. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 240, 173–178.

[5] Sarkar, J., Mridha, D., Sarkar J., Orasugh, J.T., Gangopadhyay, B., Chattopadhyay, D., Roychowdhury, T., Acharya, K. (2021). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 37, 102175.

[6] Mohanraj, V.J., Chen, Y. (2007). Nanoparticles - A Review. Tropical Journal of Pharmaceutical Research 5,1, 561-563.

[7] Zou, H., Wu, S., Shen, J. (2008). Polymer/silica nanocomposites: preparation, characterization, properties, and applications. Chem. Rev., 108. 3893-3957.

[8]Slowing, I.I., Trewyn, B.G., Giri, S., Lin, V.S. (2007). Mesoporous Silica Nanoparticles for Drug Delivery and Biosensing Applications. Adv. Funct. Mater. 17, 1225–1236.

[9] Barik, T.K., Sahu, B., Swain, V. (2008). Nanosilica-from medicine to pest control Parasitol. Res., 103, 253-258.

[10] Mittal, A.K., Chisti, Y. Banerjee, U.C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. Biotechnol. Adv., 31. 346-356.

[11] Brongersma, M.L. (2003) Nanoscale photonics: nanoshells: gifts in a gold wrapper. Nat Mater, 2, 296–297.

[12] Ivanchik, N., Kondratiev, N., Chesnokova, A. (2016). Use of Nanosilica Recovered from the Finely Dispersed By-product of the Electrothermal Silicon Production for Concrete Modification. Procedia Engineering, 150, 1567-1573.

[13] Zhang, M.H. Islam, J. (2012). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag. Constr. Build. Mater., 29, 573-580.10.1016/j.conbuildmat.2011.11.013.

[14] Tahmassebi, N., Moradian, S., Ramezanzadeh, B., Khosravi, A., Behdad, S. (2010). Effect of addition of hydrophobic nano silica on viscoelastic properties and scratch resistance of an acrylic/melamine automotive clearcoat. Tribol. Int., 43, 685-693.

[15] Dashtizadeh, A., Abdouss, M., Mahdavi, H., Khorassani, M. (2011). Acrylic coatings exhibiting improved hardness, solvent resistance and glossiness by using silica nano-composites. Appl. Surf. Sci., 257, 6, 2118-2125.

[16] Domansky, K., Liu, J., Wang, L.Q., Engelhard, M.H. Baskaran, S. (2001).Chemical sensors based on dielectric response of functionalized mesoporous silica films. J. Mater. Res., 16, 2810-2816.

[17] Chakraverty A, Mishra P, Banerjee HD. (1988). Investigation of combustion of raw andacid-leached rice husk for production of pure amorphous white silica. J. Mater .Sci.,23, 21–4.

[18] Kalapathy, U., Proctor, A., Shultz, J. (2002). An improved method for production of silicafrom rice hull ash. Bioresour Technol, 85, 285–289.

[19] Wang, X.R., Szmidt, A.E. (1993). Chloroplast DNA-based phylogeny of Asian Pinus species (Pinaceae). Plant Syst. Evol., 188, 197-211, 10.1007/BF00937728.

[20] Kurose, K., Okamura, D., Yatagai, M. (2007). Composition of the essential oils from the leaves of nine pinus species and the cones of three of Pinus species. Flavour Fragr. J., 22, 10-20.

[21] Xu, R.B., Yang, X., Wang, J., Zhao, H.T., Cui, J. et al. (2012). Chemical composition and antioxidant activities of three polysaccharide fractions from pine conesInt. J. Mol. Sci., 13, 14262-14277.

[22] Thakur, V., Singha, A. (2011). Physicochemical and mechanical behavior of cellulosic pine needle-based biocomposites. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 16, 6, 390-398.

[23] Lu, P. Hsieh, Y.L. (2012). Highly pure amorphous silica nano-disks from rice straw. Powder Technol., 225, 149-155, 10.1016/j.powtec.2012.04.002

[24] Wattanasiriwech, S., Wattanasiriwech, D., Svasti, J. (2010). Production of amorphous silica nanoparticles from rice straw with microbial hydrolysis pretreatment. J. Non. Cryst. Solids, 356, 1228-1232.

[25] Yener, H.B., Helvacı, Ş.Ş. (2015). Effect of synthesis temperature on the structural properties and photocatalytic activity of TiO_2/SiO_2 composites synthesized using rice husk ash as a SiO_2 source. Sep. Purif. Technol., 140, 84-93.

[26] Ghorbani, F., Younesi, H., Mehraban, Z., Mehmet Sabri Celik, M.S., Ghoreyshi, A.A., Mansoor Anbia, M. (2013). Preparation and characterization of highly pure silica from sedge as agricultural waste and its utilization in the synthesis of mesoporous silica MCM-41. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 44, 5, 821-828.

[27] Assefi, M., Davar, F., Hadadzadeh, H. (2015). Green synthesis of nanosilica by thermal decomposition of pine cones and pine needles. Advanced Powder Technology, 26, 6, 1583-1589.

[28] Thangadurai, D., Naik, J. Sangeetha, J., Al-Tawaha, A.R.M.S., Adetunji, C.O., Islam, S., Adetunji, J.B. (2021). Nanomaterials from agrowastes: past, present, and the future, Handb. Nanomater. Nanocomposites Energy Environ. Appl.,471–487, https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3_43.

YENİ NESİL DERLEYİCİ TASARIM PLATFORMU: LLVM KOMUT SETİ MİMARİSİ

Fatih TOPALOĞLU

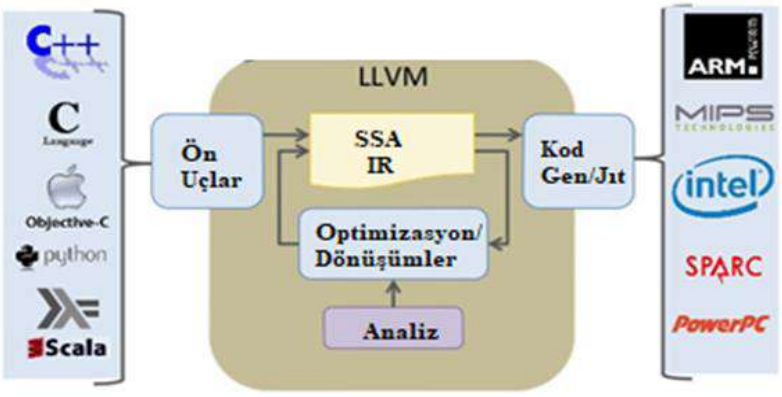
Dr.Öğr.Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
fatih.topaloglu@ozal.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2089-5214

1. Giriş

Derleyici, bir programlama dilinin kaynak kodunu makine koduna, bayt koduna veya başka bir programlama diline çeviren özel bir programdır. Düşük Seviyeli Sanal Makine (LLVM), derleyici geliştirmeyi ve ilgili görevleri desteklemek için tasarlanmış bir kitaplıklar koleksiyonudur. Başlangıçta Düşük Seviyeli Sanal Makine anlamına gelirken, bugün derleyici geliştirmeyi sağlayan bir tasarım platformuna dönüşmüştür. LLVM projesi, 2000 yılında Illinois Üniversitesi'nde araştırma olarak başladı. Dinamik programlama dilleri ve LLVM statik analizi için derleme teknikleri üzerinde çalıştı. Bugün LLVM, kapsamını sanal makinelerle çok az ilişkisi olan birçok farklı akademik araştırma, ticari ve açık kaynak projesini içerecek şekilde genişletti.

Bu, yeni bir donanım mimarisi yalnızca yeni diller oluşturmayı değil, mevcut dillerin gelişimini geliştirmeyi de kolaylaştırır. LLVM, dil oluşturma görevinin en karmaşık ve zor olan kısımlarının çoğunu otomatikleştirmek için araçlar sağlar: bir derleyici oluşturmak, çıktısı alınan kodu birden çok platforma ve mimariye taşımak, vektörleştirme gibi mimariye özgü optimizasyonlar oluşturmak ve yaygın dil metaforlarını işlemek için kod yazmayı sağlar.

En yaygın derleyici paketi olarak GNU Compiler Collection'ın (GCC) bilinmesine rağmen GCC yeniden kullanılabilir şekilde tasarlanmadığından diğer uygulamaların GCC bileşenlerini kullanması zordur. LLVM'yi son yıllarda popüler yapan şey, herkesin derleyici ve dil odaklı yazılım oluşturmak için kullanabileceği bir dizi modüler, yeniden kullanılabilir ve araç zinciri teknolojileri oluşturarak bu sorunu çözmektedir. Şekil 1'de LLVM mimarisinin derleyici alt yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1. LLVM derleyici altyapısı

Ön uçta yüksek seviye dil, arka uçta doğrudan makinede çalışan yerel kod, merkezde ara kod temsili bulunur. Temel mantığı her üst düzey dil bu LLVM IR formatında temsil edilebiliyorsa, bu IR'ye dayalı analiz araçları kolayca yeniden kullanılabilir. Bir LLVM derleyicisi, ön uçta LLVM derleyici altyapısı, kaynak kodunu geçici bir biçime dönüştürmek için C, C++ ve CUDA programlama dilleri için bir derleyici olan clang'ı kullanır. Ardından, arka uçtaki LLVM klan kodu oluşturucu, ara formatı nihai makine koduna dönüştürür.

Derleyiciler, kaynak kodunu analiz etmek ve çıktı koduna dönüştürmek için kullandıkları yöntemlerde farklılık gösterir. Farklılıklarına rağmen, genellikle Şekil 2'de gösterilen adımları gerçekleştirirler:

Sözlüksel analiz: Derleyici, kaynak kodu, koddaki belirli kalıpları temsil eden ayrı kod parçaları olan sözlüklere böler. Sözlük birimleri daha sonra sözdizimi ve anlamsal analizler için hazırlanırken tokenize edilir .

Sözdizimi analizi: Derleyici, kaynak dilin kurallarına göre kodun sözdiziminin doğru olduğunu doğrular. Bu işleme ayrıştırma da denir. Bu adım sırasında, derleyici tipik olarak belirli kod öğelerinin mantıksal yapılarını temsil eden soyut sözdizimi ağaçları oluşturur.

Semantik analiz: Derleyici, kod mantığının geçerliliğini doğrular. Bu adım, kodun doğruluğunu onaylayarak sözdizimi analizinin ötesine geçer. Örneğin, semantik analiz, değişkenlere doğru tiplerin atanıp atanmadığını veya uygun şekilde bildirilip bildirilmediğini kontrol edebilir.

IR kodu üretimi: Kod üç analiz aşamasının hepsinden geçtikten sonra, derleyici kaynak kodun bir ara temsilini (IR) oluşturur. IR kodu, kaynak kodun farklı bir formata çevrilmesini kolaylaştırır. Ancak, kaynak kodunu her açıdan, herhangi bir işlevsellikten ödün vermeden doğru bir şekilde temsil etmelidir.

Optimizasyon: Derleyici, nihai kod üretimine hazırlanırken IR kodunu optimize eder. Optimizasyonun türü ve kapsamı derleyiciye bağlıdır. Bazı derleyiciler, kullanıcıların optimizasyon derecesini yapılandırmasına izin verir.

Çıkış kodu üretimi: Derleyici, optimize edilmiş IR kodunu kullanarak son çıktı kodunu üretir.

Şekil 2. Derleyiciler tarafından gerçekleştirilen adımlar

Derleyiciler bazen tercüman adı verilen programlarla karıştırılır. İkisi benzer olsa da, önemli yönlerden farklılık gösterirler. Derleyiciler Java, C++, C# veya

Swift gibi dillerde yazılmış kaynak kodunu analiz eder ve dönüştürür . Hedef ana bilgisayar sistemi tarafından yürütülebilen makine kodu veya bayt kodu oluşturmak için yaygın olarak kullanılırlar. Tercümanlar IR kodu oluşturmaz veya oluşturulan makine kodunu kaydetmez. Kodu önceden dönüştürmeden veya belirli bir platform için önceden hazırlamadan çalışma zamanında her seferinde bir ifade kodu işlerler. Tercümanlar, Perl , PHP, Ruby veya Python gibi betik dillerinde yazılan kodlar için kullanılır .

LLVM'den yararlanan çok sayıda bilinen dillerin bulunmaktadır. Apple'ın Swift dili, derleyici çerçevesi olarak LLVM'yi kullanır ve Rust, araç zincirinin temel bileşeni olarak LLVM'yi kullanır. Ayrıca, birçok derleyicinin bir LLVM sürümü vardır, örneğin C/C++ derleyicisi olan Clang gibi, kendisi de LLVM ile yakından ilişkili bir projedir. .NET uygulaması olan Mono, bir LLVM arka ucu kullanarak yerel koda derleme seçeneğine sahiptir . Sözde bir JVM dili olan Kotlin, dilin yerel makine kodunu derlemek için LLVM kullanan Kotlin Native adlı bir sürümünü geliştirmektedir.

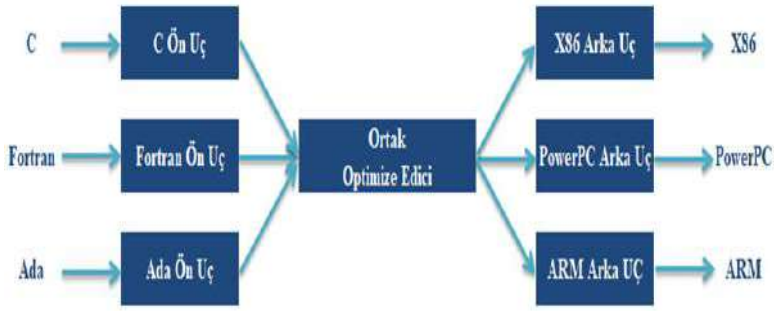
2. Klasik Derleyici Tasarımı

Geleneksel statik bir derleyici için tasarımın ana bileşenleri Şekil 3'de görüldüğü gibi ana ön uç, optimize edici ve arka uç olan üç aşamalı tasarımdır.

Şekil 3. Üç aşamalı derleyicinin üç ana bileşeni

Ön uç, kaynak kodunu ayrıştırır, hata olup olmadığını kontrol eder ve giriş kodunu temsil etmek için dile özgü soyut sözdizimi ağacı oluşturur. Soyut sözdizimi ağacı isteğe bağlı olarak optimizasyon için yeni bir gösterime dönüştürülür ve optimize edici ve arka uç kod üzerinde çalıştırılır. Optimize edici, gereksiz hesaplamaları ortadan kaldırmak, kodun çalışma süresini iyileştirmek için çok çeşitli dönüşümler yapmaktan sorumludur. Arka uç daha sonra kodu hedef komut setine eşler. Doğru kod yapmanın yanı sıra, desteklenen mimarinin özelliklerinden yararlanarak iyi kod üretmekten sorumludur.

Bu klasik tasarımın en önemli kazanımı, bir derleyicinin birden çok kaynak dili veya hedef mimariyi desteklemesidir. Derleyici, optimize edicisinde ortak bir kod gösterimi kullanıyorsa, Şekil 4'de gösterildiği gibi, onu derleyebilen herhangi bir dil için bir ön uç ve ondan derlenebilen herhangi bir hedef için bir arka uç yazılabilir .



Şekil 4. Yeniden hedeflenebilirlik

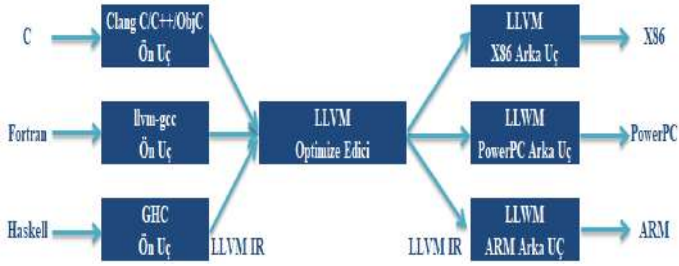
Bu tasarımla, derleyiciyi yeni bir kaynak dili destekleyecek şekilde, yeni bir ön uç uygulanmasını gerektirir, ancak mevcut iyileştirici ve arka uç yeniden kullanılabilir. Bu parçalar ayrılmasaydı, yeni bir kaynak dil uygulamak sıfırdan başlamayı gerektirecekti, bu nedenle destekleyici hedefler N ve kaynak M diller N*M derleyicilere ihtiyaç duyacaktı.

Üç aşamalı tasarımın bir başka avantajı, derleyicinin yalnızca bir kaynak dili ve bir hedefi desteklemesinden daha geniş bir programcılar grubuna hizmet etmesidir. Açık kaynaklı bir proje için bu, potansiyel katkıda bulunanlardan oluşan daha büyük bir topluluk olduğu anlamına gelir ve bu da doğal olarak derleyicide daha fazla geliştirme ve iyileştirmeye yol açar. GCC ve LLVM gibi geniş topluluğa hizmet veren açık kaynak derleyicilerin, FreePASCAL gibi daha dar derleyicilerden daha iyi optimize edilmiş makine kodu üretmesinin nedeni budur.

Üç aşamalı tasarımın bir başka kazanımı, bir ön ucu uygulamak için gereken becerilerin optimize edici ve arka uç için gerekli olanlardan farklı olmasıdır. Bunları ayırmak, bir ön ucun derleyicinin kendi bölümünü geliştirmesini ve sürdürmesini kolaylaştırır.

3. LLVM'nin Üç Aşamalı Tasarımı

Statik derleme [1- 3] sırasında dışa aktarılan derleyici iç temsilini (IR) kullanarak veya nesne dosyalarına [4] eklenen özel açıklamaları kullanarak bağlantı zamanında prosedürler arası optimizasyon gerçekleştirin. LLVM tabanlı bir derleyicide, giriş kodundaki hataların ayrıştırılmasından, doğrulanmasından ve teşhis edilmesinden ve ardından ayrıştırılan kodun LLVM IR'ye çevrilmesinden bir ön uç sorumludur. Bu IR, isteğe bağlı olarak, kodu iyileştiren bir dizi analiz ve optimizasyon geçişinden beslenir, ardından Şekil 5'de gösterildiği gibi yerel makine kodunu üretmek için bir kod oluşturucuya gönderilir.



Şekil 5. LLVM'nin üç aşamalı tasarım uygulaması

LLVM IR hem iyi tanımlanmış hem de optimize edici için tek arabirimdir. Bu özellik, LLVM için bir kullanıcı arabirimi yazmak için bilinmesi gereken tek şeyin LLVM IR'nin ne olduğu, nasıl çalıştığı ve beklediği değişkenleridir. LLVM IR birinci sınıf bir metin biçimine sahip olduğu için, LLVM IR'yi metin olarak çıkaran bir ön uç oluşturmak hem mümkün hem de mantıklıdır, ardından bunu optimize edici dizisi seçilen kod oluşturucu aracılığıyla göndermek için Unix kanallarını kullanır. Bu LLVM için oldukça yeni bir özellik ve farklı uygulamalardaki başarısının ana nedenlerinden biridir. Yaygın olarak başarılı ve nispeten iyi tasarlanmış GCC derleyicisi bile bu özelliğe sahip değildir.

LLVM IR'nin tasarımından sonra, LLVM'nin bir sonraki en önemli yönü, GCC gibi yekpare bir komut satırı derleyicisi, JVM veya .NET sanal makineleri gibi bir sanal makine yerine bir dizi kitaplık olarak tasarlanmış olmasıdır. LLVM platformu, belirli sorunlara uygulanabilen kullanışlı bir derleyici teknolojisi koleksiyonudur.

Optimize edicinin tasarımı, LLVM'de optimize edici, her biri girdi üzerinde çalıştırılan ve bir şeyler yapma şansı olan farklı optimizasyon geçişlerinden oluşan bir boru hattı olarak düzenlenir. Yaygın geçiş örnekleri, satır içi, ifadeleri yeniden ilişkilendirme ve döngü değişmez kod hareketleridir.

Her LLVM geçişi, Pass sınıfından dolaylı olarak türetilen bir C++ sınıfı olarak yazılır. Çoğu geçiş, tek bir .cpp dosyasına yazılır ve Pass sınıfının alt sınıfı, anonim bir ad alanında tanımlanır. Geçişin kullanışlı olması için, dosyanın dışındaki kodun onu alabilmesi gerekir, böylece tek bir işlev dosyadan dışa aktarılır. Tablo 1'de işlevleri somut hale getirmek için basitleştirilmiş bir geçiş örneği verilmiştir.

Tablo 1. Basitleştirilmiş geçiş kod bloğu

```
namespace
{
class Hello : public FunctionPass
{
public:
virtual bool runOnFunction(Function &F)
{
cerr << "Hello: " << F.getName() << "\n";
return false;
}
};
}
FunctionPass *createHelloPass()
{
 return new Hello();
}
```

LLVM iyileştirici, her biri benzer bir formda yazılmış düzinelerce farklı geçiş sağlar. Bu geçişler, daha sonra bir dizi arşiv kitaplığında yerleşik olan bir veya daha fazla .o dosyasında derlenir. Bu kitaplıklar her türlü analiz ve dönüştürme kabiliyetini sağlar ve geçişler mümkün olduğu kadar esnek bir şekilde birleştirilir. Çalıştırılması için bir dizi geçiş verildiğinde, LLVM PassManager bu bağımlılıkları karşılamak ve geçişlerin yürütülmesini optimize etmek için açık bağımlılık bilgilerini kullanır.

4. LLVM'nin Kod Gösterimi: LLVM IR

LLVM tasarımının en önemli özelliği, derleyicide kodu temsil etmek için kullandığı biçim olan LLVM ara gösterimidir. LLVM IR, bir derleyicinin optimize edici bölümünde bulunan orta düzey analizleri ve dönüşümleri barındırmak için tasarlanmıştır. Hafif çalışma zamanı, optimizasyonları desteklemek, işlevler/prosedürler arası optimizasyon ve , tüm program analizi gibi birçok hedef baz alınarak tasarlanmıştır. Tablo 2'de tamsayıları eklemek için .ll dosya örneği kod yapısı verilmiştir.

Tablo 2. Tamsayı ekleme kod bloğu

LLVM IR	C Programı

define i32 @add1(i32 %a, i32 %b)
{
entry:
  %tmp1 = add i32 %a, %b
  ret i32 %tmp1
}
define i32 @add2(i32 %a, i32 %b)
{
entry:
  %tmp1 = icmp eq i32 %a, 0
  br i1 %tmp1, label %done, label %recurse
recurse:
  %tmp2 = sub i32 %a, 1
  %tmp3 = add i32 %b, 1
  %tmp4 = call i32 @add2(i32 %tmp2, i32 %tmp3)
  ret i32 %tmp4
done:
  ret i32 %b
}
	unsigned add1(unsigned a, unsigned b)
	{
	  return a+b;
	}
	unsigned add2(unsigned a, unsigned b)
	{
	  if (a == 0) return b;
	  return add2(a-1, b+1);
	}

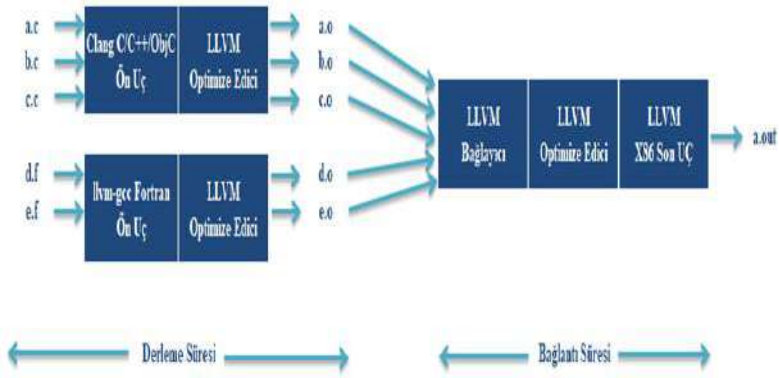
LLVM IR Çizelge X'te görüldüğü gibi düşük seviyeli bir RISC benzeri sanal komut setidir. Gerçek bir RISC komut seti gibi, toplama, çıkarma, karşılaştırma ve dallanma gibi basit komutların doğrusal dizilerini destekler. RISC komut setinden farklı olarak LLVM, basit bir tür sistemiyle güçlü bir şekilde yazılmıştır ve makinenin bazı ayrıntıları soyutlanmıştır.

Bir dil olarak uygulanmasının ötesinde, LLVM IR aslında üç formda tanımlanır, metinsel format, optimizasyonlar tarafından incelenen ve değiştirilen bir bellek içi veri yapısı ve disk üzerinde ikili bit kodu formatı. LLVM Projesi ayrıca disk üzerindeki formatı metinden ikili formata dönüştürmek için araçlar sağlar.

5. LLVM Modüler Tasarımı ve Sağladığı Avantajlar

Genel olarak fonksiyonel bir tasarım olmasının yanı sıra modülerlik, LLVM kitaplıkları kullanıcılara önemli katkılar sağlar. Bu katkılar, LLVM'nin işlevselliği, nasıl kullanılacağına ilişkin ilkelerin çoğuna kullanıcıların karar vermesine izin vermesidir.

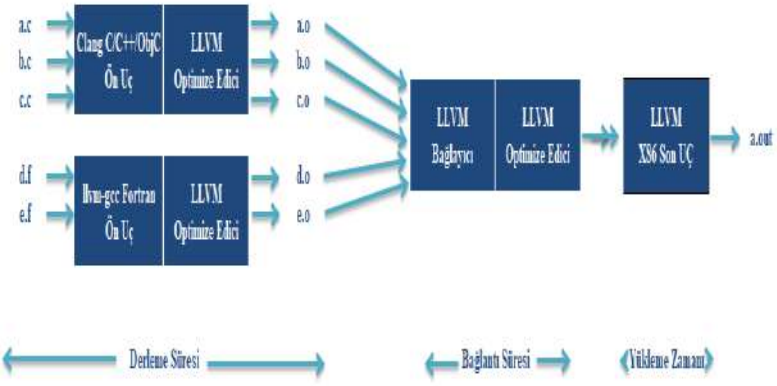
Bağlantı zamanı optimizasyonu, derleyicinin aynı anda yalnızca bir çeviri birimi gördüğü ve bu nedenle dosya sınırları arasında optimizasyonlar yapamadığı sorunu giderir. Clang gibi LLVM derleyicileri bunu -flto veya -O4 komut satırı seçeneğiyle destekler. Bu seçenek, derleyiciye yerel bir nesne dosyası yazmak yerine LLVM bit kodunu .file dosyasına yazması talimatını verir ve Şekil 6'da gösterildiği gibi kod oluşturmayı bağlantı süresine geciktirir.



Şekil 6. Bağlantı süresi optimizasyonu

Ayrıntılar hangi işletim sisteminde olduğuna bağlı olarak değişir, ancak önemli olan nokta, bağlayıcının yerel nesne dosyaları yerine .o dosyalarında LLVM bit koduna sahip olduğunu algılamasıdır. Bunu gördüğünde, tüm bit kodu dosyalarını belleğe yazar, bunları birbirine bağlar ve ardından LLVM iyileştiriciyi çalıştırır. Bir optimizasyon bağlayıcısında [5 -11] makine kodunda prosedürler arası optimizasyon gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, son kullanıcı için şeffaftır, ancak makine kodu tarafından sağlanan bilgi eksikliği nedeniyle sınırlıdır. Optimize edici kodun çok daha büyük bir kısmını görebildiğinden, satır içi yapabilir, sabitleri yayabilir, gereksiz kod elemesi yapabilir. LLVM'de bağlantı zamanı optimizasyonu, diğer birçok derleyicinin aksine sistemin tasarımından doğal olarak çıkar ve farklı kaynak dillerde çalışır, çünkü IR gerçekten kaynak dilden bağımsızdır.

Kurulum zamanı optimizasyonu, Şekil 7'de gösterildiği gibi, kod üretimini bağlantı zamanından sonra bile, kurulum süresine kadar geciktirme fikridir.



Şekil 7. Kurulum süresi optimizasyonu

Yükleme süresi yazılımın kutuda gönderildiği, indirildiği, bir mobil cihaza yüklendiği durumlardaki süredir. Bu, hedeflenen cihazın özelliklerinin öğrenildiği zamandır. Bir çok yonga ve özellik bulunduran işlemcide yönerge seçimini, zamanlamayı ve kod oluşturmanın diğer yönlerini geciktirerek, bir uygulamanın üzerinde çalıştığı belirli donanım için en iyi yanıtlar seçilebilmektedir.

Derleyiciler çok karmaşıktır ve kalite önemlidir, bu nedenle test etmek çok önemlidir. Örneğin, bir optimize edicide çökmeye neden olan bir hatayı düzelttikten sonra, bunun tekrarlanmamasını sağlamak için bir regresyon testi eklenmelidir. Bunu test etmeye yönelik geleneksel yaklaşım .c, derleyici aracılığıyla çalıştırılan bir dosya yazmak ve derleyicinin çökmediğini doğrulayan bir test donanımına sahip olmaktır.

Modüler optimize edici ile LLVM IR'nin metinsel biçimini kullanan LLVM test paketi, LLVM IR'yi diskten yükleyebilen, tam olarak bir optimizasyon geçişinde çalıştırabilen ve beklenen davranışı doğrulayabilen regresyon testlerine sahiptir. Çökmenin ötesinde, daha karmaşık bir davranış testi, bir optimizasyonun gerçekten gerçekleştirildiğini doğrulamak istemektedir. Tablo 3'de, sabit yayılma geçişinin ekleme yönergeleriyle çalışıp çalışmadığını kontrol eden basit bir test örneği verilmiştir:

Tablo 3. Test kod bloğu

```
; RUN: opt < %s -constprop -S | FileCheck %s
define i32 @test()
{
  %A = add i32 4, 5
  ret i32 %A
  ; CHECK: @test()
  ; CHECK: ret i32 9
}
```

RUN satırı yürütülecek komutu belirtir, burada opt ve FileCheck komut satırı araçlarıdır. Opt programı, tüm standart geçişlere bağlanan ve diğer geçişleri içeren eklentileri dinamik olarak yükleyebilen ve bunları komut satırına sunan LLVM geçiş yöneticisinin etrafındaki basit bir paketleyicidir. FileCheck aracı, standart girişinin bir dizi CHECK yönergesiyle eşleştiğini doğrular. Bu durumda, bu basit test, constprop geçişinin 4 ve 5'in toplamını 9 olduğunu doğrulamaktadır.

Bu basit test örneğini .c dosyaları yazarak test etmek çok zordur; ön uçlar ayrıştırılırken genellikle sürekli katlama yapar, bu nedenle aşağı yönde bir sabite giden kod yazmak çok zor ve kırılgandır. LLVM IR metin olarak yüklenebilmesi, belirli optimizasyon geçişi aracılığıyla gönderilebilmesi ve sonucu başka bir

metin dosyası olarak çıkarabilmesi için, hem regresyon hem de özellik testlerinde istenilen şeyi test etmek kolaylaşır.

LLVM kitaplıklarının bir derleyicisinde veya başka bir istemcisinde bir hata bulunduğunda, onu düzeltmenin ilk adımı, sorunu yeniden üreten bir test durumu elde etmektir. Bir test senaryosu olduğunda, sorunu yeniden oluşturan en küçük örneğe küçültmek ve daraltmak en iyi çözümdür. LLVM BugPoint aracı, bu işlemi otomatikleştirmek için LLVM'nin IR serileştirmesini ve modüler tasarımını kullanır. Örneğin, optimize edicinin çökmesine neden olan bir optimizasyon geçişleri listesiyle birlikte bir girdi .ll veya .bc dosya verildiğinde, BugPoint girişi küçük bir test senaryosuna indirger ve hangi optimize edicinin hatalı olduğunu belirler. Daha sonra azaltılmış test durumunu ve opt arızayı yeniden oluşturmak için kullanılan komutu verir. Bunu, girişi ve optimize edici geçiş listesini azaltmak için "delta hata ayıklamasına" benzer teknikler kullanarak bulur. LLVM IR'nin yapısını bildiği için BugPoint, standart "delta" komut satırı aracının aksine optimize ediciye giriş yapmak için geçersiz IR oluşturmakla zaman harcamaz.

6. Sonuç

LLVM temel olarak derleyiciler veya dil yönelimli yazılımlar oluşturmak için kullanılan bir kütüphanedir. LLVM'nin mimariden bağımsız tasarımı, mevcut ve gelecekteki her türden donanımı desteklemeyi kolaylaştırır. LLVM ve GCC her ikisi de derleyicidir. Aradaki fark, GCC'nin bir dizi programlama dilini desteklemesi, LLVM'nin herhangi bir dil için bir derleyici olmamasıdır.

LLVM, her türlü kaynak kodundan nesne kodu oluşturmak için bir çerçevedir. LLVM ve GCC'nin her ikisi de çok çeşitli dilleri ve kitaplıkları desteklerken, farklı şekilde lisanslanır ve geliştirilir. LLVM kitaplıkları daha özgürce lisanslanır ve GCC'nin yeniden kullanımı için daha fazla kısıtlaması vardır. Performans farklılıkları söz konusu olduğunda, geçmişte GCC'nin üstün olduğu düşünülse de LLVM son dönemde daha çok zemin kazanmaktadır.

Kaynaklar

[1] Mary F. Fernandez. ´ Simple and effective link-time optimization of Modula-3 programs. ACM SIGPLAN Notices, 30(6):103–115, 1995.

[2] Andrew Ayers, Stuart de Jong, John Peyton, and Richard Schooler. Scalable cross-module optimization. ACM SIGPLAN
Notices, 33(5):301–312, 1998.

[3] IBM Corporation. Xl fortran: Eight ways to boost performance. White Paper, 2000.

[4] D. Wall. Global register allocation at link-time. In Proc. SIGPLAN ’86 Symposium on Compiler Construction, Palo Alto, CA, 1986.

[5] Vasanth Bala, Evelyn Duesterwald, and Sanjeev Banerjia. Dynamo: A Transparent Dynamic Optimization System. In Proc. ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, June 2000.

[6] Kemal Ebcioglu and Erik R. Altman. DAISY: Dynamic compilation for 100In ISCA, pages 26–37, 1997.

[7] T. Halfhill. Transmeta breaks x86 low-power barrier, 2000.

[8] R. Muth. Alto: A platform for object code modification, 1999.

[9] Amitabh Srivastava and David W. Wall. A practical system for intermodule code optimization at link-time. Journal of
Programming Languages, 1(1):1–18, December 1992.

[10] R. Cohn, D. Goodwin, P. Lowney, and N. Rubin. Spike: An optimizer for alpha/nt executables, 1997.

[11] T. Romer, G. Voelker, D. Lee, A. Wolman, W. Wong, H. Levy, B. Bershad, and B. Chen. Instrumentation and optimization of win32/intel executables using etch, 1997.

DOĞAL TAŞLARIN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN GABİON DUVAR UYGULAMALARI AÇISINDAN UYGUNLUĞUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Hakan ELÇİ [1], Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU[2]

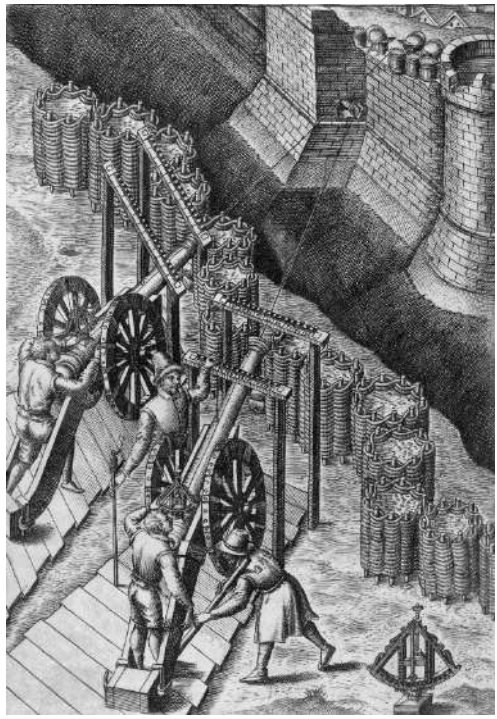
[1]Doç. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Geoteknik Programı İzmir. hakan.elci@deu.edu.tr
ORCID:0000-0003-2945-2548
[2]Öğr. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Doğal Yapı Taşları Teknolojisi Programı, İzmir
ramazan @deu.edu.tr ORCID-0000-0002-2054-6559

1. Giriş

Büyük kafes anlamına gelen gabion terimi İtalyanca "gabbione" kelimesinden türemiştir. Günümüzde "gabion duvar" şeklinde kullanılan terim, inşaat mühendisliğinde dayanma yapısını, mimarlıkta ise tasarım aracını ifade eder (Url-1, Natura, 2020).

7000 yıl önce Mısırlılar tarafından Nil Nehrinin kıyılarının sel ve erozyona karşı korunması amacıyla yapılan hasır kaplı duvarlar ilk gabion duvar uygulaması olarak kabul edilir. Orta Çağ'da içi toprakla doldurulmuş silindirik şekilli gabiona benzer yapılar siper olarak kullanılmıştır (Şekil 1). Leonardo Da Vinci'nin, Milano'daki Sforza Kalesi'nin temeli için tasarlayıp uyguladığı büyük dokuma sepetler, gabionların ilk defa bir yapıda kullanılması açısından önemlidir (Url-2).

İtalya Kraliyet İnşaat Mühendisleri Birliğinden Egidio Palvis mühendislik tasarım anlamında ilk gabion duvarını yapılmıştır. Maccaferri firması ise, Reno Nehri'nin (İtalya, Bologna) taşkınını önleme amacıyla tasarladığı gabion kafeslere (Şekil 2) ilk patent alan firma olmuştur (Url-3).



Şekil 1. Orta Çağ'da siper olarak kullanılan gabion sepetlerin gravürü (Url-1)

Şekil 2. Reno Nehri (İtalya, Bologna), patenti alınan ilk gabion uygulaması (Oganda, 2015)

Gabionlar, galvanizli ve çift burgulu yumuşak çelik tellerden örülmüş altıgen şekilli göz açıklığı olan kare, dikdörtgen veya silindir şekilli kafeslerin içerisine belirli ölçülere sahip kayaçların doldurulması ile üretilen dayanma yapılarıdır (KTŞ, 2013, Uray, 2014, Url-3). Bu kafeslerin dizilmesi ile oluşturulan gabion duvarlar sıklıkla demir yolları, karayolları, köprü ve tünel yaklaşım dolgusu (Şekil 3), heyelan önleme (Şekil 4), şev koruması (Şekil 5), erozyon önleme, dere yatağı ıslahı, sediment tutulması (Şekil 6), liman işleri ve kıyı aşınma korumalarında (Şekil 7) dayanma yapıları olarak kullanılır (Uray, 2014, Macceferri, 2022). Son yıllarda iç mekan düzenlemelerinde ve peyzaj uygulamalarında bir tasarım aracı olarak kullanılmaya başlanmış ve mimaride de kendine yer bulmuştur (Natura, 2020), (Şekil 8).

Şekil 3. Erkenek Tüneli Terramesh Sistem duvar uygulaması (Malatya), (Url4).

Şekil 4. Heyelan önleme, Tingira Crescent, Sunrise Beach, Sunshine Coast (Avustralya), (URL-5)

Şekil 5. Şev koruması uygulaması. Star Rafinerisi, Aliaga (İzmir), (Url-6).

Şekil 6. Tanap Projesi nehir ıslahı ve erozyon koruması, TANAP projesi (Türkiye) (Url-7).

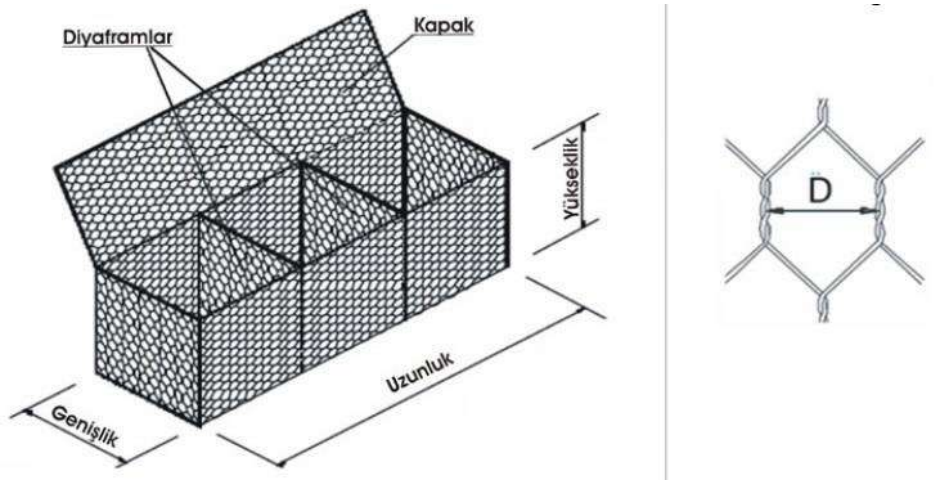
Şekil 7. Kıyı aşınma korumaları, Kepwari Gölü, (Batı Avustralya) (Url-8).

Şekil 8. Peyzaj uygulaması, Martin Munro Parkı, Cairns (Kuzey Avustralya), (Url-8).

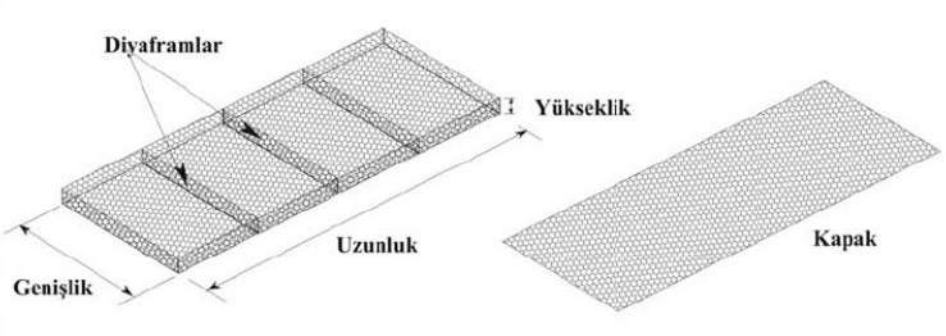
Literatürde gabion duvar uygulamaları ile yapılan çalışmalar daha çok gabion duvarların mühendislik tasarım özelliklerine, gabion duvarlarının oturduğu zeminler ve bu zeminle ile olan etkileşimine yönelik çalışmalardır. Bu çalışmada ise gabion duvar uygulamasında kullanılacak kayaçların malzeme özellikleri ve bu özelliklerin Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) (KGM, 2013) belirtilen şartname malzeme özelliklerine uygunluğu araştırılmıştır.

2. Gabion Sepet Türleri, Gabion Sepet Tellerin ve Kullanılacak Kayaçların Özellikleri

Günümüzde gabion duvarların en yaygın kullanımı kıyı aşınmalarını koruma, erozyon ve heyelan önlemede istinat duvarı gibi dayanma yapılarıyla birlikte iç mekan tasarımı ve peyzaj uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda kullanılan gabion kafes türleri ise kutu-sepet (Şekil 9), şilte (Şekil 10) ve çuval (Şekil 12) gabionlardır (KGM, 2013; Uray ve Tan, 2015).

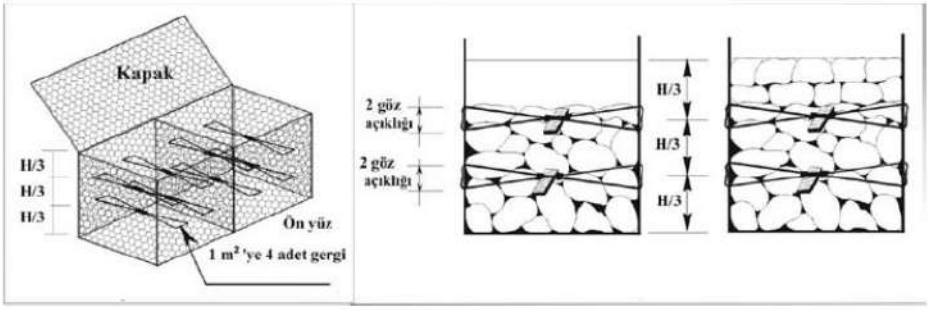


Şekil 9. Kutu-sepet tipi gabion (KGM, 2013).

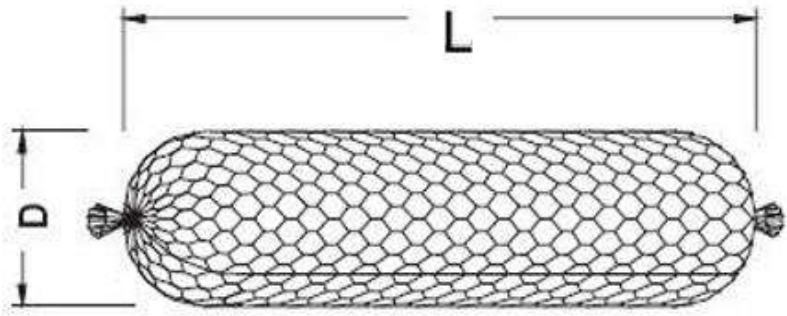


Şekil 10. Şilte tipi gabion (KGM, 2013).

Gabion kafes yapımında kullanılacak yumuşak çelik tellerin ağır galvaniz kaplı çift bükümlü ve kafeslerin altıgen şekilde gözenekler sahip olması istenir. Köşe ve gergi tellerinin (Şekil 11) çekme dayanımının 35-50 kg/mm^2 arası bir değere ve 25 cm uzunluğunda bir köşe veya gergi telinin max %10 uzamasına müsaade edilir (TSE, 2014b).



Şekil 11. Kutu-sepet tipi gabionların köşe ve iç gergileri, kayaçların doldurulması ve iç gergileirn kademeli olarak bağlanması (KGM, 2013).



Şekil 12. Çuval tipi gabion (Url-9).

KTŞ, (2013)'de gabion dayanma yapılarında kullanılacak kayaçlar için tanımlanan limit fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Gabion dayanma yapılarında kullanılacak kayaçların yoğunluğu 2200 kg/m^3'den büyük, su emmesinin % 2'den ve Los Angeles parçalanma direncinin ise % 35'den küçük olması istenir. Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin yanı sıra kullanılacak taşların dona karşı dayanımlı olması, don deneyi sonrası kayaçta gözle görülür bir çatlak, parça kopması veya dağılma olmaması istenir. Ayrıca şartnamede kayacın don deneyi sonrası kütle kaybının % 7'den küçük olması istenir. Ayrıca termal bozunmaya ve aşınmaya karşı dirençli olması istenir (Tablo 1).

Tablo 1. Gabion yapımında kullanılacak kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri (KTŞ, 2013)

Özellik		Şartname limitleri	Deney
Görünür Yoğunluk (kg/m^3)		≥2200	TS 699, TS EN
Kütlece Su Emme Oranı (%)		≤2,0	TS EN 13755
Parçalanma Direnci (%)		≤ 35	TS EN 1097-2
Dona Dayanım	Gözle Muayene Don Sonu Kütle Kaybı (%)	Çatlaklar, parça kopması, dağılma, olmyacak ≤ 7	TS 699
Tuz Krist. Diriencin Tayini (%)		≤ 7	TS 699, TS EN
Magnezyum Sülfat Deneyi (%)		≤ 10	TS EN 1367-2
Aşınma Direnci	Geniş Diskli (mm)	≤ 17	TS EN 1367-2
	Böhme(mm^3/5000 mm^2)	≤ 16.000 mm^3/5.000	

3. Materyal Metot

3.1. Materyal

Çalışmada, daha çok Batı Anadolu olmak üzere Türkiye'nin değişik bölgelerine ait doğal taşlar kullanılmıştır. Kullanılan taşların litolojik isimleri Şekil 13,14 ve 15'de verilmiştir.

3.2. Metot

Öncelikle çalışmada kullanılan doğal taşların mineralojik ve petrografik özellikleri, ikinci aşamada ise doğal taşların malzeme malzeme özellikleri belirlenmiştir.

Doğal taşların mineralojik ve petrografik özellikleri her bir örnekten hazırlanan ince kesitler ile belirlenmiştir. Hazırlanan ince kesitlere TS EN 12407 (TSE, 2019)'a göre Olympus BX41 marka polarizan mikroskop ile farklı büyütmelerde petrografik analiz yapılarak mineral yüzdeleri (modal analizi) belirlenmiş ve litolojik tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 13,14 ve 15).

Doğal taşların görünür yoğunluğu TS EN 1936 (TSE, 2010)'e göre, su emme değeri TS EN 13755 (TSE, 2014a)'e göre 7x7x7 cm boyutlarında küp numunelerden belirlenmiştir. Los Angeles parçalanma direnci TS EN 1097-2 (TSE, 2020a)'e göre 10-14 mm çaplı agregalarda belirlenmiştir. Doğal taşların dona dayanımı TS 699 (TSE, 2009)'a göre, 7x7x7 cm boyutlarında küp numunelerde belirlenmiştir. Termal bozunma özelliklerinden $NaSO_4$ tuzu kristallenmesine karşı direnci TS EN 12370 (TSE, 2020b)'e göre MgSO4 tuzuna karşı direnci ise TS EN 1367-2 (TSE, 2011)'e göre 10-14 mm çaplı agregalarda belirlenmiştir. Aşınma dirençleri ise TS EN 14157 (TSE, 2017)'e göre hem geniş diskli aşınma yöntemi ile 5x10x10 cm boyutundaki numunelerde hem de böhme

aşınma yöntemi ile 7x7x7 cm boyutundaki küp numunelerde belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan doğal taşların sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2, 3 ve 4' de verilmiştir.

4. Bulgular

4.1 Doğal Taşların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Bir numaralı doğal taş Aliağa (İzmir) yöresine ait siyah renkli bazalttır (Şekil 13, 1A). Bu doğal taş, % 50'e yakın kısmı volkanik cam ve mikrolitlerin oluşturduğu bir matriksden, geri kalanı ise bu matriks içerisinde yer alan plajioklas, piroksen mineralleri ve daha az oranda olivin, amfibol ve opak minerallerinden oluşmuştur. Kayaç, hipokristalin porfiritik dokuya bir dokuya sahiptir (Şekil 13, 1B ve 1C).

İki numaralı doğal taş Karacadağ (Diyarbakır) yöresine ait grimsi siyah renkli bazalttır (Şekil,13, 2A). Bir numaralı bazalt örneğine kıyasla daha az matriks daha çok plajioklas, proksen ve olivin minareli içerir. Kayaç, hipokristalin porfiritik dokuya bir dokuya sahiptir (Şekil 13, 2 B ve 2C).

Üç numaralı doğal taş Bergama (İzmir) yöresine ait gri renkli granittir (Şekil 13, 3A). Plajioklas, feldispat, kuvars biyotit ve anfibol minerallerinden oluşmuştur. Kayaçta holokristalin bir doku hakim mdir (Şekil13, 3B ve 3C).

Dört numaralı doğal taş grimsi kahve renkli, akma yapısı belli olan Muradiye (Manisa) yöresine ait andezittir (Şekil13, 4A). Taş, K-feldispat, kuvars ve plajioklas tanelerinden oluşur ve beraberinde çeşitli boyutlarda küçük biyotit taneleri de içerir. Hipokristalin dokuya sahiptir (Şekil 13, 4B ve 4C).

Beş numaralı doğal taş grimsi beyaz renkli, içerisinde bazalt parçaları bulundurabilen Alaçatı (İzmir) yöresine ait tüftür (Şekil 13, 5A). Kayaç büyük oranda riyolitik lav-cam kırıntıları, bazaltik lav ve pomza kırıntılarından oluşur çok az oranda feldispat-kuvars ve anfibol-proksen içerir. Kırıntılı bir dokuya sahiptir (Şekil 13, 5B ve 5C).

Altı numaralı doğal taş beyazımsı sarı renkli, içerisinde bazalt parçaları bulundurabilen Foça (İzmir) yöresine ait tüftür (Şekil 14, 6A). Kayaç büyük oranda riyolitik lav-cam kırıntıları, bazaltik lav ve pomza kırıntılarından oluşur çok az oranda feldispat-kuvars ve anfibol-proksen içerir. Kırıntılı bir dokuya sahiptir (Şekil 14, 6B ve 6C).

Yedi numaralı doğal taş beyaz renkli Marmara Ada'sı (İstanbul) yöresine ait dolomit/ dolomitik mermerdir (Şekil 14, 7A). Taş büyük oranda ince kristalli domit mineralinden ve az oranda kalsit mineralinden oluşmuştur (Şekil 14, 7B ve 7C). Granoblastik bir dokuya sahiptir.

Sekiz numaralı doğal taş beyaz renkli, siyah damarlı Milas (Muğla) yöresine ait mermerdir (Şekil 14, 8A). Taş tümsele yakın oranda kalsit mineralinden ve

çok az az oranda (% 1-2) kuvars mineralinden oluşmuştur (Şekil 14, 8B ve 8C). Granoblastik bir dokuya sahiptir.

Dokuz numaralı doğal taş yeşilimsi gri renkli, beyaz damarlı Manisa yöresine ait dolomitik kireçtaşıdır (Şekil 14, 9A). Taş büyük oranda kalsit mineralinden ve daha az oranda dolomit mineralinden oluşmuştur (Şekil 14, 9B ve 9C). Tane destekli bir dokuya sahiptir.

10 numaralı doğal taş pembe renkli, Karaburun (İzmir) yöresine ait dolomit/dolomitik kireçtaşıdır (Şekil 14, 10A). Taş büyük oranda kalsit mineralinden ve daha az oranda dolomit mineralinden oluşmuştur (Şekil 14, 10B ve 10C). Tane destekli bir dokuya sahiptir.

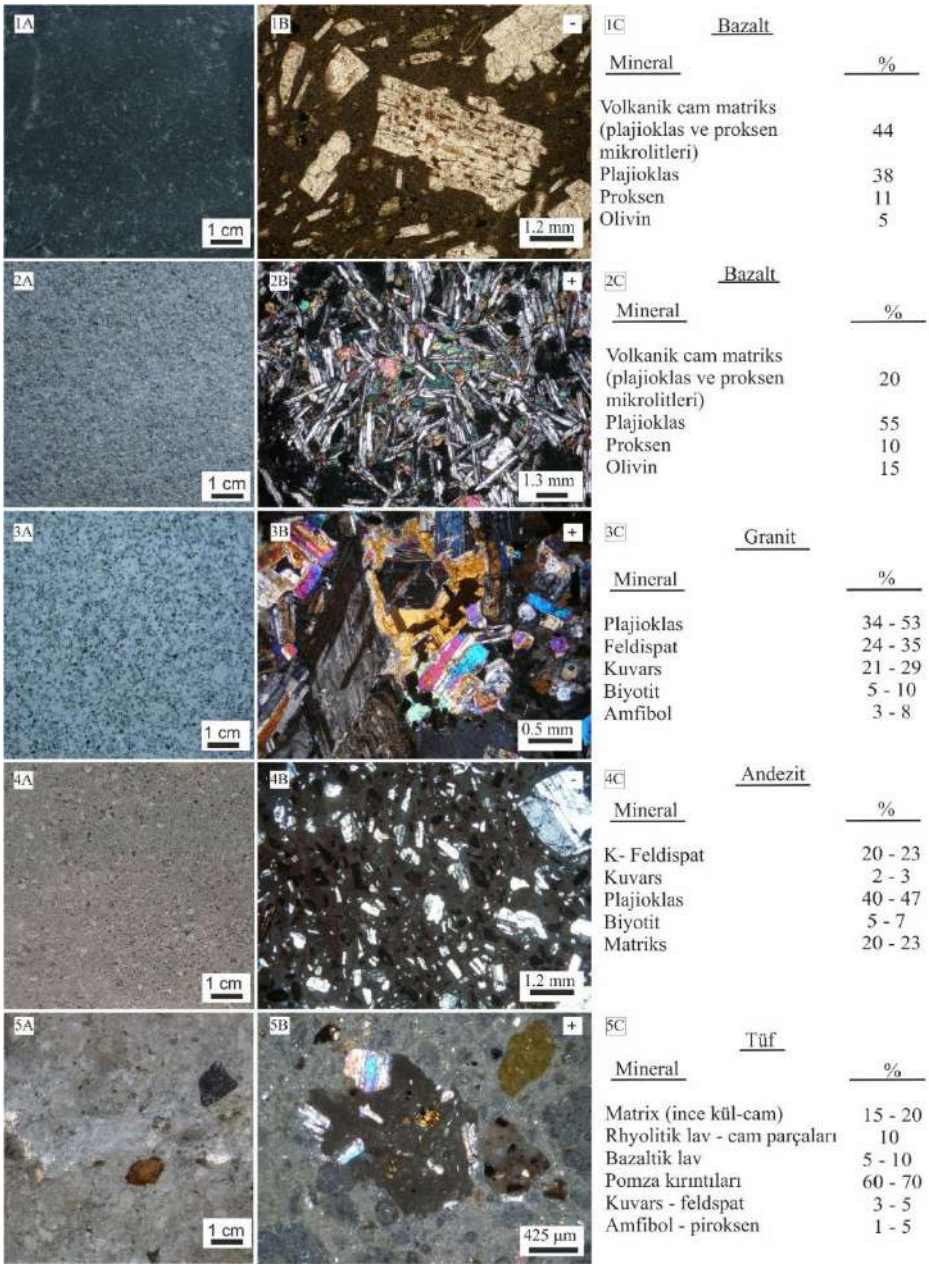
11 numaralı doğal taş gri renkli, fosilli ve Elmalı (Antalya) yöresine ait kireçtaşıdır (Şekil 15, 11A). Taş tümsele yakın oranda kalsit mineralinden ve çok az az oranda (% 1-2) dolomit mineralinden oluşmuştur (Şekil 15, 11B ve 11C). Kayaç homojen olarak "bölümsel mikrit aramadde destekli, bölümsel tane destekli spar kalsit çimentolu" dokuya sahiptir.

12 numaralı doğal taş açık kahve renkli, Kaklık (Denizli) yöresine ait kireçtaşıdır (Şekil 15, 12A). Taş tümsele yakın oranda kalsit mineralinden ve çok az az oranda (% 1-2) kuvars mineralinden oluşmuştur (Şekil 15, 12B ve 12C).

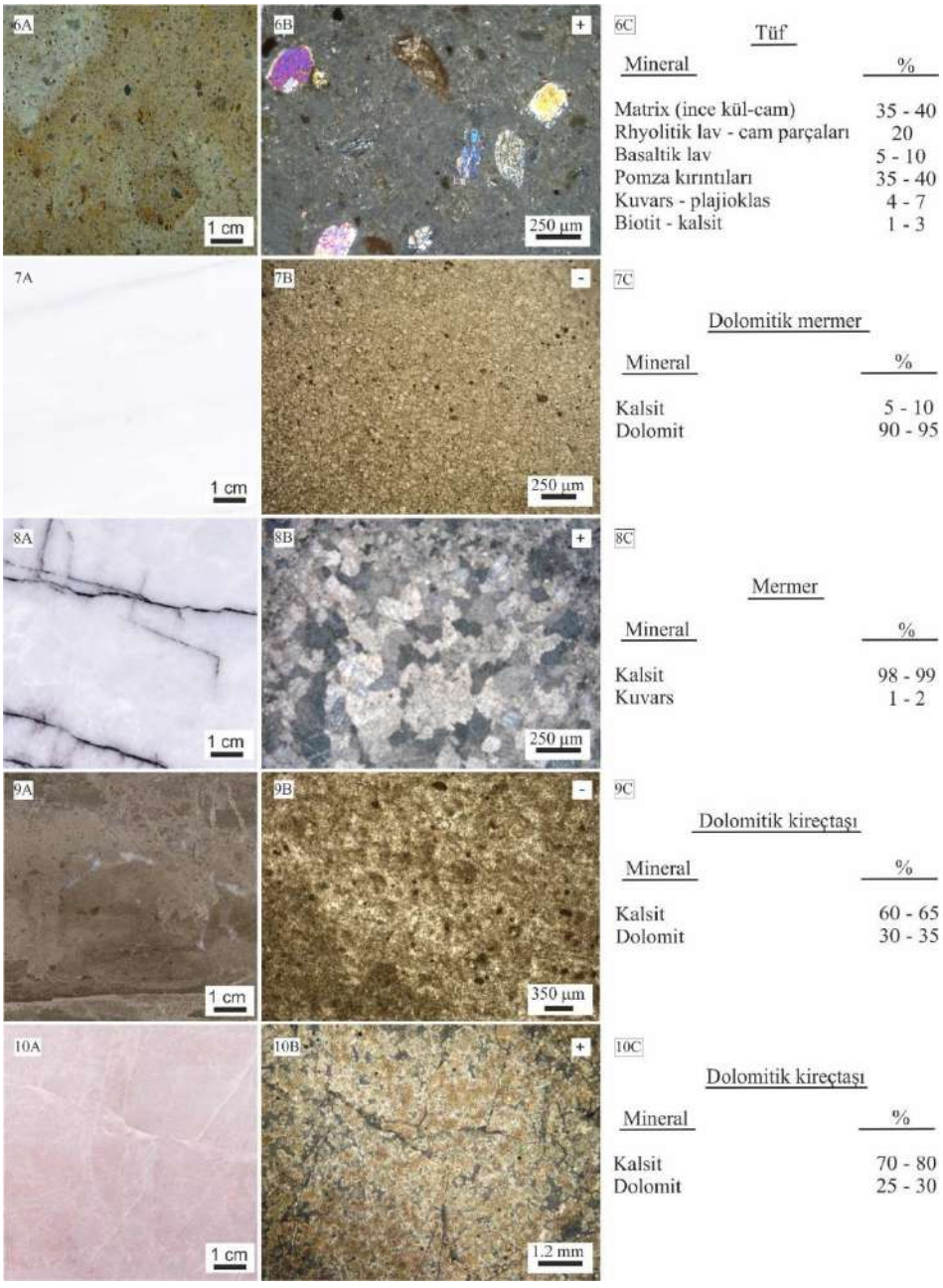
13 numaralı doğal taş gri renkli, fosilli ve Elmalı (Antalya) yöresine ait kireçtaşıdır (Şekil 15, 13A). Taş tümsele yakın oranda kalsit mineralinden ve çok az az oranda (% 1-2) dolomit mineralinden oluşmuştur (Şekil 15, 13B ve 13C). Kayaç homojen olarak "bölümsel mikrit aramadde destekli, bölümsel tane destekli spar kalsit çimentolu" dokuya sahiptir.

14 numaralı doğal taş yer yer kahve renkli bantlı bir görünüme sahip genelde sar renkli, Ordu yöresine ait kumtaşıdır (Şekil 15, 14A). Taş büyük oranda feldispat>kuvars mineralinden oluşur. Kaya kırıntısı % 10'dan azdır (Şekil 15, 14 B ve 14C).

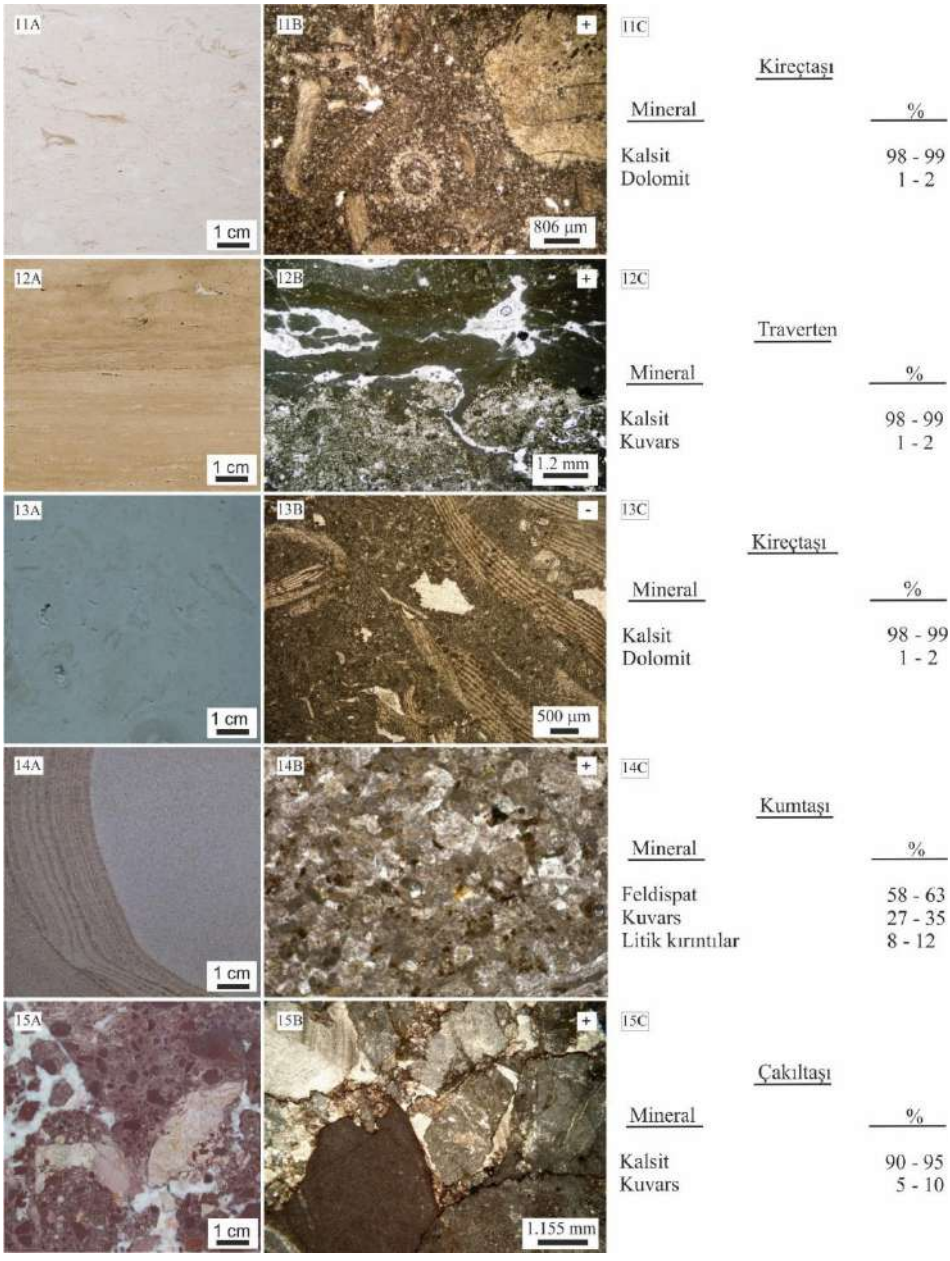
15 numaralı doğal taş kahve, bordo renkli, kırıntılı bir görünüme sahip ve Karaburun (İzmir) yöresine ait çakıltaşıdır (Şekil 15, 15A). Taşın taneleri büyük oranda kireçtaşı, karbonat kırıntılardır n silis/karbonat bir çimento ile bu taneler bağlanmıştır (Şekil 15, 15B ve 15C).



Şekil 13. Doğal taşların modal analizi



Şekil 14. Doğal taşların modal analizi



Şekil 15. Doğal taşların modal analizi

4.2 Doğal Taşların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Çalışmada kullanılan granit, bazalt, andezit, mermer, dolomitik mermer, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, traverten ve çakıltaşı örnekleri düşük su emme değerine sahip normal yoğunlukta kayaçlardır. Bu nedenle bu kayaçlar parçalanmaya, aşınmaya, ve termal bozunmaya karşı dirençli kayaçlardır. Fakat tüf ve gözenekli kireç taşları yüksek su emme değerine sahip, düşük yoğunluklu, parçalanmaya, aşınmaya ve termal bozunmaya karşı oldukça duyarlı kayaçlardır (Tablo 2, 3 ve 4).

Tablo 2. Çalışmada kullanılan doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik		Örnek numaraları				
		1	2	3	4	5
Görünür Yoğunluk (kg/m^3)		2692	2647	2684	2508	1,464
Kütlece Su Emme Oranı (%)		0,074	1,164	0,248	1,376	17,305
Parçalanma Direnci (%)		11,635	25,17	13.48	16,12	49,79
Dona Dayanım Gözle muayene		Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma var
Don Sonu Kütle Kaybı (%)		0,011	0,215	0,016	0,114	28,31
Tuz Krist. Diriencin Tayini		0,179	0,345	0,215	0,377	56,48
Magnezyum Sülfat Deneyi		0,757	2,159	0,875	1,533	61,27
Aşınma Direnci	Geniş Diskli (mm)	12,94	16,87	14,47	17,28	36,38
	Böhme(mm^3/5000	2773	3472	2456	6130	24900

Tablo 3. Çalışmada kullanılan doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik		Örnek numaraları				
		6	7	8	9	10
Görünür Yoğunluk (kg/m^3)		1655	2825	2742	2776	2737
Kütlece Su Emme Oranı (%)		14,942	0,177	0,113	0,384	0,156
Parçalanma Direnci (%)		11.635	23,541	19,401	13,784	16,197
Dona Dayanım Gözle muayene		Dağılma var	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma
Don Sonu Kütle Kaybı (%)		0.351	0,109	0,077	0,014	0,017
Tuz Krist. Diriencin Tayini		12,845	0,512	0,124	0,074	0,098
Magnezyum Sülfat Deneyi		14,742	3,581	0,284	0,128	2,786
Aşınma Direnci	Geniş Diskli (mm)	41,06	19,33	21,66	17,98	17,78
	Böhme(mm^3/5000	26976	12890	19483	7340	7445

Tablo 4. Çalışmada kullanılan doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik		Örnek numaraları				
		11	12	13	14	15
Görünür Yoğunluk (kg/m^3)		2373	2520	2255	2185	2650
Kütlece Su Emme Oranı (%)		7,958	1,179	4,61	6,914	1,571
Parçalanma Direnci (%)		33,14	34,74	38,401	38,985	20,22
Dona Dayanım Gözle muayene		Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma	Dağılma, kopma
Don Sonu Kütle Kaybı (%)		0,257	0,109	0,147	0,374	0,674
Tuz Krist. Diriencin Tayini		0,297	0,485	2,475	1,874	0,368
Magnezyum Sülfat Deneyi		1,254	4,129	10,254	11,475	5,75
Aşınma Direnci	Geniş Diskli (mm)	24,72	21,12	22,71	26,92	19,31
	Böhme(mm^3/5000	34503	19084	19483	40180	14512

5. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan doğal taşlardan beş ve altı numaralı tüfler 11 ve 13 numaralı gözenekli kireçtaşları ve 14 numaralı kumtaşı dışında kalan tüm doğal taşlar aşınma değerleri hariç KTŞ'de aranan limit değerleri karşılar. Granit, bazalt ve andezit gibi magmatik kayaçlar, mermer, dolomitik mermer gibi metomorfik kayaçlar ve kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, traverten ve çakıltaşı gibi tortul kayaçlar düşük su emme değerine sahip aşınmaya, parçalanmaya ve termal bozunmaya karşı dirençli olduklarından dış mekânlarda inşa edilen gabion uygulamaları için oldukça iyi kayaçlardır. Fakat tüf, gözenekli kireçtaşı ve kumtaşları dış mekân gabion uygulamaları için uygun değildir. Bununla birlikte bu tür kayaçlar (tüf, gözenekli kireçtaşı ve kumtaşları) donma-çözülme peridotlarının görülmediği veya çok az görüldüğü yumuşak iklimlerde ve tüm iç mekanlarda tasarlanan gabion uygulamalarında kullanılabilir. Çalışmada kullanılan doğal taşların bazılarının böhme yüzeysel aşınma değerleri KTŞ'deki limit aşınma değerlerini sağlarken geniş diskli aşına değerleri limitin üstündedir. Böhme yüzeysel aşınma deneyinin alternatifi olan geniş diskli aşınma deneyi sonuçları, gabion uygulamalarında kullanılacak kayaçlar için ayırt edici bir ölçüt olduğu söylenemez.

Referanslar

1. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ), 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara .
2. Oganda L. R., 2015. Los Gaviones: análisis, evolución y comportamiento. Propuesta para las envolventes de las escuelas en la Rep. Dom. Universidat Politecnica De Cataluna, Tecnologica de arquietectura lnea de Construccion Arquitectonia-innovacion tecnologica. Master thesis
3. TSE, 2001. TS EN 12370. Doğal Taşlar - Deney Metotları – Tuz Kristallenmesine direncin Tayini, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
4. TSE, 2005. TS EN 14157, Doğal taş - Aşınma direncinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
5. TSE, 2010. TS EN 1936, Doğal taşlar - Deney metotları – Gerçek yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini, , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
6. TSE, 2011. TS EN 1367-2. Agregaların Termal Bozunma Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 2-Mağnezyum Sülfat Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
7. TSE, 2014a. TS EN 13755, Doğal Taşlar - Deney Metotları - Atmosfer Basıncında Su emme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
8. TS 2014b, TS EN 1022-3, Çitler için çelik teller ve tel mamuller-Bölüm 3: İnşaat mühendisliği amaçları için altıgen çelik tel örgüler. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
9. TSE, 2019. TS EN 12407. Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Petrografik inceleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
10. TSE, 2020. TS EN 1097-2. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 2-Parçalanma Direncinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
11. TSE,2009. TS 699, Tabii Yapı Taşları – Muayene ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
12. Uray, E., (2014), Gabion Tipi Dayanma Duvarlarında Tasarım Kriterlerinin Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
13. Uray, E. Ve Tan Ö. (2015), Gabion Tipi Dayanma Yapıları. Türkiye Mühendislik Haberleri. Sayı: 485. S:19-29
14. Url-1. https://tr.abcdef.wiki/wiki/Gabion Erişim Tarihi (E.T) 14.12.2022
15. Url-2. https://www.milanocastello.it/en/edificio-voci/9/97 (E.T 14.12.2022)
16. Url-3. https://maccaferri.com.tr/gabion/ (E.T 15.12.2022)

17. Url-4. https://maccaferri.com.tr/erkenek-tunelinde-terramesh-sistem-duvar-uygulamasi/ (E.T 15.12.2022)
18. Url-5. https://globalsynthetics.com.au/case-study/sunrise-beach-slip-failure-link-gabions/ (E.T 15.12.2022)
19. Url-6.https://maccaferri.com.tr/star-ege-rafinerisi-muteahiitleri-alt-yapi-geoteknik-konusunda-urunlerimizi-ve-sistemlerimizi-tercih-etti/ (E.T 15.12.2022)
20. Url-7. https://maccaferri.com.tr/tanap-projesi-nehir-islahi-ve-erozyon-koruma-icin-gabion-sistem/ (E.T 15.12.2022).
21. Url-8. https://globalsynthetics.com.au/case-study/lake-kepwari-transformed-into-major-tourism-drawcard/ (E.T 15.12.2022).
22. Url-9. http://www.kiciman.com/sayfa/gabion-torba,17.php (E.T 15.12.2022).