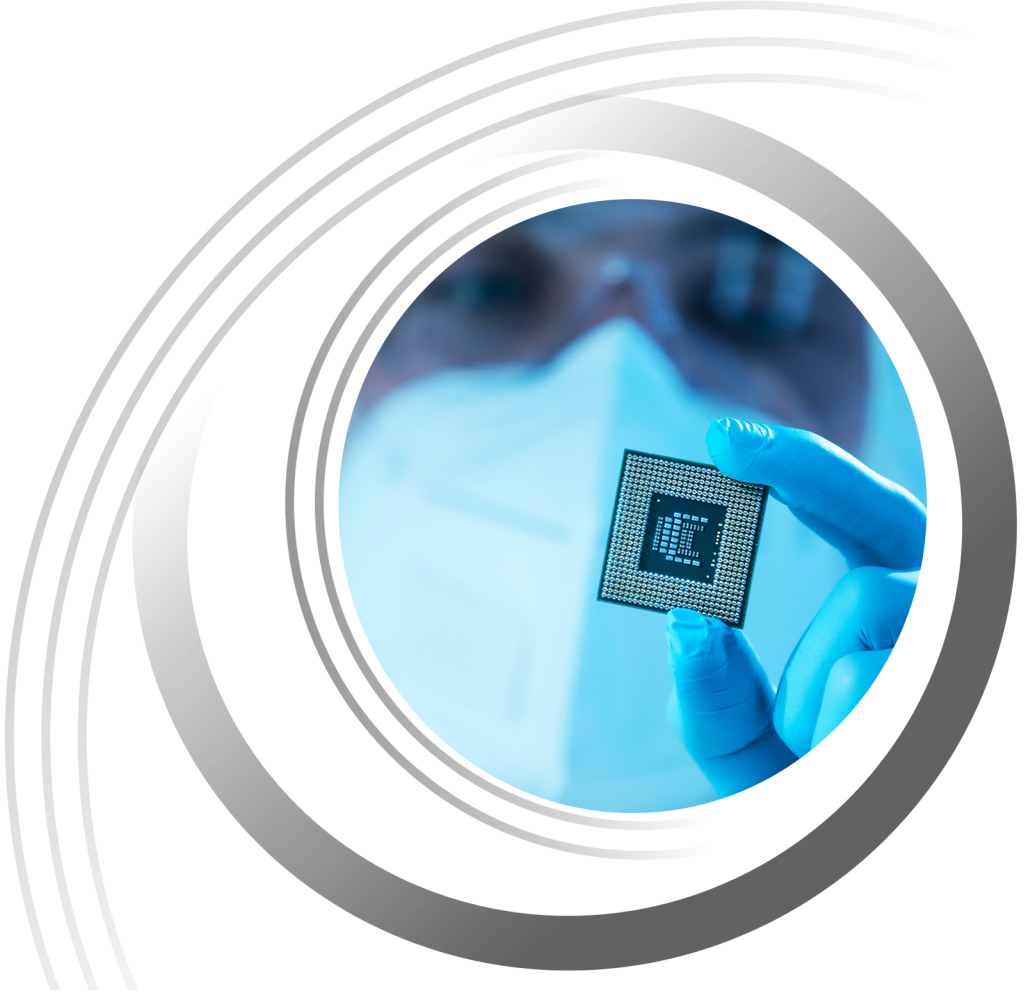




MÜHENDİSLİKTE KURAM, BAĞLAM VE UYGULAMA

Editör: Doç. Dr. Duygu BALPETEK KÜLCÜ



MÜHENDİSLİKTE, KURAM, BAĞLAM VE UYGULAMA

Editör

Doç. Dr. Duygu BALPETEK KÜLCÜ¹

¹ Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü
<https://orcid.org/0000-0001-7108-2654> duygu.balpetek@giresun.edu.tr



Mühendislikte, Kuram, Bağlam ve Uygulama
Editörler: Doç. Dr. Duygu BALPETEK KÜLCÜ

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design
Baskı: Ağustos 2025
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-5698-19-3

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

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir. Yayınevi ve editörler sorumlu tutulamaz.

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm6

Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Biokompozitler ve Kenevir Liflerinin Önemi
Çağlar BULUT, Arife AKIN

2. Bölüm25

Uzaktan Algılama Yöntemleri ile
Bursa Nilüfer Barajı Kuraklık Tespiti ve Analizleri
Berna AKSOY

3. Bölüm.....41

Sağlık Sistemlerinde Yapay Zeka
Beyza GÜNESEN AKANSU

4. Bölüm56

ASTM E92 Standardına Göre Vickers Sertlik Ölçme Deneyinde
Belirsizlik Hesaplamasının İncelenmesi
Bülent AYDEMİR

5. Bölüm80

SLE ile Üretilen Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
Furkan CENGİZ

6. Bölüm96

Yapay Zekâ Destekli Yazılım Testi:
Yöntemler, Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri
Fatih YÜCALAR, Akın ÖZÇİFT

7. Bölüm115

Yapay Zekâ Uygulamalarında MATLAB Kullanımı

Yıldız ATEŞ, Güneş AÇIKGÖZ

8. Bölüm127

Elektrikli Araçlarda Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Fatih OKTAY, Emin EL, Zeki ARGUNHAN

9. Bölüm157

Betonarme Yapı Sistemlerinde Betonun

Malzeme Özelliklerinin Yapısal Performansa Katkısının Değerlendirilmesi

Muhammed ÖZTEMEL

10. Bölüm165

Depreme Dayanıklı Betonarme Yapıların Tasarımında

Perde Duvarların Taşıyıcı Sistem Davranışına Etkisi

Muhammed ÖZTEMEL

11. Bölüm173

Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Yaklaşımı (SUMP)

Perspektifinden Kent İçi Yol Güvenliğine Dair Bir Analiz: İstanbul

Ebru ARIKAN ÖZTÜRK, Nuray MARUL

1. Bölüm

Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Biokompozitler ve Kenevir Liflerinin Önemi

Çağlar BULUT¹, Arife AKIN²

Özet

Günümüzde artan çevresel sorunlar, yapı sektöründe sürdürülebilirlik temelli yaklaşımların gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle inşaat sektörü; doğal kaynakların tüketimi, enerji kullanımı ve sera gazı emisyonları açısından çevresel etkisi yüksek bir endüstri olarak dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, yapı malzemelerinin seçiminde çevresel performans, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü analizleri gibi kriterler giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Sürdürülebilir yapı tasarımı kapsamında, doğal, yenilenebilir ve düşük çevresel etkiye sahip malzemelere yönelik araştırmalar artış göstermektedir. Endüstriyel kenevir (*Cannabis sativa* L.), bu çerçevede hem ekolojik avantajları hem de teknik özellikleri ile alternatif bir yapı malzemesi olarak dikkat çekmektedir. Özellikle kenevir liflerinin yüksek ısı ve nem dengeleme kapasitesi, yangın dayanımı ve biyolojik bozunabilirlik gibi nitelikleri, bu malzemeyi yalıtım ve dolgu sistemlerinde kullanıma uygun hale getirmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, kenevir esaslı yapı malzemelerinin sürdürülebilirlik bağlamında potansiyelini incelemek ve bu malzemelerin enerji verimliliği, çevresel etkiler ve teknik performans açısından değerlendirilmesine katkı sunmaktır. Bu doğrultuda, hem literatür taramasına dayalı teorik bir çerçeve sunulmakta hem de kenevir temelli malzemelerin yapı fiziki kapsamında test edilen performans verileri ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, biokompozitler, kenevir

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
e-mail: caglarbulut11@gmail.com, Orcid ID: 0009-0000-2692-7611

² Doç. Dr. Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
e-mail: aakin@ktun.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-8062-2891

1. Sürdürülebilirlik

Sanayi devrimi ve dünyada nüfusun kontrolsüz bir şekilde artışı doğal kaynaklarımızın hızla azalması ile birlikte sürdürülebilirlik ön plana çıkmıştır. Günümüzde kentleşme, nüfus artışı ve teknolojik gelişmelerin, çevresel sorunlar ile enerji kaynaklarının tükenmesine yol açtığı bilimsel verilere göre kabul edilen bir olgudur. Özellikle inşaat sektörü, doğal kaynakları yoğun biçimde tüketerek ekolojik dengeyi bozmakta ve çevresel sağlık koşullarını olumsuz yönde etkilemektedir (Gültekin, 2006). İnşaat sektörü, küresel düzeyde toplam enerji tüketiminin yaklaşık %50'sini ve tatlı su kaynaklarının %42'sini kullanmaktadır. Ayrıca, sektöre bağlı faaliyetler sera gazı emisyonlarının %50'sinden, su kirliliği yükünün %40'ından, atmosferik kirleticilerin %24'ünden ve ozon tabakasına zarar veren CFC(Kloroflorokarbon) ve HCFC (Hidrokloroflorokarbon) emisyonlarının %50'sinden sorumludur (Erten, 2009).

Dünya genelinde enerji tüketiminin yaklaşık %90'ı, Türkiye özelinde ise %75'i, başlıca kömür, petrol ve doğal gazdan oluşan fosil yakıt temelli enerji kaynaklarından karşılanmaktadır (Esin, 2007).

Fosil yakıtların kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan sera gazları, güneş ışınlarının atmosferde daha uzun süre hapsolmasına yol açmakta ve bu durum ise küresel ısınma sürecini tetiklemektedir.

Küresel ısınmanın olası kritik sonuçları arasında kuraklık, sel ve orman yangınları gibi olaylar yer almakta olup bu fenomenler çevresel sağlığı ve güvenliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Dolayısıyla tüm ekosistemlerin sürdürülebilirliğini riske atmaktadır. Son dönemde binaların ısıtma, soğutma ve havalandırma maliyetlerindeki artış ile daha önce de vurgulanan fosil kaynakların sebep olduğu çevresel sorunlar, yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarının kullanımını hem zorunlu kılmakta hem de bu kaynakların öncelikli hale gelmesini sağlamaktadır.

Çevresel bozulmaların önlenmesi ve yaşam alanlarının korunması amacıyla Dünya Doğayı Koruma Vakfı (WWF), devletleri aşırı karbondioksit(CO₂) emisyonlarını azaltacak stratejik müdahalelerde bulunmaları konusunda uyarı yapmaktadır. Bu bağlamda, ülkeler enerji politikalarını yeniden şekillendirerek, yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarının araştırılmasını ve kullanılmasını teşvik etmeye yönelik girişimlere yönelmektedir. Bu sebeple, inşaat sektöründe yenilenemeyen doğal kaynakların aşırı tüketiminin olumsuz etkilerinin önüne geçilmesi için sürdürülebilirlik ilkelerinin, mimarlık disiplini içerisinde önemli bir referans noktası haline geldiği kabul edilir (Dikmen & Gültekin, 2011).

Sürdürülebilirlik, gelecek kuşaklara yeterli doğal kaynaklar ve sağlıklı yaşam ortamları sağlamayı amaçlayan, doğal kaynakların dikkatli ve etkin bir

şekilde kullanılmasını gerektiren temel bir prensiptir (Strong & Bartelmus, 2002). Bu doğrultuda, yapı çevrenin başlıca tasarımcıları olan mimarlardan, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek enerji verimliliği sağlayan tasarımlar geliştirmeleri beklenmektedir.

Çevresel sorunların etkili bir şekilde ele alınabilmesi için, binalarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden enerji verimliliği kriterlerinin belirlenmesi ve konuya disiplinlerarası bir perspektifle yaklaşılması büyük önem arz etmektedir.

Biyolojik enerji, su, güneş ve rüzgar enerjisi gibi çevreye zarar vermeyen, sürdürülebilir ve temin edilmesi kolay yenilenebilir enerji kaynakları, binalarda çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye’de üniversiteler ve ilgili araştırma kurumları tarafından güneş enerjisiyle çalışan evler gibi yenilikçi projeler uygulanmaktadır. Ancak, bu tür projelerin sayısının artırılması ve güneş enerjisinin binalarda yaygın kullanımının sağlanması kritik bir gereklilik arz eder (Dikmen & Gültekin, 2011).

Dünya genelinde enerji ve hammadde tüketiminin yaklaşık %40’ını gerçekleştiren inşaat sektörü, bu yoğun kaynak kullanımı nedeniyle sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi ve kullanımını çevresel sorunların azaltılması ve gelecek kuşakların kaynak güvenliğini koruma açısından son derece önemli bir görev üstlenmektedir. Enerji verimliliği açısından kritik bir işlev üstlenen yalıtım malzemeleri ise, çoğunlukla ekolojik yeterlilikten yoksun olup çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini tam anlamıyla karşılamamaktadır (Dikmen & Gültekin, 2011).

Son dönemde teknolojik gelişmelerin hız kazanması ve ekolojik hassasiyetin artmasıyla birlikte, yalıtım malzemeleri hem performans hem de çevresel etki açısından daha bütüncül nitelikler kazanmıştır.

Enerji etkin yapı tasarımı kapsamında, çevreyle uyumlu malzeme ve uygulama tekniklerinin entegrasyonu sayesinde, kendi enerji ihtiyacını karşılayabilen, dolayısıyla enerji tüketimini minimize eden yapılar ön plana çıkmaktadır. Bu çerçevede, söz konusu yalıtım malzemeleri yalnızca ısı, ses ve yangın yalıtımı sağlamakla kalmayıp; aynı zamanda insan sağlığına zarar vermeyen, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve mekânsal enerji kazancını optimize eden yapı elemanları olarak gelişim göstermektedir (Ayçam et al., 2010).

Düşük özgül üretim enerjisine sahip ve çevresel sürdürülebilirlik kriterleriyle uyumlu organik temelli yalıtım malzemeleri, günümüz yapı teknolojilerindeki dönüşüm sürecinde öne çıkan örneklerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, organik yapı malzemeleri içerisinde yer alan kenevir bitkisi, yalıtım amaçlı kullanım potansiyeli ve çevresel avantajları nedeniyle dikkate değer bir

konuma sahiptir. Doğal yapı malzemeleri arasında sınıflandırılan kenevirin, sürdürülebilir yapı tasarımı ve enerji etkinlik performansı bağlamında önemli katkılar sunduğu bilinmektedir. Bu çalışma, özellikle kenevirin ısı yalıtım malzemesi olarak yapı sektöründe kullanılabilirliğine odaklanmakta, konuya ilişkin literatür doğrultusunda kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan taş yünü ve polistiren gibi yalıtım malzemeleri, yüksek karbon ayak izleri ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından önemli eleştiriler almaktadır. Bu bağlamda, düşük somutlaştırılmış enerjiye sahip alternatif yalıtım malzemeleri, çevresel etkilerin azaltılması ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda daha verimli bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Yapı malzemeleri üretiminde saman kökenli yarı mamul ürünlerin (lif ve talaş) kullanımı, somutlaştırılmış enerji seviyelerini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Gültekin, 2006).

Geçmişte, bitki gövdelerinden elde edilen lifler genellikle atık olarak kabul edilmiş ve homojen olmayan yapıları, toz ve partikül kalıntıları nedeniyle düşük kalite olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu tür atıkların yüksek higroskopik özellikleri nedeniyle özellikle hayvancılık sektöründe hijyen iyileştirmesi amacıyla yataklık malzemesi olarak kullanıldıkları gözlemlenmiştir (Kosiński et al., 2022).

1980'lerden itibaren, kenevir talaşlarının inşaat sektöründe hafif agrega olarak kullanılmaya başlanması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Allin, 2005). Bu amaçla, talaşların tozdan ve bitki kalıntılarından arındırılması, su ve bağlayıcı gereksinimlerini minimum seviyeye indirirken, aynı zamanda homojen ve kısa lif fraksiyonlarının kullanımı önerilmektedir.

Bunların yanı sıra, uygun dane dağılımına sahip talaş karışımları, ahşap karkas yapılarında gevşek yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Bu tür yalıtım malzemelerinin verimliliği, termal iletkenlik, hava geçirgenliği ve rüzgar etkisi gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermekte olup bu etkenlerin etkinliği, keten lifi ile yapılan testlerde doğrulanmıştır (Brzyski et al., 2021).

2. Biyokompozit Malzemeler ve Kenevir Liflerinin Önemi

Cam-epoksi esaslı kompozit malzemeler, 1950'li yıllardan itibaren başta savunma sanayi olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarında geleneksel malzemelerin yerini alarak kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllarda kompozit yapıların mekanik özelliklerine ilişkin teorik çalışmaların gelişmesiyle birlikte, epoksi-bor, grafit/epoksi ve aramid takviyeli kompozit sistemler yapı sektöründe daha yaygın hale gelmiştir. Ancak bu malzemelerin üretiminde

kullanılan geleneksel ve maliyetli yöntemler, 1980’li yılların sonlarına doğru verimlilik ve çevresel etki açısından eleştirilmeye başlanmıştır.

Bu süreçte enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve pres kalıplama gibi modern üretim tekniklerine yönelim artmış, aynı zamanda, hızla artan küresel nüfusun 2060 yılına kadar malzeme talebini iki katına çıkaracağı öngörüsü, çevresel sürdürülebilirliği sağlama gerekliliğini gündeme getirmiştir. Bu çerçevede, yenilenebilir kaynaklara dayalı, çevre dostu ve düşük karbon ayak izine sahip biyo-bazlı kompozit malzemeler ön plana çıkmıştır.

Kenevir bitkisi, gıda, tekstil, ilaç ve kağıt gibi birçok alanda kullanılabilmesinin yanı sıra, liflerinin yüksek dayanımı sayesinde biyokompozit üretimi için de önemli bir ham madde kaynağıdır. Ancak kenevir liflerinin hidrofilik yapısı, yüksek nem tutma kapasitesi ve bu nedenle değişken mekanik ve fiziksel özellikleri, malzemenin performansında tutarsızlıklara yol açmaktadır. Lifin özellikleri; bitki anatomisi, yetiştirme koşulları, elyaf işleme teknikleri ve deneysel prosedürlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu durum, malzeme davranışının öngörülemezliğini artırmakta ve mühendislik uygulamaları açısından risk oluşturmaktadır.

Söz konusu sınırlılıkların aşılması amacıyla, kenevir lifleri termal işlem, petrol bazlı katkılarla harmanlama ve biyolojik dolgu maddeleri ilavesi gibi çeşitli yöntemlerle modifiye edilebilmektedir. Bu tür katkı ve işlemler, biyokompozitlerin mekanik, termal ve fiziksel performanslarını optimize etmede önemli rol oynamaktadır (Kaur & Kander, 2023).

2.1. Yeşil Biyo-Kompozitlerin Gelişimi ve Sınıflandırılması

Fosil yakıtlara dayalı polimerlerin çevresel etkilerinin artan kaygıları, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Yeşil biyo-kompozitler, bir veya daha fazla bileşeni doğal ya da yenilenebilir kaynaklardan türetilen kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Literatürde, biyo-kompozitler genellikle üç ana kategoriye ayrılmaktadır: (i) doğal elyaf takviyeli petrol bazlı polimerler, (ii) biyopolimer matrisli sentetik elyaflar (örneğin cam veya karbon elyafları), (iii) hem matris hem de takviye elyafının yenilenebilir kaynaklardan elde edildiği doğal elyaf takviyeli biyopolimerler. Bu kategoriler arasında, çevresel sürdürülebilirlik açısından en yüksek potansiyele sahip olan üçüncü grup, "tam anlamıyla biyolojik olarak çözünebilen yeşil kompozitler" olarak adlandırılmakta ve çevre dostu tasarım anlayışının geleceği için kritik bir rol oynamaktadır.

Biyobozunur biyo-kompozitler, biyobazlı veya petrol bazlı hammaddeler kullanılarak üretilmekte, polimer matrislerinin çevre dostu karakteri ve doğal elyaf içeriği ile düşük çevresel etki ve karbon ayak izi sağlamakta önemli

avantajlar sunmaktadır. Bu özellikler, yeşil biyo-kompozitleri çevre dostu ürün tasarımı ve sürdürülebilir yapı malzemeleri alanlarında güçlü bir alternatif olarak konumlandırmaktadır (Kaur & Kander, 2023).

2.2. Biyo-Kompozitlerin Gelişiminde Belirleyici İtici Güçler

Son yıllarda, küresel çevresel farkındalık ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik uluslararası çabalar, yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve çevresel etkileri minimize edilmiş malzemelere olan talebin artmasına neden olmuştur. Biyo-kompozitlerin gelişimi, yaşam döngüsü analizine dayalı çevresel değerlendirme metodolojilerinin merkezi bir rol oynadığı bir evreye girmiştir. Yaşam döngüsü perspektifi, üretimden nihai bertarafta kadar her aşamada çevresel sürdürülebilirliği sağlamayı hedeflemekte ve malzemenin tüm süreçlerde çevresel etkiyi minimize etmeye yönelik çözümler geliştirmektedir.

Sanayi kuruluşları, artan tüketici talepleri, sıkılaştıran yasal düzenlemeler ve medyanın kamuoyu üzerindeki etkisiyle geleneksel malzeme sistemlerinden daha çevre dostu alternatiflere yönelme baskısı altındadır. Özellikle plastik sektörü, biyoplastik bazlı ürün geliştirme süreçlerine hız kazandırarak sürdürülebilir ambalaj çözümleri için yatırımlarını artırmıştır (Raihan & Bijoy, 2023).

2.3. Makro Ölçekte Biyo-Kompozitler ve Uygulama Alanları

Biyo-kompozitler, doğal liflerin (sisal, kenevir, kenaf, hindistan cevizi lifi, jüt, keten gibi) polimer bazlı matrislere takviye olarak dahil edilmesiyle üretilen malzemelerdir. Küresel ölçekte çevresel sürdürülebilirlik ve doğal kaynakların verimli kullanımı üzerine artan farkındalık, bu tür malzemelerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Doğal lif takviyeli kompozitler (NFC'ler), geleneksel cam ve karbon takviyeli polimer kompozitlerine etkili bir alternatif olarak kabul edilmekte, mühendislik uygulamalarındaki performansı ise kullanılan bileşenlerin özellikleri ve uyumluluğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Biyo-lif içeren kompozitlerin tasarımına yönelik yapılan çalışmalar, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, uyumluluğu artıran modifikasyonlar ve üretim süreçleri üzerine yoğunlaşmaktadır (Enarevba & Haapala, 2024).

2.4. Yeşil Biyo-Kompozitlerin Geliştirilmesindeki Engeller

Yeşil biyo-kompozitlerin geliştirilmesindeki başlıca zorluklar, doğal liflerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki yüksek değişkenlikten kaynaklanmaktadır. Bitkinin büyüme koşulları, olgunluk durumu ve işleme yöntemleri gibi faktörler, doğal liflerin özelliklerini etkileyebilmekte ve sentetik liflerle

karşılaştırıldığında belirgin performans farklılıklarına yol açmaktadır. Ayrıca, doğal liflerin hidrofilik yapısı, bu materyallerin su emme özellikleriyle birlikte, kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ancak, yüzey modifikasyonları ve kimyasal bağlayıcı maddeler, bu sorunların üstesinden gelinmesine olanak tanımaktadır (Kaur & Kander, 2023).

2.5. Biyokompozit Malzemelerin Mevcut Durumu, Potansiyeli ve Yapısal Sınırlılıkları

Doğal elyaf takviyeli plastik kompozitlerin 20. yüzyılın başlarında geliştirilmesinden bu yana, yenilenebilir kaynaklara dayalı biyobazlı malzemelere yönelik küresel talep istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Başlangıçta, fosil kaynaklı polimerlerin düşük maliyetleri biyobazlı polimerlerin endüstriyel ölçekte benimsenmesini sınırlamışsa da; artan çevresel farkındalık, fosil yakıt rezervlerinin tükenme riski ve biyoteknolojik ilerlemeler bu malzemelerin gelişimini yeniden gündeme taşımıştır. Nitekim, biyoplastik endüstrisinin ekonomik hacminin yakın gelecekte milyarlarca doları aşacağı öngörülmektedir.

Kompozit malzemelerin; yüksek özgül dayanımı, geliştirilmiş sertlik, üstün aşınma direnci ve metalik malzemelerle sağlanması, ekonomik olarak güç olan özgün fiziksel özellikler sunması onları ileri mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez kılmaktadır. Bu bağlamda, biyokompozitler - özellikle lignoselülozik kökenli doğal lifler ile güçlendirilmiş polimer sistemleri - çevre dostu ve sürdürülebilir alternatifler olarak ön plana çıkmaktadır.

Bununla birlikte, biyokompozitlerin yaygınlaşmasının önünde bazı yapısal ve teknik engeller bulunmaktadır. Lif özelliklerindeki doğasından kaynaklanan heterojenlik, yüksek higroskopisite, düşük termal kararlılık, üretim süreçlerinin endüstriyel ölçeğe uyarlanmasındaki güçlükler ve istikrarsız performans çıktıları, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki güvenilirliğini sınırlandırmaktadır. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük bir bölümü yalnızca mekanik performansa odaklanmakta; elektriksel, termal ve akustik davranış gibi diğer temel mühendislik parametreleri yeterince derinlemesine incelenmemektedir. Bu durum, hem fonksiyonel sınırlamaları hem de çok işlevli biyokompozit tasarımlarının önündeki bilgi eksikliklerini ortaya koymaktadır.

Özellikle kenaf, jüt, sisal, rami, roselle ve kenevir gibi doğal lifler, çekme mukavemeti açısından geniş bir aralıkta performans sunmakta; otomotiv endüstrisinden yapı sektörüne, protez teknolojilerinden gürültü kontrol sistemlerine kadar birçok alanda potansiyel uygulamalara olanak tanımaktadır. Örneğin, jüt ve kenevir liflerinin yalnızca dayanım özellikleri değil, aynı zamanda akustik performansları da dikkate değer niteliktedir. Bununla birlikte,

biyobazlı kompozit sistemlerin pazarda öngörüldüğü ölçüde yer bulamamasının ardındaki temel nedenlerden biri, hâlâ çözülmeyi bekleyen bilimsel belirsizlikler ve standartlaşmamış üretim süreçleridir.

Sonuç olarak, biyokompozitlerin mühendislik tasarımlarında güvenle kullanılabilmesi için sadece mekanik değil, çok disiplinli parametreleri dikkate alan bütüncül karakterizasyon yaklaşımlarına, deneysel çalışmalarla desteklenmiş matematiksel modellemelere ve ölçeklenebilir üretim teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Raihan & Bijoy, 2023).

2.6. Biyokompozit Sistemlerde Biyolojik Dolguların Fonksiyonu ve Malzeme Performansına Etkileri

Biyolojik kaynaklı dolgu maddeleri, sürdürülebilir malzeme geliştirme stratejilerinin temel bileşenlerinden biri olarak, polimer matrisli kompozitlerde yalnızca çevresel avantajlar sağlamakla kalmayıp aynı zamanda yapısal performansı da doğrudan etkilemektedir. Biyobazlı polimerler (örn. PLA, PHA'lar, biyo-PBS, epoksilenmiş bitkisel yağlar) ve biyolojik olarak parçalanabilir petrol türevli polimerlerle (örn. PCL, PBS, PBAT) uyumlu şekilde işlev gören bu dolgu sistemleri, nem tutma eğilimi, hidrofilitiklik, mekanik dengesizlik ve düşük termal kararlılık gibi bitki bazlı takviyelerin doğasında bulunan sınırlılıkların giderilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Bitkisel kökenli biyodolgular; toz, granül, kısa veya sürekli lif formunda polimer matrislere entegre edilmekte ve bu sayede kompozit sistemlerin çekme mukavemeti, ıslanabilirlik, termal direnç, elektriksel iletkenlik ve yangına dayanıklılık gibi çok boyutlu özellikleri üzerinde belirleyici etkiler göstermektedir. Literatürdeki deneysel çalışmalar, kenevir gibi lignoselülozik materyallerin biyokömür formuna dönüştürülerek süperkapasitörler, iletken kompozitler ve yapısal uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir. Örneğin, kenevir bazlı biyokarbon ile üretilen kompozitlerin 160 F/g spesifik kapasitans ve 21 kW/kg güç yoğunluğu gibi üstün elektroaktif özellikler sergilediği rapor edilmiştir.

Benzer biçimde, kahve atığı kaynaklı biyokömürün epoksi matris sistemlerine katkısı, karbon siyahı kadar yüksek performans göstermese de, dolgusuz sistemlere kıyasla anlamlı bir iletkenlik artışı sağlamıştır. Polivinil alkol bazlı biyokompozitlerde biyokömür katkısının cam geçiş sıcaklığının altındaki mekanik dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiş, ancak bu tür dolgu maddelerinin karbon nanotüpler ve grafen gibi iletken nanomalzemelere alternatif olabileceği ileri sürülmüştür.

Organik dolgu maddelerinin kompozit davranışa etkisi yalnızca elektriksel veya termal performansla sınırlı değildir. Örneğin, ceviz ve hindistan cevizi

kabukları gibi tarımsal atık kaynaklı dolgulardan elde edilen hibrit sistemlerin, su emme oranı düşük, eğilme ve çekme dayanımı ise yüksek olduğu; dolayısıyla ıslak ortam koşullarında dahi mekanik kararlılığını koruduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, agrega boyutunda kenevir eklenmiş hempcrete örneklerinde özgül ısı kapasitesinin 1365–1508 J/kg·K aralığında olduğu, bu malzemenin yapı sektöründe iç dolgu olarak termal ve higroskopik denge sağlama potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir (Kaur & Kander, 2023).

Bu bulgular doğrultusunda, biyolojik dolgu maddelerinin kompozit sistemlerde kullanımı yalnızca çevre dostu bir alternatif sunmakla kalmamakta, aynı zamanda çok yönlü performans kriterlerini iyileştirerek ileri malzeme mühendisliğine katkı sağlamaktadır.

2.7. Elyafın Biyokompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

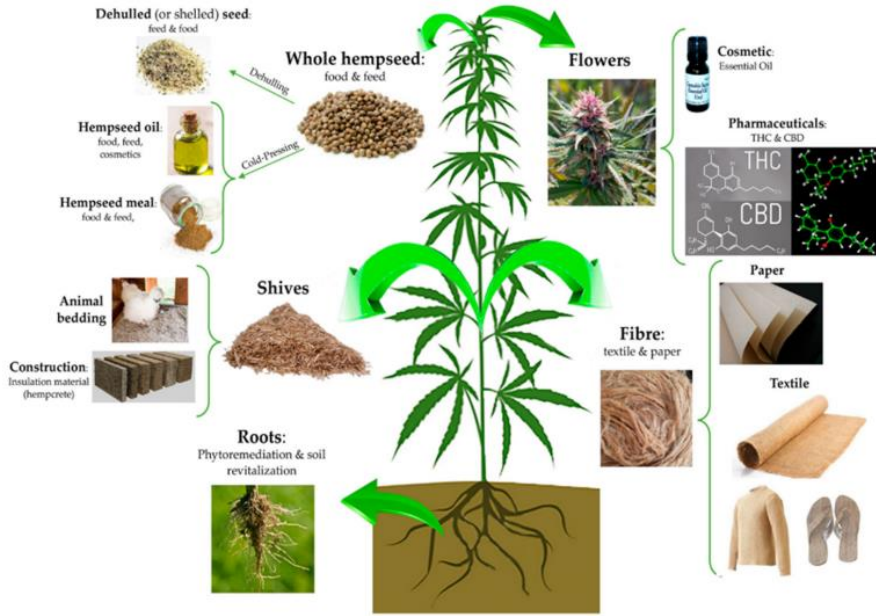
Kompozit malzemelerin mekanik, termal ve fiziksel özellikleri, kullanılan matris ve takviye elyaflarının türü, boyutu, yönelimi ve özelliklerine bağlı olarak şekillenmektedir. Özellikle kenevir gibi doğal elyaflar, farklı fiziksel özellikler (örneğin en-boy oranları), mekanik, termal ve kimyasal özelliklere sahiptir. Elyaf takviyeli kompozitlerin performansı, elyafların hizalanması ve boyutlarıyla doğrudan ilişkilidir. Elyaflar, yük yönünde hizalanarak taşıyabilecekleri yük miktarını artırır ve bu, kompozit malzemenin ana gerilim yönündeki çekme mukavemetine ve sertliğine katkı sağlar. Ancak, elyaf hizalamasındaki değişiklik, yalnızca mukavemeti ve sertliği değil, aynı zamanda malzemenin darbe tokluğu ve kayma modülünü de etkileyebilir.

Kısa elyaflarla yapılan kompozitlerde, gerilim dağılımı elyaf uçlarında yoğunlaşarak kompozitin zayıflamasına neden olabilir. Bununla birlikte, kısa elyafların düzgün hizalanması ve yeterli uzunlukta olması durumunda, matris ile iyi bir bağlanma sağlanarak sürekli elyaf kompozitlere benzer mekanik özellikler elde edilebilir. Ayrıca, kısa elyaf kompozitlerinin üretim süreçlerinde sağladığı esneklik, karmaşık şekillerin üretimine olanak tanır ve üretim maliyetleri ile zaman açısından avantajlar sunar.

Elyaf uzunluğu, hizalanması ve matris malzemelerinin özellikleri, kompozitlerin performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Elyaf ve matrisin çekme davranışına dayalı olarak malzeme tasarımı yapılırken, termal özellikler, üretim maliyetleri, ürün yoğunluğu ve termal döngüler sırasında iç gerilimler gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu unsurlar, biyokompozit malzemelerin sınıflandırılması ve karakterizasyonu açısından kritik öneme sahiptir (Al-Oqla & Omari, 2017).

2.8. Biyokompozit Malzemeler ve Kenevir Liflerinin Yapı Sektöründeki Kullanımı

Küresel ölçekte sürdürülebilir yapı malzemelerine olan ilginin artması, doğal kaynaklı hammaddelerin yapı endüstrisinde kullanımını ön plana çıkarmıştır. Bu bağlamda, kenevir bitkisinden elde edilen lifler ve kenevir esaslı biyokompozitler, çevresel sürdürülebilirlik, düşük karbon salınımı ve enerji verimliliği gibi faktörler açısından dikkate değer alternatifler sunmaktadır. Kenevir bitkisinin morfolojik yapısı ve potansiyel kullanım alanlarına dair genel bir fikir vermesi amacıyla Şekil 1’de temsili bir görsel yer almaktadır.



Şekil 1. Endüstriyel kenevir bitkisinin çeşitli kullanım alanları (Farinon et al., 2020).

Güncel çalışmalarda, doğal lif takviyeli bağlayıcı sistemlere ve doğal reçinelere dayalı biyokompozit malzemelere yönelik ilgi artmıştır. Bu tür lignoselülozik yapıdaki biyokompozitlerin başlıca avantajları; biyobozunurluk, yüksek mekanik performans, düşük özgül ağırlık, doğal kökenli olmaları ve ekonomik üretim maliyetleridir. Bu özellikleri sayesinde yalnızca yapı sektöründe değil, aynı zamanda otomotiv, havacılık ve raylı sistemler gibi çeşitli endüstriyel alanlarda da kullanım alanı bulmaktadırlar (Brzyski & Fic, 2017).

Bu malzemelerin düşük üretim maliyeti, yüksek termoizolasyon ve havalandırma performansı, uzun ömürlü yapısal dayanıklılığı ve biyolojik zararlılara karşı doğal direnci; onları çevre dostu, sağlıklı ve ekonomik yapı

çözümleri arayan sektör paydaşları için cazip kılmaktadır. Ayrıca buhar geçirgenliği, antialerjik özellikleri ve düşük ısı iletkenlik değerleri, kenevir bazlı yapı ürünlerini ekolojik mimari yaklaşımlar için uygun hale getirmektedir. Kenevir liflerinin inşaat sektöründeki artan kullanımı, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasına değil, aynı zamanda yapı fiziki ve iç mekân konforunun iyileştirilmesine de önemli katkılar sunmaktadır (Rytko-Polak et al., 2022).

3. Biyokompozit Malzemeler ve Kenevirin Akustik Özellikleri

Biyokompozit malzemelerin akustik performansı, kullanılan bitki bazlı bileşenlerin matrislerdeki biyodolgu içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Bu bileşenlerin eklenmesi, ses emilim kapasitesini artırıcı bir etki yapmaktadır. Yapılan çalışmalar, kenevirin yüksek gözenekliliği sayesinde, ses sönümleme ve emilim oranlarında belirgin iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur.

(Guo, 2016) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, kenevir miktarındaki artışın, kompozit malzemelerin ses emilim kapasitesini artırdığı ve bunun sonucunda malzemenin akustik özelliklerinin iyileştiği bulunmuştur.

Doğal liflerin, biyokompozitlerdeki ses emilim özelliklerini iyileştirebildiğini gösteren örnek bir çalışma, kabak lifi üzerine (Koruk & Genç, 2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. Polilaktik asit (PLA) esaslı kompozit malzemelerin akustik özellikleri ise (Yao et al., 2016) ile (Ghaffari Mosanenzadeh et al., 2014) tarafından incelenmiştir.

Bununla birlikte, kenevir, keten, kayın, çam ve kolza samanı gibi lignoselülozik hammaddeler, (Markiewicz et al., 2012) tarafından ses emici biyokompozitlerin üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca, mısır koçanı, ayçiçeği sapı ve koyun yünü gibi tarımsal ve hayvansal kaynaklı malzemeler (Oancea et al., 2018) tarafından; kenevir ve kenaf lifleri ise (Büyükcakıncı et al., 2011) tarafından incelenmiştir.

Bu çalışmaların ortak noktası, doğal takviye elemanlarının genellikle plastik esaslı matrislerle birleştirilerek kompozit formda ses emici yapıların oluşturulmuş olmasıdır. Elde edilen sonuçlar, biyobazlı malzemelerin sürdürülebilir ve çevre dostu ses yalıtım çözümleri için önemli bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmalarda, kenevir, pirinç samanı ve çam ağacı gibi bitki bazlı takviyeler ile güçlendirilmiş biyokompozitlerin akustik özellikleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, lif takviyesi oranının artmasının, malzemenin ses emilimini ve dolayısıyla akustik performansını artırdığını göstermektedir.

Özellikle kenevir bazlı kompozitlerin akustik performansı, lif çapı, malzeme kalınlığı, yoğunluk ve hava boşluğu gibi parametrelere bağlı olarak değişim göstermektedir. (Hui & Fan, 2009) tarafından yapılan bir çalışmada, kenevir lifli

malzemelerin kalınlık, yoğunluk ve hava boşluğundaki artışla ses emiliminin arttığı, ancak lif çapının artışıyla ses emiliminin azaldığı bulunmuştur. Diğer çalışmada ise (Buksnowitz et al., 2010) kenevir bazlı kompozitlerin cam elyafı ile kıyaslandığında, logaritmik akustik sönümlemede daha üstün performans sergilediği tespit edilmiştir.

Kenevirli malzemelerin akustik özelliklerinin, yapı malzemesi olarak kullanım potansiyelini artırdığı ve özellikle ses yalıtımı ve akustik performans açısından etkili olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin, kenevir betonu ile yapılan çalışmalar, düşük kalınlıkta dahi yüksek ses emilim kapasitesi ve düşük iletim kayıpları sağlandığını göstermektedir. (Fernea et al., 2019) tarafından yapılan araştırmalar, kenevir liflerinin 250 ile 4000 Hz frekans aralığında üstün ses emilim özellikleri gösterdiğini doğrulamıştır. Bu bulgular, kenevir bazlı kompozitlerin, akustik yalıtım uygulamalarında potansiyel bir alternatif malzeme olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Fernea et al., 2019).

3.1. Biyokompozit Malzemeler ve Kenevirin Termal Özellikleri

Biyokompozit malzemelerin termal özellikleri, bu malzemelerin çeşitli uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Kenevir gibi biyolojik bazlı bileşenler, düşük termal iletkenlikleri sayesinde yapı malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tür malzemelerin ısıya karşı gösterdiği davranışlar, hem yapıların termal performansını artırmak hem de yangın güvenliğini sağlamak amacıyla incelenmektedir. Bir kompozit malzemenin termal özellikleri, kullanılan dolgu maddesinin türü, şekli, miktarı ve matrisin fiziksel yapısı gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Termal iletkenlik, bir malzemenin ısıyı iletme kapasitesini belirleyen önemli bir parametre olup, Fourier ısı iletimi yasasına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Polimer kompozit laminatlarda, ısı transferi, yüzey alanı ve sıcaklık gradyanının yanı sıra kullanılan polimerin türüne bağlı olarak da değişim gösterebilmektedir. Ayrıca, termal iletkenlik anizotropik bir özellik sergileyebilir; yani, malzemenin ölçüldüğü yöndeki değer farklılıklar gösterebilir. Dolgu maddesinin yoğunluğu, şekli ve dağılımı gibi faktörler, kompozitlerin termal iletkenliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Dahal et al., 2022).

Kenevir bazlı biyokompozitlerin termal iletkenliği, yapılan çok sayıda çalışmada (Gaujena et al., 2020; Kolak & Oltulu, 2023; Somé et al., 2018; Wulandana et al., 2025) incelenmiş ve kenevirin termal yalıtım özellikleri belirgin bir şekilde vurgulanmıştır.

Kenevir betonunun yapıları güçlendirmede ve ısı yalıtımı sağlamakta etkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, kenevirin termal iletkenliğini etkileyen mikro yapısal faktörler ve sıcaklık altındaki davranışları da dikkate alınarak, bu

malzemenin ısı yalıtım potansiyeli daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Kenevir bazlı kompozitlerin termal iletkenlikleri, kullanılan polimer matrisin türüne ve dolgu maddesinin özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermekte olup, yapılan deneysel ve analitik çalışmalar bu malzemelerin termal performansını optimize etme noktasında önemli veriler sunmaktadır. Sonuç olarak, kenevir ve biyokompozit malzemelerin termal özellikleri, özellikle yapı malzemeleri olarak kullanımda önemli bir rol oynamaktadır ve bu malzemelerin ısı yalıtımı alanındaki potansiyeli giderek daha fazla ilgi görmektedir (Dahal et al., 2022).

3.2. Kenevir Kompozitlerinin Mekanik Özellikleri

Kenevir lifleri, üstün mekanik özellikleri ile öne çıkmaktadır. Özellikle yüksek çekme mukavemeti ve çekme modülü açısından dikkat çekici performans sergilemektedir. (Shahzad, 2013) tarafından yapılan bir çalışmada, kenevir liflerinin çekme mukavemeti 277 ± 199 MPa, çekme modülü ise $9,5 \pm 5,8$ GPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kırılma gerinimi $\%2,3 \pm 0,8$ olarak ölçülmüştür.

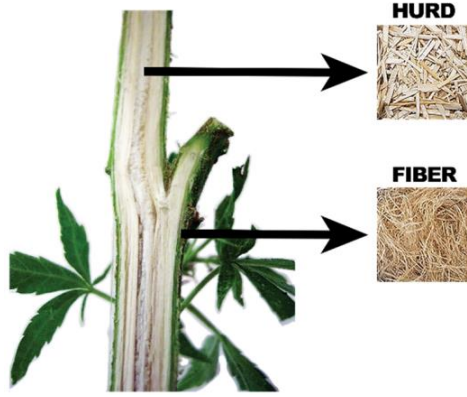
Kenevir liflerinin mekanik özellikleri, büyüme süreleri ve ıslah edilmiş ile ıslah edilmemiş lifler arasındaki farklar gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Örneğin; (Pickering et al., 2007) farklı büyüme dönemlerine sahip kenevir liflerinin mukavemetini inceleyerek, 114 günlük büyüme dönemi boyunca elde edilen ıslah edilmemiş liflerin 800 MPa'ın üzerinde çekme mukavemeti sergilediğini bulmuşlardır. Bu bulgular, kenevir liflerinin mekanik özelliklerinde belirgin bir varyasyon olduğunu, ancak yine de güçlü kompozit malzemeler elde etmek için uygun takviye malzemeleri olarak kullanılabileceklerini göstermektedir.

Kenevir lifleri, sentetik liflere kıyasla mekanik özelliklerdeki tutarsızlıklar nedeniyle bazı zorluklar teşkil etse de, bu liflerin doğal yapıları, özellikle biyokompozitlerde dayanıklılığı artırma ve malzeme performansını iyileştirme açısından önemli bir potansiyele sahiptir (Dahal et al., 2022).

4. İnşaat Sektöründe Kenevirin Potansiyel Uygulama Alanları

Pratikte, kenevir ve kireç bileşenlerinden oluşturulan kompozitler, kıymıkların hafif agregalar olarak ana kullanım alanını oluşturmaktadır. Bu kompozitler, duvarlar, döşemeler ve çatılarda, ahşap çerçeve yapıların dolgu elemanları olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin termal iletkenlik katsayısı, kullanılan bileşime bağlı olarak $0,074-0,138$ W/(mK) arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Kompozitler ayrıca, $1000-1600$ J/(kgK) arasında değişen yüksek bir termal kapasiteye sahip olup, bu özellikleri, duvarlardaki ısıнын

muhafazasını destekleyerek, iç mekanlardaki termal konforu olumlu yönde etkilemektedir (Benfratello et al., 2013; Stevulova et al., 2013)



Şekil 2. Kenevir gövdelerinden elde edilen hammaddeler
(Kaur & Kander, 2023)

Endüstriyel kenevir sapı, yapı sektöründe yaygın olarak değerlendirilen iki temel bileşeni lif (fiber) ve odunsu iç kısım (hurd) içermektedir. Şekil 2’de, sapın boyuna kesiti üzerinden gerçekleştirilen ayrıştırma işlemi sonucunda, bu iki yapısal fraksiyonun bitki içerisindeki konumları şematik olarak sunulmuştur. Söz konusu görsel, kenevirin doğal yapısal kompozit malzeme üretimi açısından sahip olduğu potansiyeli görsel düzlemde ortaya koymaktadır.

Bu alanda kullanılan kenevir agregası, magnezyum bazlı bağlayıcılar ile yapılan kompozitlerde kullanılabilir. Kireç bazlı kompozitlere kıyasla daha yüksek mukavemete sahip olan bu malzemeler, prefabrik yapı elemanlarının üretiminde tercih edilmektedir. Bu kompozitlerin ısıl iletkenlik değerleri bileşime bağlı olarak 0,074–0,082 W/(mK) arasında değişebilmektedir (Sinka et al., 2017; Stevulova et al., 2013). Kil ve talaş karışımından üretilen tuğlalar, ısı iletkenliği açısından incelendiğinde, yoğunluklarına bağlı olarak 0,09–0,18 W/(mK) arasında bir performans sergileyebilmektedir (Kaur & Kander, 2023).

Kenevir liflerinin yanı sıra, daha ince fraksiyonlu talaşlar da ısı yalıtım harçları ve sıvaların üretiminde kullanılmaktadır (Kosiński et al., 2022). Bu katkı maddeleri, aynı zamanda malzemelerin büzülme karşısındaki direncini artırarak, yapısal bütünlüğü desteklemektedir.

Kenevir gibi keten sapı da (Brzyski et al., 2021) ham halleriyle ahşap çerçeveli yapılarda gevşek ısı yalıtımı olarak kullanılmaktadır. Geçmişte, kireç veya kil ile karıştırılarak kuru formda tavan yalıtımı uygulamalarında da tercih edilmiştir.

5. Kenevir Kompozit Malzemelerle İlgili Güncel Sorunlar

Kenevir bazlı kompozit malzemeler, hafiflik, korozyon dayanıklılığı ve mekanik sağlamlık gibi önemli avantajlar sunmakla birlikte, geri dönüşüm ve maliyetle ilgili bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Kenevir lifinin morfolojisi, şekli, yüzey gözenekliliği ve reçine dağılımı gibi faktörler, kompozitlerin yapısal bütünlüğü ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Termal etkiler, kenevir kompozitlerinin fiziksel, mekanik ve termal davranışlarını şekillendiren diğer bir kritik faktördür. Kenevir kompozitlerinin, yüksek sıcaklık ve ısıya maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışların anlaşılması, yapısal performanslarının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için oldukça önemlidir. Ancak, kenevir kompozitlerinin sıcaklık değişimlerine bağlı olarak sergiledikleri fiziksel ve mekanik özelliklere dair hâlen sınırlı bilgi bulunmaktadır.

Sonuç olarak, kenevir kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, bu malzemelerin üretim süreçlerinin modellenmesi ve simülasyonu konusunda hâlâ önemli zorluklar mevcuttur. Ayrıca, termal etkilerin ve bu etkilerin malzeme performansı üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, kenevir kompozitlerinin üretim maliyetlerini ve süresini optimize etmeye yönelik önemli katkılar sağlayabilir (Al-Oqla & Omari, 2017).

6. Sonuçlar ve Gelecek Perspektifleri

Atıklardan elde edilen biyo-ürünler, çevre kirliliğini azaltarak ve sera gazı emisyonlarını düşürerek çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamaktadır. İnorganik liflerin, polimerlerin ve dolgu maddelerinin biyolojik kökenli alternatiflerle değiştirilmesi, çevre dostu malzeme üretimi açısından kritik bir adım olup, bu süreç yeşil ve temiz bir çevre yaratmada önemli bir rol oynamaktadır. Yerel yenilenebilir kaynakların kullanımı, bu malzemelerin daha hafif, güçlü ve ekonomik olmasını sağlayarak verimliliği artırmaktadır.

Kenevir bazlı kompozit malzemelerin dolgu maddeleriyle birlikte kullanımı, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin optimize edilmesi, bileşenlerin optimum oranlarının belirlenmesi ve malzemelerin analitik modellerle incelenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Kenevir liflerinin ve kalıntılarının polimer kompozitlerde kullanımı, atık biyokütleyi değerlendirerek çevre dostu malzemelerin üretilmesini sağlamaktadır ve bu süreç biyoekonomiyi desteklemektedir. Biyoekonomi, daha sürdürülebilir bir gelecek için, özellikle yerel ekonomilerde iş olanakları yaratmak, karbon ayak izini azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği artırmak açısından kritik bir kavramdır. Kenevir atıklarının değerlendirilmesi, tarımsal atık yönetimini iyileştirecek ve

Çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, kenevir bazlı malzemelerin kullanımı, toplum, ekonomi ve evre üzerindeki sürdürülebilir etkileriyle daha yeşil bir dünya hedefinin gerçekleştirilmesine yardımcı olacaktır (Dahal et al., 2022).

Biyo-bazlı ve biyobozunur malzemeler, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, yeşil biyo-kompozitlerin geliştirilmesi, doğal liflerin çeşitliliği ve polimer-matris uyumsuzluğu gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu engellerin aşılması ve çevresel etkilerin minimize edilmesi için daha verimli üretim süreçleri ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu süreçlerin başarıya ulaşması, biyo-kompozitlerin yalnızca evre dostu alternatifler olarak değil, aynı zamanda mühendislik uygulamalarında etkin mler sunduğu stratejik araçlar olarak kabul edilmesine olanak tanıyacaktır (Al-Oqla & Omari, 2017).

Referanslar

- Al-Oqla, F. M., & Omari, M. A. (2017). Sustainable biocomposites: challenges, potential and barriers for development. *Green biocomposites: manufacturing and properties*, 13-29.
- Allin, S. (2005). *Building with hemp*: SeedPress.
- Ayçam, İ., Tuna Kayılı, M., & Süt, G. (2010). Sürdürülebilirlik ve Mimari Değişimin Yalıtım Malzemelerine Etkileri.
- Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., & Sorrentino, G. (2013). Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite. *Construction and building materials*, 48, 745-754.
- Brzyski, P., & Fic, S. (2017). The application of raw materials obtained from the cultivation of industrial hemp in various industries. *Economic and Regional Studies-Studia Ekonomiczne i Regionalne*, 10(1), 100-113.
- Brzyski, P., Kosiński, P., Zgliczyńska, A., Iwanicki, P., & Poko, J. (2021). Mass transport and thermal conductivity properties of flax shives for use in construction industry. *Journal of Natural Fibers*, 18(7), 995-1006.
- Buksnowitz, C., Adusumalli, R., Pahler, A., Sixta, H., & Gindl, W. (2010). Acoustical properties of Lyocell, hemp, and flax composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(20), 3149-3154.
- Büyükakıncı, B. Y., Sökmen, N., & Küçük, H. (2011). Thermal conductivity and acoustic properties of natural fiber mixed polyurethane composites. *Textile and Apparel*, 21(2), 124-132.
- Dahal, R. K., Acharya, B., & Dutta, A. (2022). Mechanical, thermal, and acoustic properties of hemp and biocomposite materials: a review. *Journal of Composites Science*, 6(12), 373.
- Dikmen, Ç., & Gültekin, A. (2011). Usage of renewable energy resources in buildings in the context of sustainability. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(3), 96-100.
- Enarevba, D. R., & Haapala, K. R. (2024). The emerging hemp industry: a review of industrial hemp materials and product manufacturing. *AgriEngineering*, 6(3), 2891-2925.
- Erten, D. (2009, 30.12.2009). Bir Paradigma Değişikliği Olarak Yeşil Bina. Retrieved from https://www.yapi.com.tr/Haberler/birparadigma%20degisikligiolarakyesilbina_66169.html
- Esin, T. (2007). Yapılarda Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kullanımı ve Örnek Yapı Tasarımları. *Đzolasyon Dünyası*, 68, 60-62.

- Farinon, B., Molinari, R., Costantini, L., & Merendino, N. (2020). The seed of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): Nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition. *Nutrients*, 12(7), 1935.
- Fernea, R., Manea, D. L., Plesa, L., Ieranu, R., & Dumitran, M. (2019). Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials. *Procedia Manufacturing*, 32, 208-215.
- Gaujena, B., Agapovs, V., Borodinecs, A., & Strelets, K. (2020). Analysis of thermal parameters of hemp fiber insulation. *Energies*, 13(23), 6385.
- Ghaffari Mosanenzadeh, S., Naguib, H. E., Park, C. B., & Atalla, N. (2014). Effect of biopolymer blends on physical and Acoustical properties of biocomposite foams. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 52(15), 1002-1013.
- Guo, J. (2016). Investigating Acoustic Properties of Biocomposite from waste streams: The University of Regina (Canada).
- Gültekin, A. (2006). Mimari tasarım sürecinde ekolojik tasarım ölçütlerinin irdelenmesi.
- Hui, Z., & Fan, X. (2009). Sound absorption properties of hemp fibrous assembly absorbers. *Sen'i Gakkaishi*, 65(7), 191-196.
- Kaur, G., & Kander, R. (2023). The sustainability of industrial hemp: a literature review of its economic, environmental, and social sustainability. *Sustainability*, 15(8), 6457.
- Kolak, M. N., & Oltulu, M. (2023). Investigation of mechanical and thermal properties of new type bio-composites containing camelina. *Construction and Building Materials*, 362, 129779.
- Koruk, H., & Genç, G. (2019). Acoustic and mechanical properties of luffa fiber-reinforced biocomposites. In *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites* (pp. 325-341): Elsevier.
- Kosiński, P., Brzyski, P., Tunkiewicz, M., Suchorab, Z., Wiśniewski, D., & Palczyński, P. (2022). Thermal properties of hemp shives used as insulation material in construction industry. *Energies*, 15(7), 2461.
- Markiewicz, E., Paukszt, D., & Borysiak, S. (2012). Acoustic and dielectric properties of polypropylene-lignocellulosic materials composites. *Polypropylene InTech*, 30, 193-217.
- Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., & Grădinaru, C. M. (2018). Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *Journal of Cleaner Production*, 203, 301-312.

- Pickering, K. L., Beckermann, G., Alam, S., & Foreman, N. J. (2007). Optimising industrial hemp fibre for composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 461-468.
- Raihan, A., & Bijoy, T. R. (2023). A review of the industrial use and global sustainability of *Cannabis sativa*. *Global Sustainability Research*, 2(4), 1-29.
- Ryłko-Polak, I., Komala, W., & Białowiec, A. (2022). The reuse of biomass and industrial waste in biocomposite construction materials for decreasing natural resource use and mitigating the environmental impact of the construction industry: a review. *Materials*, 15(12), 4078.
- Shahzad, A. (2013). A study in physical and mechanical properties of hemp fibres. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(1), 325085.
- Sinka, S., Sahmenko, G., Korjakins, A., & Bajare, D. (2017). Lime-hemp concrete (LHC) enhancement using magnesium based binders. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(2), 238-245.
- Somé, S. C., Fraj, A. B., Pavoine, A., & Chehade, M. H. (2018). Modeling and experimental characterization of effective transverse thermal properties of hemp insulation concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 384-396.
- Stevulova, N., Kidalova, L., Cigasova, J., Junak, J., Sicakova, A., & Terpakova, E. (2013). Lightweight composites containing hemp hurds. *Procedia Engineering*, 65, 69-74.
- Strong, M., & Bartelmus, P. (2002). *Environment, Growth and Development: The Concepts and Strategies of Sustainability*.
- Wulandana, R., Oliveira, F. S., & Giordani, G. R. (2025). Investigating the Thermal and Mechanical Properties of Hempcrete Through Practical Experiments. Paper presented at the 2025 Northeast Section Conference.
- Yao, R., Yao, Z., Zhou, J., & Liu, P. (2016). Mechanical and acoustical properties of polylactic acid based multilayer-structured foam biocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(10), 785-795.

2. Bölüm

Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Bursa Nilüfer Barajı Kuraklık Tespiti ve Analizleri

Berna AKSOY¹

ÖZET

İklim değişikliğinin tüm dünyayı tehdit etmeye başlaması yeryüzünde yaşayan tüm canlılar için çok ciddi bir sorundur. Bu çalışmada iklim değişiklikleri sebebiyle meydana gelen doğal afetlerden biri olan kuraklık etkileri ve analizi çalışması yapılmıştır. Temeli yağış eksikliği ile başlayan kuraklığın, doğaya ve tüm canlıların hayatına olan yıkıcı etkileri araştırılmıştır. Küresel iklim değişikliğinin sonucu dünyanın birçok bölgesinde artan sıcaklıklar ve azalan yağışlar, kuraklık olaylarının getirdiği ciddiyeti artırır. Kuraklığın belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınabilmesi için bölgenin ayrıntılı analizi gerekmektedir.

Bu çalışmada Bursa ilinde bulunan Nilüfer Barajı göl alanının 2012–2022 yılları arasındaki zamansal değişimler uydu görüntüleri yardımıyla uzaktan algılama teknikleri ile belirlenmiştir. Gölün zaman içindeki alansal değişimi Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) çok zamanlı uydu görüntülerinden üretilen normalize edilmiş fark su indisi (NDWI) veri seti ile belirlenmiştir. Ayrıca elde edilebilen uydu görüntüleriyle verilerin uyumlu olabilmesi için, tüm görüntüler 2012-2022 yılları arasını baz almıştır. Böylelikle süreç boyunca meteorolojik kuraklığın NDWI ile belirlenen su alanına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak Nilüfer Barajı göl alanındaki değişim belirtilmiş ve kuraklık etkilerinin ne kadar büyük tehditler yaşatabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan algılama, kuraklık, NDWI, kuraklık analizi, iklim değişikliği

¹ Dr. Öğr. Üyesi Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalı berna.oaksoy@beun.edu.tr ORCID: 0000-0001-6925-1594

ABSTRACT

The fact that climate change has started to threaten the whole world is a very serious problem for all living things on earth. In this study, the effects and analysis of drought, one of the natural disasters caused by climate change, were analyzed. The destructive effects of drought, which starts with the lack of precipitation, on nature and the lives of all living things have been investigated. Increasing temperatures and decreasing precipitation in many parts of the world as a result of global climate change increase the severity of drought events. A detailed analysis of the region is required to identify drought and take necessary measures.

In this study, the temporal changes of the Nilüfer Dam lake area in Bursa province between 2012 and 2022 were determined by remote sensing techniques with the help of satellite images. The spatial change of the lake over time was determined with the normalized difference water index (NDWI) data set produced from Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) multi-temporal satellite images. In addition, all images were based on the period between 2012 and 2022 in order to harmonize the data with the available satellite images. Thus, the effect of meteorological drought on the water area determined by NDWI was investigated throughout the process. Considering the results obtained, the change in the lake area of Nilüfer Dam was indicated and it was seen how great the threats of drought effects can be.

Keywords: Remote sensing, drought, NDWI, drought analysis, climate change

1. GİRİŞ

Kuraklık, su kaynaklarının sürdürülebilirliğini tehdit eden, ekolojik dengeden ekonomik sistemlere kadar çok geniş bir yelpazede etkili olan önemli bir doğal afettir. Nüfus artışı, kontrolsüz kaynak tüketimi ve iklim değişikliğiyle birlikte, özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde kuraklık riskinin arttığı bilinmektedir. Kuraklığın etkileri yalnızca tarım ve su temini ile sınırlı kalmayıp, gıda güvenliği, göç, istihdam ve ekonomik istikrar gibi sosyal boyutları da kapsamaktadır.

Kuraklık; meteorolojik, hidrolojik, tarımsal ve sosyoekonomik olmak üzere dört temel başlık altında sınıflandırılabilir. Her bir kuraklık türünün doğru tanımlanabilmesi ve izlenebilmesi, risk yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle meteorolojik kuraklık, yağış yetersizliğinin doğrudan ölçülmesine dayandığı için erken uyarı sistemlerinin temelini oluşturmaktadır.

Son yıllarda, kuraklığın tespiti ve izlenmesinde uzaktan algılama teknolojileri önemli bir alternatif haline gelmiştir. Geniş alanları kısa sürede kapsayabilen ve tarihsel veri birikimi sunan uydu görüntüleri, kuraklık gibi yavaş gelişen afetlerin analizinde büyük avantaj sağlamaktadır. Bu yöntemler, geleneksel yersel ölçüm verileriyle entegre edildiğinde, çok yönlü ve güvenilir sonuçlar üretmektedir.

Kuraklık, belirli bir bölgedeki normal iklim koşullarına göre uzun süreli yağış eksikliğiyle ortaya çıkan ve su kaynaklarının azalmasına neden olan bir doğal afet türüdür. Özellikle yavaş gelişen ve etkileri uzun vadede hissedilen bir karaktere sahip olması, kuraklık izleme çalışmalarını daha karmaşık hale getirmektedir (Wilhite & Pulwarty, 2017).

Kuraklık genellikle dört temel başlık altında sınıflandırılır:

- Meteorolojik Kuraklık: Uzun süreli yağış azlığına bağlı olarak gelişir. Bu tür, diğer kuraklık türlerinin başlangıç noktasıdır ve genellikle iklim göstergeleriyle tanımlanır.
- Hidrolojik Kuraklık: Yer altı ve yüzey su kaynaklarının azalmasıyla ortaya çıkar. Akarsu, göl ve baraj seviyelerindeki düşüşlerle belirlenebilir.
- Tarımsal Kuraklık: Toprak neminin tarımsal üretim için yetersiz kalması durumudur. Bitki gelişimini ve ürün verimini doğrudan etkiler.
- Sosyoekonomik Kuraklık: Kuraklığın toplum üzerinde yarattığı ekonomik ve sosyal etkileri kapsar. Gıda güvenliği, işsizlik, göç gibi sonuçları içerir (UNCCD, 2022).

Bu kuraklık türleri birbirini tetikleyen ve birbiriyle ilişkili aşamalıdır. Dolayısıyla, etkili kuraklık yönetimi için bu bileşenlerin birlikte değerlendirilmesi gerekir (Spinoni et al., 2019).

Kuraklık analizinde sıklıkla kullanılan göstergelerden biri olan Standardized Precipitation Index (SPI), yalnızca yağış verisine dayanarak farklı zaman ölçeklerinde kuraklığı nicel olarak değerlendirmeye imkân sağlar (McKee et al.,

1993). SPI'nın özellikle meteorolojik kuraklıkların izlenmesinde yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Zhang et al., 2020).

Geleneksel meteorolojik yöntemlerin yanında, uydu tabanlı uzaktan algılama teknikleri de son yıllarda kuraklık analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uydu verileri, geniş alanlarda arazi ve su yüzeylerinin zamansal olarak izlenmesine olanak tanır. Bu bağlamda en sık kullanılan göstergelerden biri Normalized Difference Water Index (NDWI)'dir. NDWI, su kütlelerinin alan ve dağılımını belirlemek amacıyla Landsat gibi uydu sistemlerinden elde edilen multispektral görüntüler üzerinden hesaplanır (Gao, 1996).

NDWI kullanılarak yapılan analizler, baraj gölleri, sulak alanlar ve akarsular gibi yüzey suyu kaynaklarındaki değişimleri zamana bağlı olarak izleme imkânı sunar. Özellikle 2020 sonrası yapılan araştırmalarda, NDWI ile SPI değerlerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesiyle, uzaktan algılama ve meteorolojik verilerin entegrasyonunun ne kadar etkin olduğu gösterilmiştir (Eraslan & Koç, 2022; Al-Hameedawi, 2021).

Örneğin:

- Eraslan & Koç (2022), Konya Havzası'nda NDWI ile göl alanı değişimini SPI verileriyle entegre ederek kuraklık şiddetinin mekânsal etkilerini analiz etmiştir.
- Al-Hameedawi (2021), Irak'taki su kaynakları üzerinde NDWI-SPI ilişkisini kullanarak hidrolojik kuraklığı başarılı şekilde modellemiştir.
- Tigistu et al. (2020) ise Etiyopya'da baraj gölleri için NDWI, NDVI ve SPI verilerini entegre ederek, farklı kuraklık türlerinin su kaynakları üzerindeki etkilerini göstermiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin Güney Marmara Bölgesi'nde yer alan Bursa ilindeki Nilüfer Barajı örneği üzerinden, meteorolojik kuraklık ve baraj gölü su alanı değişimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Landsat 8 OLI uydu verileri kullanılarak Normalize Edilmiş Su Fark İndeksi (NDWI) aracılığıyla baraj gölü alanındaki zamansal değişim analiz edilmiş ve bu değişim, Standardize Yağış İndeksi (SPI) ile hesaplanan meteorolojik kuraklık değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu kitap kapsamında ele alınan yöntem, yalnızca Nilüfer Barajı özelinde değil, benzer hidrolojik yapıya sahip diğer havzalar için de uygulanabilir bir model sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde sırasıyla üzerinde çalışma yapılan bölgenin genel özellikleri, kullanılan meteorolojik veriler, bu verilerin farklı formülasyonlarla işlenerek meteorolojik kuraklık verilerinin üretilmesi, kuraklık analizinde alansal

değişimin gözlenebilmesi için kullanılan uzaktan algılama verileri, su kütlelerini ortaya çıkarabilmek için bu uzaktan algılama verilerine uygulanan indisler ve bu indislerin formülasyonları ve son olarak analizler hakkında bilgi verilecektir.



Şekil 1: Bursa İli Nilüfer Barajı Uydu Görüntüsü

2.1. Çalışma Alanı

Nilüfer Barajı (diğer adı Doğancı- Barajı) $40^{\circ}0'42''K$ ve $29^{\circ}6'58''D$ koordinatlarında konumlandırılmış ve Bursa il sınırları içerisinde yer almaktadır. Barajın temeli 1995 yılında Bursa Nilüfer Çayı üzerinde atılmıştır. Faaliyete ise 2007 yılının Ağustos ayında geçmiştir (Şekil 1).

Bu baraj yıllık $60.000.000 \text{ m}^3$ su kapasitelidir. Dünya Sağlık Örgütü tarafından suyu ve korunak yönünden dünyanın en üst sıralarında yer almaktadır. Toprak ve kaya gövde dolgu tipi olan barajın gövde hacmi $3.550.000 \text{ m}^3$, akarsu yatağından yüksekliği 93,00 m, normal su kotunda göl hacmi $39,50 \text{ hm}^3$, normal su kotunda göl alanı $1,47 \text{ km}^2$ 'dir. Baraj yıllık 60 hm^3 'lük içme suyu sağlamaktadır. 2022 yılının ekim ayıyla başlayan kuraklık etkisi ile birlikte Nilüfer Barajının doluluk oranı yaklaşık olarak %10 seviyelerine düştüğü kayıt altına alınmıştır.

Bursa ili genellikle ılıman bir iklime sahiptir. Ancak, iklim bölgelere göre de değişiklik göstermektedir. Kuzeyde Marmara Denizinin yumuşak ve ılık iklimine karşılık güneyde Uludağ'ın sert iklimi ile karşılaşmaktadır. İlin en sıcak ayı 31.7°C ile Ağustos, en soğuk ayı ise 1.7°C ile Ocak'tır.



Şekil 2: Nilüfer Barajını Besleyen Kaynakların Uydu Görüntüsü

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün uzun yıllar boyu elde ettiği veriler göz önüne alındığında en yağışlı ay 93.9 mm ile Aralık ayı iken en kurak ay ise 14.3 mm ile Temmuz ayıdır. Barajı besleyen ana kaynak Nilüfer çayıdır. Bu ana kaynak harici irili ufaklı birçok doğal kaynak vardır. Bu kaynaklar uydu görüntüleri yardımıyla belirlenerek haritaları elde edilmiştir. Baraj çevresinde çayırılık alanlar, bodur ağaçlar, çam türleri ve zeytin ağaçları bulunmaktadır (Şekil 2).

2.2. Meteorolojik Veri ve İşlenmesi

Bursa İli Merkez İlçesinde konumlandırılmış T.C. Orman ve Su İşler Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) ait 17116 kodlu meteoroloji istasyonunda 2000-2022 yılları arasında ölçülen yağış verileri çalışma alanındaki kuraklık değişimini belirlemek için kullanılmıştır. Yağışlı dönemden kurak döneme kadar 12 aylık süreçteki yağışların kuraklığa etkisi incelenmiştir. 12 aylık su yılının başlangıç ve bitiş zamanı Ekim ayının birinci günü (yağışlı dönemin başlangıcı) ve bir sonraki yılın Eylül ayının sonudur (kurak dönemin sonu). Mesela, 2001 su yılı incelemesinde 2000 Ekim ile 2001 Eylül arasındaki 12 aylık zaman dilimi incelenmiştir. Meteorolojik kuraklık analizinde kullanılan yağış verileri uzaktan algılama veri setinin tarihlerine göre belirlenmiştir, diğer bir deyişle 12 aylık zaman diliminde uydu görüntülerinin elde edim tarihlerine göre artı eksi oynamalar olmuştur.

Uzaktan algılama uygulamalarında kullanılacak olan uydu görüntüleri 2022-2012 yılları arası alınabildiği için meteorolojik verilerle yapılacak işlemler bu aralığa göre yapılmıştır. İlk olarak bu yıllar arası eklenik sapma grafiği oluşturulmuştur. Eklenik sapma, uzun yıllar içerisinde yağışın uzun yıllar ortalamasından sapmalarının toplamaları şeklinde hesaplanır ve kurak ve yağışlı dönemleri ortaya koyar. Eklenik sapmayı yorumlayabilmek için alt ve üst emniyet sınırları ve değişim katsayısı (C_v) hesaplanması gerekir. Bu değerler aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Alt emniyet sınırı} = X_{ort} - \sigma$$

$$\text{Üst emniyet sınırı} = X_{ort} + \sigma$$

$$C_v = \sigma / X_{ort}$$

X_{ort} = Araştırma yapılan bölgenin uzun yıllar kayıt altına alınan yağış toplamalarının ortalaması.

σ = Araştırma yapılan bölgenin uzun yıllar kayıt altına alınan yağış toplamalarının standart sapması.

Bu iki değer kullanılarak C_v hesaplanmaktadır. C_v değerinin küçük olması araştırma yapılan bölgenin düzenli ve iyi şekilde yağış aldığını ifade etmektedir.

Uydu görüntüleri ile elde edeceğimiz uzaktan algılama verilerini yapmış olduğumuz matematiksel işlemlerle ilişkilendirebilmek için 2012 ile 2022 yılları arası her yıl için SPI meteorolojik kuraklık indisi üretilmiştir. SPI meteorolojik kuraklık indisi, araştırma yapılan süreçteki yağışların toplamının yine aynı süreçteki yıllık toplamaların uzun dönem ortalamasından farkının yine uzun yıllar veri setinden hesaplanan standart sapma değerine bölünmesiyle hesaplanır.

$$SPI = (X_i - X_{ort}) / \sigma$$

X_i = Araştırma yapılan dönemin yağış toplamı.

X_{ort} = Araştırma yapılan bölgenin uzun yıllar kayıt altına alınan yağış toplamalarının ortalaması.

σ = Araştırma yapılan bölgenin uzun yıllar kayıt altına alınan yağış toplamalarının standart sapması.

Tablo 1: Meteorolojik Kuraklık İndisi Sınıfları ve Değer Aralıkları (Caccamo ve ark., 2011).

SPI Kuraklık Sınıfı	SPI Değer Aralıkları
Olağanüstü nemli	≥ 2
Şiddetli nemli	$1.5 \leq \text{SPI} \leq 1.99$
Orta nemli	$1.0 \leq \text{SPI} \leq 1.49$
Hafif nemli	$0 \leq \text{SPI} \leq 0.99$
Hafif kurak	$-0.99 \leq \text{SPI} \leq 0$
Orta kurak	$-1.49 \leq \text{SPI} \leq -1.0$
Şiddetli kurak	$-1.99 \leq \text{SPI} \leq -1.5$
Olağanüstü kurak	≤ -2.00

Alınan verilerden yapılmış olan SPI kuraklık analizine göre 2022 yılı için SPI değeri -1.22 çıkmıştır. Bulunan değer çizelge ile ilişkilendirildiğinde 2022 yılında orta kurak bir dönem yaşanmıştır.

Kuraklık analizi için Türkiye'nin Güney Marmara'sında yer alan 17116 numaralı Bursa meteoroloji istasyonunda 2000-2022 yılları arasında kesintisiz olarak ölçülmüş aylık yağış verileri kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2: Meteorolojik Kuraklık İndisi Sınıfları ve Değer Aralıkları

Yıllar	Ortalama Yağış (kg/m ³)	SPI	Yıllar	Ortalama Yağış (kg/m ³)	SPI
2000	25.46	0.19	2012	26.66	0.39
2001	23.86	-0.07	2013	24	-0.05
2002	24.36	0.01	2014	34	1.64
2003	23.60	-0.12	2015	27.52	0.54
2004	19.28	-0.85	2016	20.48	-0.65
2005	28.94	0.78	2017	21.72	-0.44
2006	19.66	-0.78	2018	24.41	0.02
2007	21.87	-0.41	2019	17.82	-1.09
2008	20.91	-0.57	2020	18.78	-0.93
2009	25.44	0.19	2021	29.54	0.88
2010	43.77	3.29	2022	17.08	-1.22
2011	19.81	-0.76			

2.3. Uzaktan Algılama Verisi ve İşlemesi

2012-2022 yılları arasında edinilmiş, geometrik, radyometrik ve atmosferik düzeltmeleri tedarikçisi olan Birleşik Devletler Jeolojik Araştırma Kurumu (USGS) tarafından yapılmış, 16 bit radyometrik ve 30 m mekansal çözünürlüklü 73 adet multispektral Landsat yeryüzü yansıtım uydu görüntüsü Bursa Nilüfer Baraj Gölünün çok zamanlı alansal değişimini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Uydu görüntüleri 2012 yılından itibaren her yıl en az iki görüntü olacak şekilde alınmaya dikkat edilmiştir.

Bu çalışmada 73 uydu görüntüsü alınarak Nilüfer Barajının kuraklık yaşadığı zamanlar ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Görüntüler genellikle eylül ve ekim aylarında alınmaya çalışılsa da bulutlu görüntüler uzaktan algılama uygulamalarında verimsiz oldukları için yakın olan aylardaki uydu görüntüleri kullanıldı.

Uygulamayı daha kapsamlı yapabilmek istense de ücretsiz olarak erişilen, 2012 yılından önceki uydu görüntüleri kesikli olduğundan uygulama 2012 yılına kadar yapılmıştır. 2022-2012 arası alınan uydu görüntülerinin tamamı Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) uydu görüntüleridir. Bu görüntülerin özellikleri aşağıdaki Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Uydu Görüntülerinin Tarihleri ve Özellikleri

No	Görüntüleme Tarihi	Uydu	No	Görüntüleme Tarihi	Uydu
1	2013/05/04	Landsat 8 OLI	16	2018/11/01	Landsat 8 OLI
2	2013/09/25	Landsat 8 OLI	17	2019/03/25	Landsat 8 OLI
3	2014/06/24	Landsat 8 OLI	18	2019/06/22	Landsat 8 OLI
4	2014/11/06	Landsat 8 OLI	19	2019/08/25	Landsat 8 OLI
5	2015/04/24	Landsat 8 OLI	20	2020/05/14	Landsat 8 OLI
6	2015/07/13	Landsat 8 OLI	21	2020/07/10	Landsat 8 OLI
7	2016/02/29	Landsat 8 OLI	22	2020/08/27	Landsat 8 OLI
8	2016/06/20	Landsat 8 OLI	23	2021/05/10	Landsat 8 OLI
9	2016/09/17	Landsat 8 OLI	24	2021/07/13	Landsat 8 OLI
10	2017/04/29	Landsat 8 OLI	25	2021/08/14	Landsat 8 OLI
11	2017/07/25	Landsat 8 OLI	26	2022/05/21	Landsat 8 OLI
12	2017/10/13	Landsat 8 OLI	27	2022/07/24	Landsat 8 OLI
13	2018/02/18	Landsat 8 OLI	28	2022/08/17	Landsat 8 OLI
14	2018/06/03	Landsat 8 OLI	29	2022/09/26	Landsat 8 OLI
15	2018/09/23	Landsat 8 OLI			

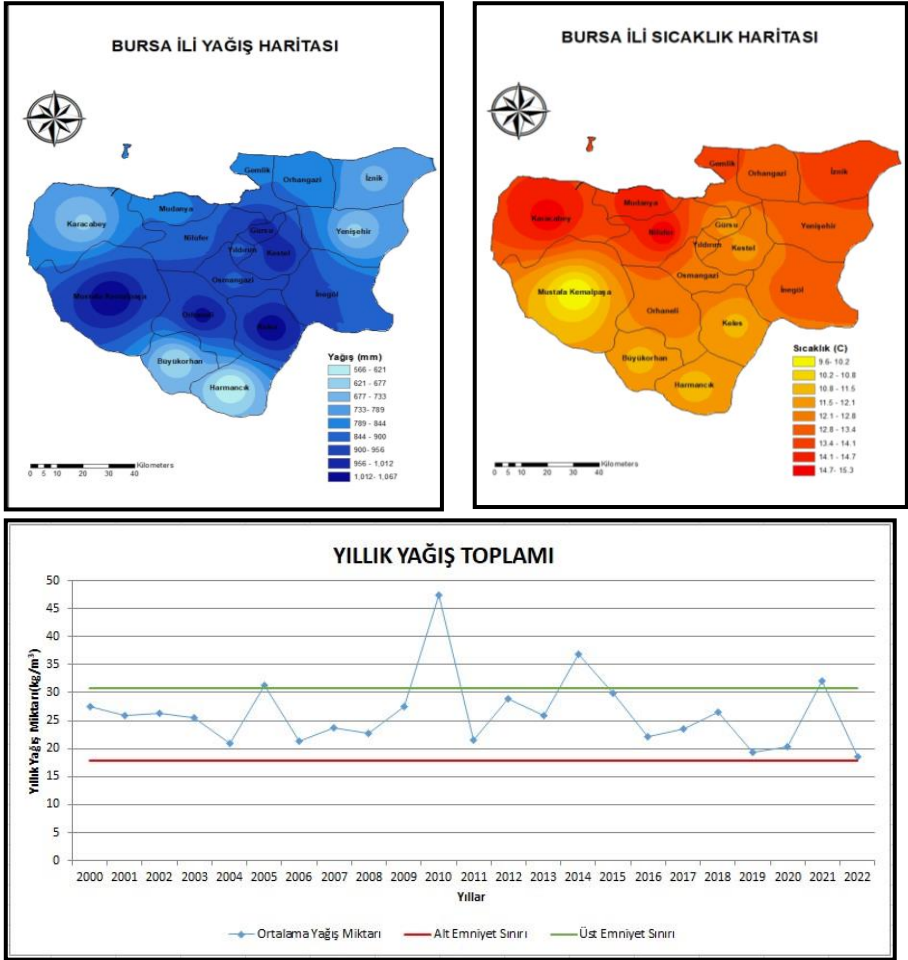
Bursa Nilüfer Barajının su kütlesi alanı belirlenirken uzaktan algılama yöntemlerinden biri olan NDWI su indisinden faydalanılmıştır. NDWI su indisi, suyun elektromanyetik spektrumun yeşil bölgesinde ışığı yansıtma (R) ve yakın kızıl ötesi (NIR) bölgesinde ise ışığı emme özelliğinden faydalanır, yansıma değerleri -1 ile 1 arasında değişmektedir ve 0 ın üzerindeki değerler sulu bölgeyi ifade etmektedir. NDWI indisi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir. NDWI indisinde Landsat 8 OLI uydu görüntüleri kullanılarak sayısız su kütlesi belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. NDWI indisi gerçekleştirilirken Landsat 8 OLI uydu görüntülerinin üçüncü ve yedinci bantları aşağıdaki eşitlikte yerine konularak NDWI indis görüntüleri oluşturulmuştur. Üçüncü bant yeşil bölgeyi temsil ederken yedinci bant ise yakın kızıl ötesi bölgeyi temsil etmektedir.

3. Analizler

Landsat 8 OLI uydusundan aldığımız 2012-2022 yılları arası uydu görüntüleri ile yapmış olduğumuz NDWI su analizleri ile meteorolojik kuraklık indisi değerleri ilişkilendirilmiştir. Oluşturmuş olduğumuz su kütlesi alanı haritaları ile hesaplamış olduğumuz meteorolojik kuraklık indisi değerlerimiz birbirini tamamlamaktadır.

3.1. Meteorolojik Kuraklık Analizi

2000-2022 yılları arası yağış verileri kullanılarak oluşturulan yıllık yağış grafiğine bakıldığında bu aralıktaki en yağışlı dönem 34 kg/m³ ile 2014 yılı, en kurak dönem ise 17.08 kg/m³ ile 2022 yılı olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama yağış değeri ve standart sapma değerleri hesaplanıp bu değerler yardımıyla alt ve üst emniyet sınırları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre alt emniyet sınırı 17.88 kg/m³ üst emniyet sınırı ise 30.72 kg/m³ olarak bulunmuştur. 2022 yılına bakıldığında yıllık toplam yağış miktarı 17.08 kg/m³ olduğu görülmektedir. Bu değer alt emniyet sınırı olan 17.88 kg/m³ değerinin altındadır. 12 aylık SPI değerlerine bakıldığında ise 2000-2022 yılları arasında bölgenin genel olarak hafif nemli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 2022 yılında ise -1.21 değeri ile bölgenin orta kurak olduğu görülmektedir. 2022 yılında yağışın oldukça az olması ve tüketiminde yıllar geçtikçe artmasıyla birlikte Nilüfer Barajı su kütlesi alanı azalmıştır. Elde edilen verileri genel bir harita üzerinde görmek amacıyla Bursa iline ait yağış haritası ve sıcaklık haritası da oluşturulmuştur (Şekil 3).



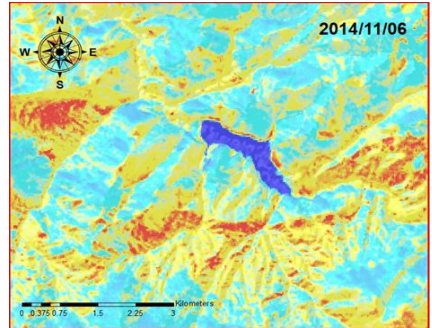
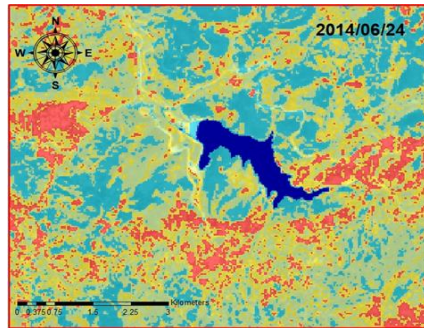
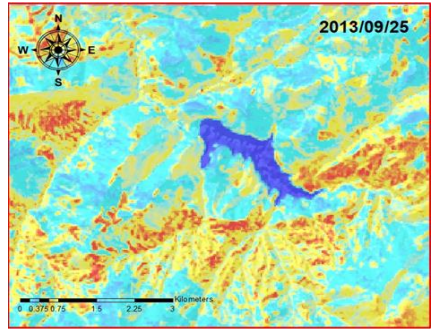
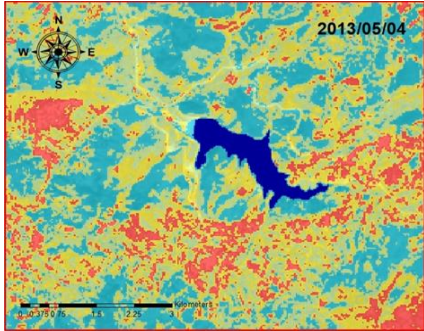
Şekil 3: Bursa İli Yağış, Sıcaklık ve Yıllık Toplam Yağış Verileri

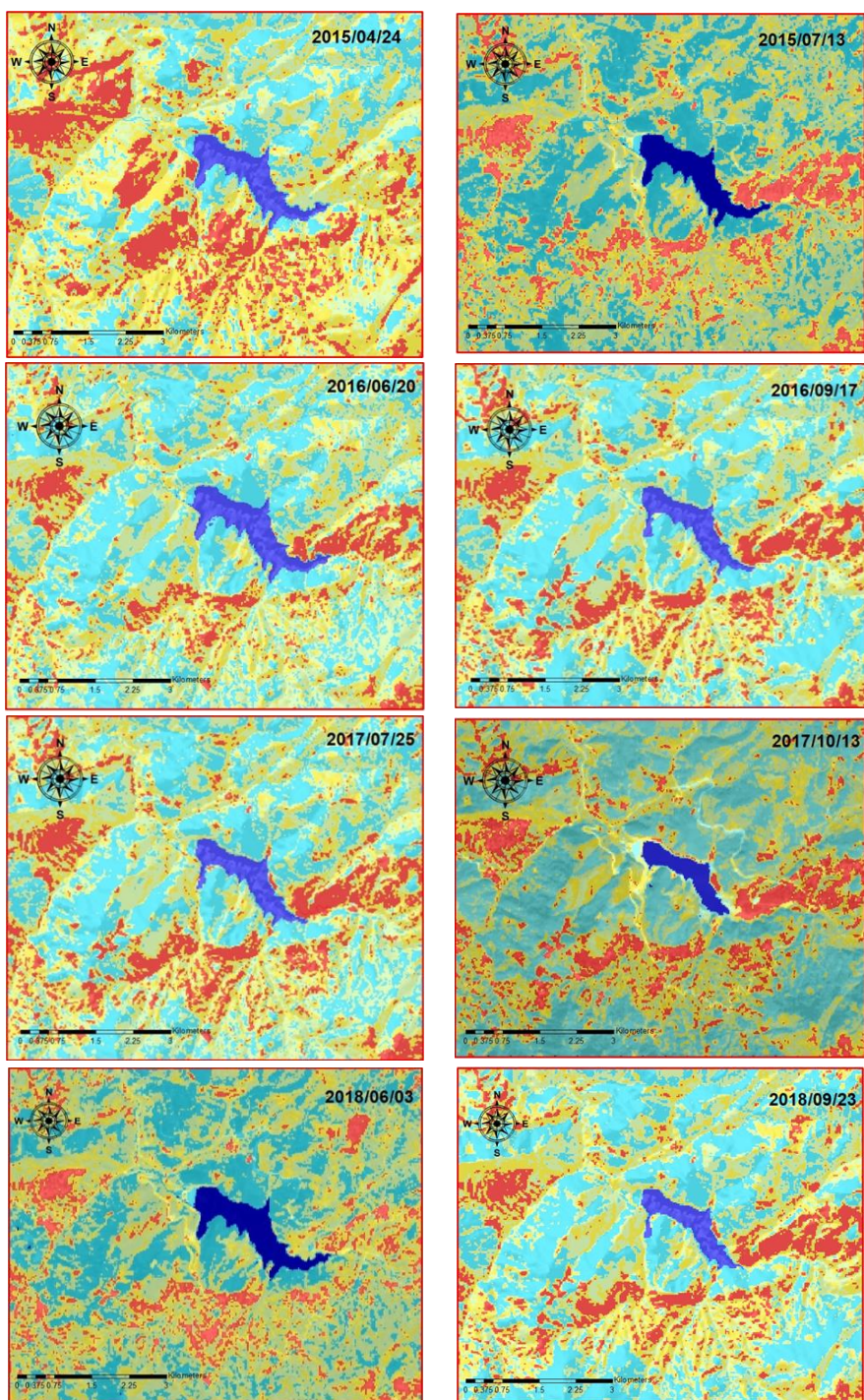
3.2. Uzaktan Algılama İle Baraj Gölü Alanı Değişim Analizi Ve Kuraklık İlişkisi

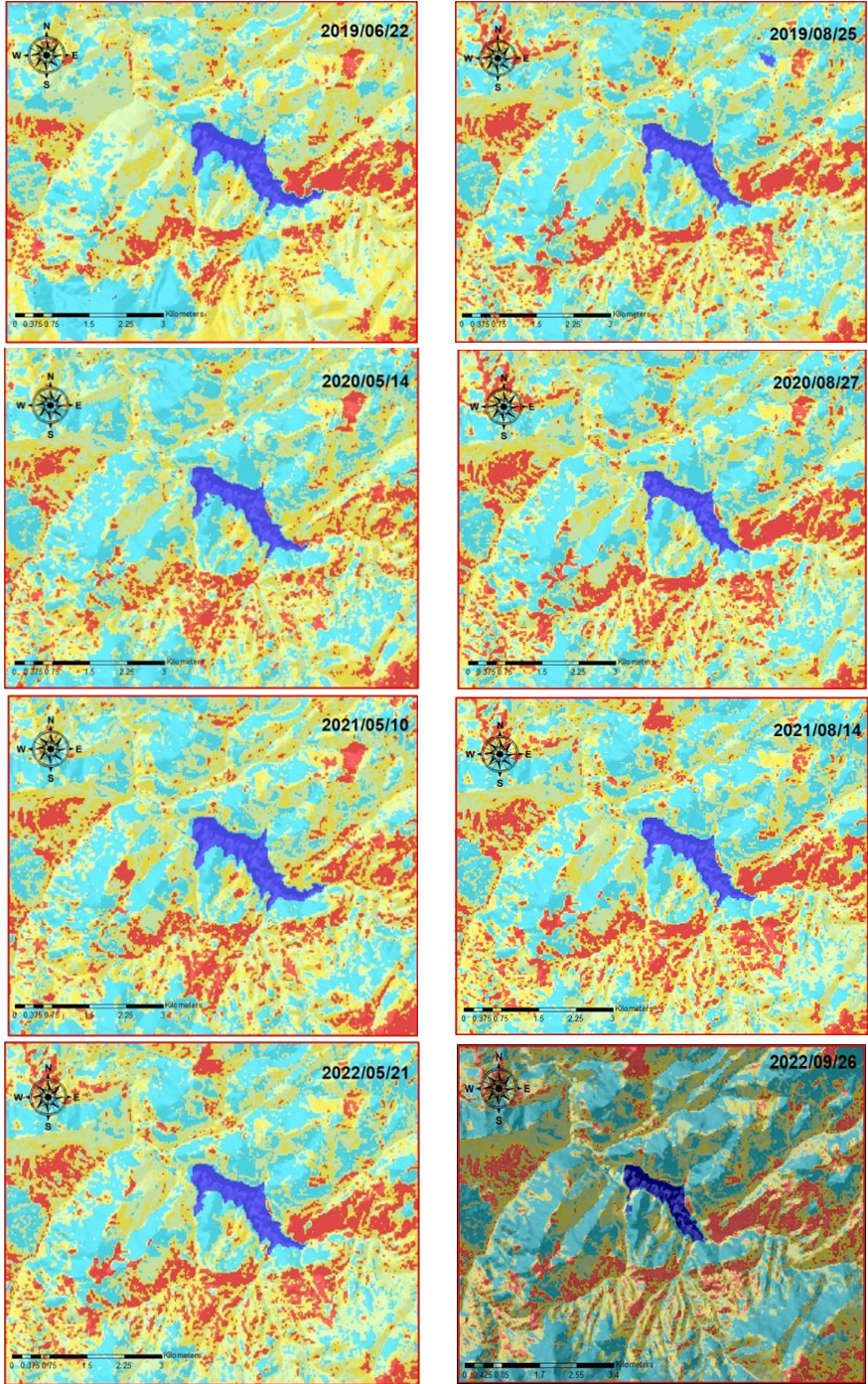
2012-2022 arası 29 Landsat 8 OLI multispektral uydu görüntüsünün yeşil ve NIR bantları kullanılarak oluşturulan NDWI indisi veri setinden Bursa Nilüfer Baraj Gölü alanının kurak dönem sonu uzun yıllar zamansal değişimi belirlenmiştir. İncelenen veri seti dâhilinde göl alanlarının ortalaması 1.17 km^2 ve standart sapması ise 0.24 km^2 'dir. Hidrolojik olarak en kurak yılın $0,6 \text{ km}^2$ göl alanı ile 2018/11/01 yılı olduğu belirlenmiştir. Diğer kurak yıllar en kurak başta olacak şekilde sırasıyla 2018/11/01, 2014/11/06, 2017/10/13 ve 2022/09/26 yıllarıdır. Veri seti dâhilinde göl en geniş sınırlarına ise 1.54 km^2 ile 2018/06/03 yılında ulaşmıştır. Son 10 yılda göl alanı $0,6 \text{ km}^2$ altına hiç düşmemiştir ve ortalama göl alanı 1.17 km^2 'dir (Tablo 4).

Tablo 4: Uydu Görüntüleri Kullanılarak Hesaplanan
Baraj Gölü Su Kütlesi Alanları

No	Görüntüleme Tarihi	Alan (km ²)	No	Görüntüleme Tarihi	Alan (km ²)
1	2013/05/04	1.21	16	2018/11/01	0.6
2	2013/09/25	1.00	17	2019/03/25	1.09
3	2014/06/24	1.01	18	2019/06/22	1.41
4	2014/11/06	0.73	19	2019/08/25	1.16
5	2015/04/24	1.38	20	2020/05/14	1.23
6	2015/07/13	1.37	21	2020/07/10	1.47
7	2016/02/29	1.36	22	2020/08/27	1.01
8	2016/06/20	1.39	23	2021/05/10	1.46
9	2016/09/17	1.26	24	2021/07/13	1.47
10	2017/04/29	1.34	25	2021/08/14	1.17
11	2017/07/25	1.10	26	2022/05/21	1.17
12	2017/10/13	0.8	27	2022/07/24	1.17
13	2018/02/18	0.9	28	2022/08/17	1.16
14	2018/06/03	1.54	29	2022/09/26	0.9
15	2018/09/23	1.00			







Şekil 4: 2013-2022 yılları arası NDWI su indisi haritaları

4. Sonuç

Kuraklık ve etkileri yeryüzünde yaşayan tüm canlıları olumsuz şekilde etkileyen bir doğal afettir. Bu doğal afetin etkilerini azaltabilmek için ayrıntılı bir şekilde incelemek ve doğru modeller oluşturmak gerekmektedir. Kuraklık insan yaşamına da oldukça kötü etkilemektedir. Özellikle kurak bölgelerde bu afetin su kaynaklarına etkisi her yönden incelenmelidir. Bu tür bir inceleme veya araştırma yapılmadığı takdirde içme suyu ve tarımsal gıda temininde büyük ölçüde azalmalar görülebilir. Bu çalışma kapsamında da gerçekleştirmiş olduğumuz uzaktan algılama yöntemleri birçok doğal afeti uydu görüntüleri yardımıyla başarılı bir şekilde analiz edebilme ve değerlendirme imkânı sunmaktadır. Uzaktan algılama verileri kullanarak üretilmiş olan su indisleri, su kütlesi alanlarının tespitinde ve bu alanların meteorolojik verilerle ilişkilendirilmesinde oldukça başarılıdır. Bu çalışmada Bursa ilinin Osmangazi ilçesinde bulunan içme suyu kaynağı ve çok amaçlı kullanılan Nilüfer Barajı gölünün alansal değişimi ve kuraklık analizi incelenmiştir. Baraj gölü alanındaki değişimi gözlemleyebilmek için NDWI su indisi ve meteorolojik veriler kullanılarak haritalar, grafikler ve tablolar oluşturulup incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda 2022 yılında Nilüfer Barajında oldukça büyük bir azalış görülmektedir. Bölgeye düşen yağışların az olması ve bilinçsiz tüketimin fazla olmasıyla birlikte kurak bir dönem gerçekleşmektedir.

Referanslar

- Al-Hameedawi, H. (2021). Remote sensing-based drought assessment using NDWI and SPI in Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06621-3>
- Eraslan, R., & Koç, A. (2022). Kuraklık analizinde uzaktan algılama ve SPI verilerinin karşılaştırılması: Konya Kapalı Havzası örneği. *Türkiye Uzay Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 114–127.
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
- Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. (2019). Global drought frequency, duration, and severity for 1951–2016. *International Journal of Climatology*, 39(1), 44–56.
- Tigistu, D. T., Zaitchik, B. F., & Wimberly, M. C. (2020). Spatial and temporal variability of meteorological and agricultural drought in Ethiopia from 1981 to 2015. *Remote Sensing*, 12(6), 937.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (2022). *Drought in Numbers 2022 Report*.
- Wilhite, D. A., & Pulwarty, R. S. (2017). *Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy* (2nd ed.). CRC Press.
- Zhang, Y., Yuan, Z., & Li, X. (2020). Assessment of meteorological drought characteristics and trends using SPI: A case study in China. *Atmosphere*, 11(5), 467.

3. Bölüm

Sağlık Sistemlerinde Yapay Zeka

Beyza GÜNESEN AKANSU ¹

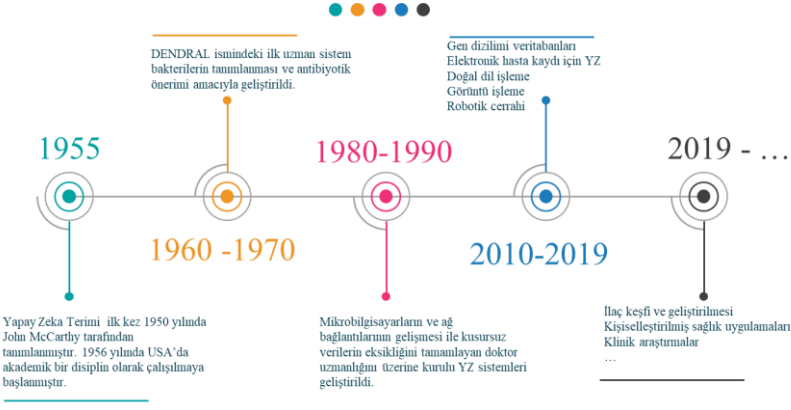
1. Giriş

Yapay Zeka (YZ), makinelerin genellikle insanlar tarafından üstlenilen akıllı görevleri gerçekleştirme yeteneğine sahip olacak şekilde programlandığı bir bilgisayar bilimi alanıdır (Tsang vd., 2020). Bilgisayarlar ve makineler, özel olarak tasarlanmış algoritmalar aracılığıyla verileri anlamak, analiz etmek ve onlardan öğrenmek için YZ tekniklerini kullanmaktadırlar. YZ uygulamaları, eğitim, e-ticaret, robotik, navigasyon, sağlık, tarım, askeriye, pazarlama ve bilgisayar oyunları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. İnsana özgü eleştirel düşünmeyi taklit etmek için bilgisayarları kullanma fikri ilk olarak 1950'de Alan Turing tarafından ortaya atılmıştır. *Computers and Intelligence* kitabında Turing, bilgisayarların insan zekasını taklit etme yeteneğine sahip olup olmadığını belirlemek için daha sonra "Turing Testi" olarak bilinen basit bir test yayınlamıştır. Altı yıl sonra ise John McCarthy, yapay zeka terimini "akıllı makineler yapma bilimi ve mühendisliği" olarak ilk kez tanımlamıştır. YZ, basit "IF-THEN" kurallar dizisi olarak başlamış olup yıllar içinde daha karmaşık algoritmaları içerecek şekilde ilerleme kaydetmiştir. YZ, makine öğrenimi (Machine Learning, ML), derin öğrenme (Deep Learning, DL) ve görüntü işleme gibi tıptaki uzmanlıklara benzeyen birçok alt alanı kapsamaktadır (Kaul vd., 2020). Bu bağlamda, YZ tek bir teknoloji değil, hesaplamalı modeller ve algoritmalar tarafından üretilen bir dizi akıllı süreç ve davranıştır. Son zamanlarda, gelişmiş hesaplama modelleri ve algoritmalar, güçlü bilgisayarlar ve büyük verilerin kullanılabilirliği ile birleştiğinde, özellikle makine öğrenimi, doğal dil işleme (Natural Language Processing, NLP), YZ ses teknolojisi, YZ asistanları ve robotik alanlarında YZ'nin ilerlemesini hızlandırmıştır. Görüntü anlama, konuşma tanıma, büyük veri analitiği ve sağlık hizmetlerindeki karmaşık gerçek hayat problemlerini çözmek için yeni güçlü çözümler geliştirilmiştir (Chen ve Decary, 2020).

¹ Arş. Gör. Beyza GÜNESEN AKANSU, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, beyza.gunesen@ogu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3709-7558

1.1. Yapay Zekanın Sağlık Sektöründe Kullanımı

Sağlık hizmet sistemleri, halk sağlığını iyileştirmek, hastanın bakım deneyimini iyileştirmek, bakıcı deneyimini geliştirmek ve artan bakım maliyetini azaltmak gibi kritik amaçlara ulaşmada zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır (Bajva vd., 2021). Yapay zekanın gücü, çok boyutlu ve çok modlu veri kümelerinden örüntüleri ve ilişkileri öğrenme ve tanıma becerisinde yatmaktadır. Örneğin yapay zeka sistemleri, bir hastanın tüm tıbbi kaydını olası bir teşhisi temsil eden tek bir sayıya çevirebilir. Ayrıca, yapay zeka sistemleri dinamik ve otonomdur, daha fazla veri kullanılabilir hale geldikçe öğrenir ve uyum sağlar. YZ, ilk kez 1976'da, akut karın ağrısının nedenlerini belirlemek için bir bilgisayar algoritması kullanılması ile sağlık alanındaki faaliyetine başlamıştır (Fogel ve Kvedar 2018). YZ 'nin sağlık alanında kullanımına ilişkin özet tarihçesi Şekil 1.'de verilmiştir. Sağlık hizmeti verilerinin kullanılabilirliğindeki artış ve büyük veri analitik yöntemlerinin hızlı gelişimi ile son zamanlarda YZ'nin sağlık hizmetlerindeki başarılı uygulamaları giderek artmaktadır. Güçlü yapay zeka teknikleri, büyük verilerde saklı kalan tıbbi bulguları ortaya çıkarabilmekte ve klinik karar desteği sağlamaktadır (Jiang vd., 2017).



Şekil 1. YZ'nin sağlık sistemlerinde kullanımı tarihçesi

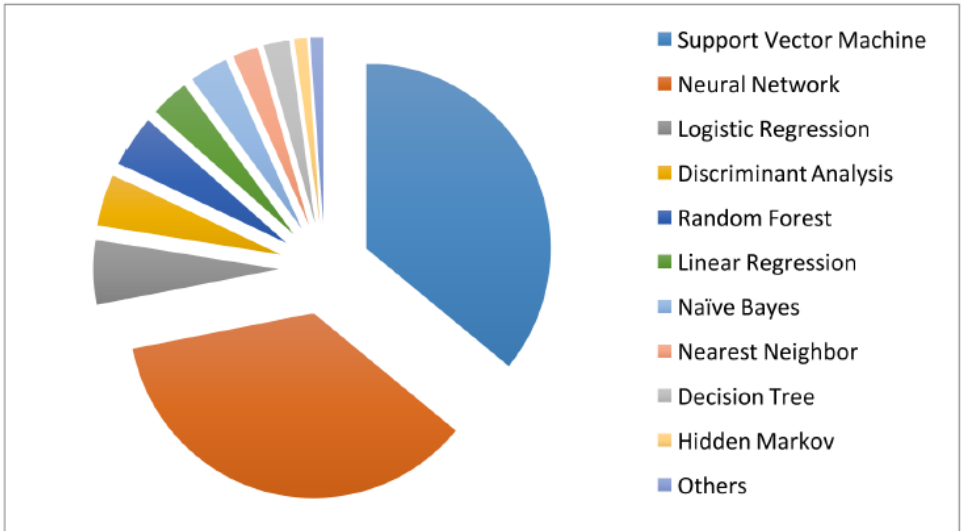
Sağlık sektörü, prosedürleri iyileştirmek ve tıbbi hizmetlerin yönetimini kolaylaştırmak için tıbbi verilere ve analitiklere ihtiyaç duyar. Son yıllarda toplanan tıbbi verilerin miktarı ve boyutları katlanarak genişlemektedir. Tıp uzmanları, araştırmacılar ve hastalar, elektronik sağlık kayıtları, tıbbi görüntüleme verileri ve sağlık izleme cihazları ve uygulamaları dahil olmak üzere çeşitli izleme cihazlarından gelenler başlıca olmak üzere çok büyük miktarda veri üretir (Ali vd., 2023). Bu ortamda YZ teknolojisi, verileri yakalama, işleme,

dinamik analizler yapma ve tıbbi müdahale için etkin bir şekilde kullanılabilirler sonuçlar üretme kapasitesine sahiptir (Comito vd., 2020). Sağlıkta YZ uygulamaları son kullanıcılarına göre hasta, sağlık kuruluşu yönetimi, sağlık endüstrisi olmak üzere genellikle üç kategoriye ayrılmaktadır.

1.2. Sağlıkta En Sık Kullanılan Yapay Zeka Teknolojileri

1.2.1 Makine öğrenmesi

Makine öğrenimi, girdi verilerindeki örüntülerin çıkarımını yaparak tahminleyici modelleri geliştiren ve bu modelleri daha önce karşılaşmamış veriler için yararlı tahminler sağlamak için kullanan bir sistemdir (Chen ve Decary, 2020). Sağlık hizmetlerinde, geleneksel makine öğreniminin en yaygın uygulaması, bir hasta üzerinde hangi tedavi yöntemlerinin başarılı olabileceğini tahmin eden hedefe yönelik tıptır. Makine öğrenimi ve hassas tıp uygulamalarının büyük çoğunluğu, sonuç değişkeninin bilindiği bir eğitim veri seti gerektirmektedir (Davenport ve Kalakota, 2019). Derin öğrenme ve sinir ağı modelleri, makine öğrenimi teknolojisinin daha karmaşık biçimleridir. Radyoloji görüntülerinde potansiyel kanserli lezyonların keşfi, derin öğrenmenin sağlık sektöründeki yaygın kullanımlarından biridir. Destek vektör makineleri ve yapay sinir ağları sağlıkta en sık kullanılan ML teknikleridir (Şekil 2.).



Şekil 2.Sağlık literatüründe kullanılan ML teknikleri (Jiang vd.,2017)

1.2.2 Doğal dil işleme

Doğal dil işleme, çoğunlukla metin biçimindeki insan dillerini otomatik olarak analiz etmek ve temsil etmek için hesaplamalı yöntemler kullanmaktadır (Bajwa vd., 2021). Son zamanlarda, makine öğrenmesi yöntemleri doğal dil işlemeye uygulanarak konuşma tanıma, makine çevirisi, metin sınıflandırma, soru yanıtlama, duygu analizi, bilgi çıkarma ve arama motorunda etkileyici sonuçlar elde etmiştir. Sağlık hizmetlerinde doktor notları, test sonuçları, laboratuvar raporları, ilaç siparişleri ve taburcu talimatları şeklinde çok büyük miktarda yapılandırılmamış metinsel veri bulunmaktadır. Doğal dil işleme araçları, bu tür zengin tanımlayıcı verilerden hastalar hakkında kritik bilgileri çıkarmak için kullanılabilir ve teşhislerin ve tedavi önerilerinin iyileştirilmesine yardımcı olur.

1.2.3 Robotik cerrahi

Tıbbi robotlar son yıllarda tıp endüstrisinde büyük bir ilgi görmüştür. Bu robotlar, hassas hareket yetenekleri ile cerrahi operasyonları kolaylaştırmak, minimal nüfuz etme girişimlerini gerçekleştirmek ve hastaların iyileşme süreçlerini hızlandırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, iyileştirme ve fizyoterapi gibi alanlarda da kullanılan robotlar, engellilerin hayat kalitesini artırmak için robotik protezler sunabilmektedir. Bunun yanı sıra, robotlar terapi, danışmanlık gibi sosyal etkileşim görevlerinde kullanılabilmektedir. Yapay zeka destekli cerrahi robotlar, tıbbi kayıtlardan verileri analiz ederek bir cerraha gerçek zamanlı rehberlik yaparak cerrahi operasyonların daha güvenli ve başarılı olmasına yardımcı olabilmektedir (Chen ve Decary 2020).

2. Sağlık Sistemlerinde Yapay Zeka Uygulamaları

Tıp alanında üretilen bilgiler çok geniş bir alanı kapsamakta, hızla büyümekte ve hem hacim hem de çeşitlilik olarak büyümeye devam etmektedir. Buna paralel olarak, yapay zekanın, tıp ve sağlık alanındaki gelişmeler üzerindeki potansiyeli muazzamdır ve yapay zeka teknolojileri sürekli gelişmektedir. Yapay zekanın sağlık sistemlerinde kullanımı dört ana başlıkta sınıflandırılabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Sağlıkta yz uygulamalarının sınıflandırılması

2.1. Tanı ve Tedavi Uygulamaları

2.1.2 Tanı

Sağlık alanında YZ'nin kullanılmasını gerektiren için en acil ihtiyaç, hastalıkların teşhis edilmesidir. YZ, sağlık profesyonellerinin farklı hastalık türleri için erken ve daha doğru tanı koymasına olanak tanır (Rong vd.,2019). Ana tanı sınıflarından biri, biyosensörler veya biyoçipler kullanan in vitro tanıya dayanmaktadır. Örneğin, çok önemli bir tanı aracı olan gen tanımlaması, yapay zekanın anormallikleri sınıflandırmak ve saptamak için mikrodizi verilerini yorumladığı makine öğrenimi ile analiz edilebilmektedir. Son zamanlarda kanser teşhisi için kanser mikrodizi verilerini sınıflandırılması bu uygulamaya örnek olarak verilebilir. Bir başka önemli hastalık teşhisi sınıfı, tıbbi görüntüleme (iki boyutlu) ve sinyal (tek boyutlu) işlemeye dayanmaktadır. Bu tür teknikler, hastalıkların teşhisi, yönetimi ve tahmininde kullanılmıştır (Bohr ve Memarzadeh., 2020). Tek boyutlu sinyal işleme için, elektroensefalografi (EEG), elektromiyografi (EMG) ve elektrokardiyografi (EKG) gibi biyomedikal sinyal özellik çıkarımına YZ uygulanmıştır.

2.1.3 Tedavi

Klinik YZ uygulamaları, hastaların belirtileri ve demografik verileri temel alınarak, hastalıklara özgü tedavi algoritmalarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Özellikle onkoloji alanında, bireysel biyopsi sonuçlarına dayalı olarak hastaya özel ilaç kombinasyonlarının oluşturulmasında YZ etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Gerke vd., 2020). Cerrahi tedavi yöntemlerinde ise YZ destekli robot teknolojileri, üç boyutlu görüntüleme, titreme kontrolü, organ, doku ve sinirlere hassas erişim gibi avantajları sayesinde cerrahlara hem ergonomik kolaylık sağlamakta hem de operasyonların başarısını artırmaktadır (Walters ve Eley, 2011).

YZ araçlarının uygulandığı klinik ortamlarda birçok etkileyici örnek mevcuttur ve bunların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Radyoloji: Görüntüleme AI teknolojileri, radyologlara tıbbi görüntü ölçümü çalışmalarında yardımcı olmaktadır. Örneğin, anatomik yapıların veya lezyonların sınırlarını otomatik olarak lokalize etmeyi ve tanımlamayı sağlayan derin ağ modelleri kullanılarak, sınırlı insan denetimiyle segmentasyon sağlanmıştır (Peng ve Wang, 2021).

Dijital Patoloji: "Dijital patoloji" terimi başlangıçta, ileri slayt tarama teknikleri kullanarak cam slaytları dijital görüntülere dönüştürme sürecini içermek üzere kullanılmıştır. Ancak şimdi aynı zamanda, dijitalleştirilmiş görüntülerin tespiti ve analizi için yapay zeka temelli yaklaşımlara da atıfta bulunmaktadır (Bera vd., 2019; Niazi vd., 2019).

Acil Tıp: Acil tıp, hasta yönetiminin farklı aşamalarında YZ'den yararlanabilir. Örneğin, triyaj sırasında gelişmiş hasta önceliklendirmesi için potansiyel değer sunar ve sağlık hizmetlerinde yapay zeka, hastanın klinik geçmişinin farklı unsurlarını analiz etmede çok yönlüdür (Berlyand vd., 2019; Kirubarajan vd., 2020). Bununla birlikte, acil servis akış ölçümlerinin ve kaynak tahsisinin yapay zekâ güdümlü karar verme yoluyla optimize edilmesi potansiyeli vardır (Berlyand vd., 2018).

Risk Tahmini: Risk tahmin modelleri uzun süredir sağlık hizmetlerinde mevcuttur. Genellikle regresyon analizine ve mevcut klinik verilerin alt kümelerine dayanmaktadır ve bu da tahminlerin daha az tahmin doğruluğu ile sonuçlanır. Büyük veri havuzlarının ve yapay zeka tekniklerinin ortaya çıkışı, yapay zekanın risk tahmini için hastaya özel geleneksel yaklaşımları uyarlamadaki faydasına dair umut verici işaretler göstermiştir (Islam vd., 2019). Örneğin, kardiyovasküler hastalık risk değerlendirmelerindeki tahmine dayalı YZ tabanlı modeller, istatistiksel olarak türetilmiş tahmine dayalı risk modellerine kıyasla daha iyi performans göstermiştir (Jamthikar vd., 2019).

Evde Sağlık: YZ, kronik ve yaşlıları etkileyen hastalıkların kendi kendine yönetiminde önemli bir rol oynayabilir. Öz yönetim görevleri, ilaç almaktan hastanın diyetini ayarlamaya ve sağlık cihazlarını yönetmeye kadar uzanır. Evde izleme, fiziksel alanı ve düşmeleri takip ederek bağımsızlığı artırma ve evde yaşlanmayı iyileştirme potansiyeline sahiptir. Özellikle araçlar, yazılımlar, akıllı telefon ve mobil uygulamalar, hastaların kendi sağlık hizmetlerinin büyük bir bölümünü yönetmelerini ve sağlık sistemi ile etkileşimlerini kolaylaştırmalarını sağlayabilir (Sapci vd., 2019).

Kardiyoloji: en önemli uygulaması, kardiyolojide kardiyak yapı ve fonksiyonun değerlendirilmesi için gerekli olan kardiyak görüntüleme verilerinin otomatik olarak işlenmesi içindir (Lopez-Jimenez vd., 2020). Kardiyak ultrason,

kardiyak bilgisayarlı tomografi ve kardiyovasküler manyetik rezonans görüntüleme gibi kardiyak görüntüleme işlemleri, kardiyologlar tarafından işlenmesi zahmetli ve zaman alan karmaşık uzay-zamansal veriler oluşturmaktadır. Yapay zekâ güdümlü yeni kardiyak görüntü işleme teknikleri sayesinde kardiyologların hastaları günlük uygulamalarında daha hızlı değerlendirmelerini sağlanmış ve kardiyak klinik uygulamalarında gelişme katedilmiştir (Lopez-Jimenez vd., 2020).

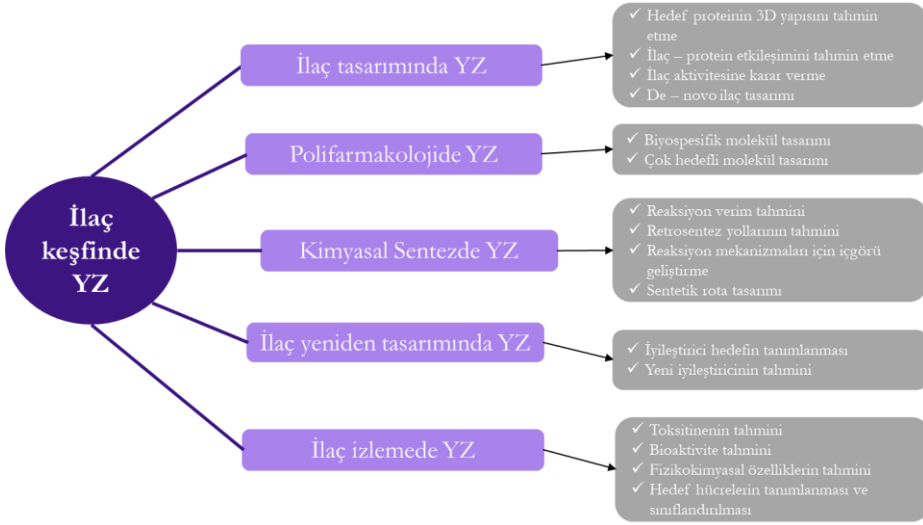
Mental Sağlık: YZ'nin ruh sağlığı hastalarına destek verme ve ruh sağlığı koşullarına adanmış sağlık personeli eksikliğinin etkilerini hafifletme potansiyeli vardır. Aslında, çeşitli araçlar şu anda geliştirilme aşamasındadır. Bunlar, klavye etkileşimi, konuşma, ses, yüz tanıma, sensörler ve etkileşimli sohbet robotlarının kullanımı yoluyla depresyon ve ruh halinin dijital olarak izlenmesini içerir (Firth vd., 2017).

2.2. Biyomedikal Araştırmalar

Son yıllarda, biyomedikal araştırmalar, veri toplama, dağıtma ve kullanma ile bağlantılı yeni materyaller ve deneysel uygulamalarla sağlanan veri merkezli bir faaliyet haline gelmiştir (Blasimme ve Vayena, 2019). Biyomedikal araştırmalar, klinik uygulamalara kıyasla yapay zekadan türetilen çözümlerden daha fazla yararlanmaktadır. Örneğin, ana akım tıbbi bilgi kaynakları, kullanıcıların arama davranışından sürekli olarak öğrenen algoritmalar da dahil olmak üzere, arama sonuçlarını sıralamak için makine öğrenimi algoritmalarını kullanmaktadır. (Fiorini vd., 2018a). Biyomedikal literatür için yaygın olarak kullanılan bir arama motoru olan PubMed örnek olarak verilebilmektedir (Fiorini vd., 2018b). PubMed kullanıcıların arama işlemlerini optimize etmek adına makine öğrenimi ve doğal dil işleme gibi yapay zeka algoritmalarını kullanmaktadır.

2.2.1 İlaç Keşfi

10^{60} 'tan fazla molekül içeren geniş kimyasal uzay, ilaç moleküllerinin gelişimini teşvik etmektedir. Öte yandan, ileri teknolojilerin eksikliği, ilaç geliştirme sürecini sınırlayarak, zaman alıcı ve pahalı bir görev haline getirir bu noktada YZ tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır (Paul vd. 2021). Yapay zeka, isabet ve öncü bileşikler tanıyabilmekte ve ilaç hedefinin daha hızlı doğrulanmasını ve ilaç yapısı tasarımının optimizasyonunu sağlayabilmektedir (Agrawal, P.,2018). Yapay zekanın ilaç keşfindeki farklı uygulamaları Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. İlaç keşfinde YZ

2.3. Halk Sağlığı

Halk sağlığı, toplumun, kamu ve özel kuruluşların, toplulukların ve bireylerin organize çabaları ile bilinçli tercihleri doğrultusunda hastalıkların önlenmesi, yaşam süresinin uzatılması ve genel sağlığın iyileştirilmesini amaçlayan bir bilim ve uygulama alanıdır (Wanless, 2004). Algoritmaların halk sağlığı araştırmalarında ve uygulamalarında kullanımları, nüfus sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sağlık, sağlık hizmetleri sistemleriyle sınırlı olmayan çeşitli sosyal parametrelerden (örneğin gelir, eğitim, beslenme alışkanlıkları, çevresel faktörler) etkilenir. Sağlık ve çeşitli sosyal koşullar arasındaki belirli etkileri ve etkileşimleri anlamak, daha etkili ve verimli halk sağlığı programlarının geliştirilmesine yol açabilir. Sosyobelirteçler kullanan yapay zeka destekli çok düzeyli modelleme örnekleri, bu tür bir potansiyeli zaten göstermiştir. Halk sağlığında YZ uygulamasının belirli bir alanı, hastalık gözetimidir. Süveyans sistemleri hastalık insidansını, salgınları ve sağlık davranışlarını izler. Tipik olarak bu sistemler devlet tarafından finanse edilir ve devlet tarafından işletilir. Amaçları, popülasyonların sağlığını izlemek ve ardından sağlığı iyileştirmek için gerekli müdahale türleri ve kaynakların tahsisi için karar vermeyi desteklemektir. Veriye dayalı bir etkinlik olarak gözetim, algoritmik kullanımlardan önemli ölçüde yararlanabilir. Algoritmalar, belirli sağlık sonuçlarıyla ilgili değişkenleri sıralayabilir, kalıpları ve sinyalleri çok daha hızlı tanıyabilir ve salgınları tahmin etmek ve yörüngelerini modellemek için kullanılabilir. Bu tür algoritmalar, yalnızca devlet kurumları tarafından gözetim için toplanan standart sağlık

verilerini değil, aynı zamanda sosyal medya aracılığıyla gerçek dünya verilerini de araştırmak için kullanılmaktadır.

2.4. Sağlık Yönetimi

Sağlık sistemleri, hastalar, sağlık profesyonelleri, sağlık tesisleri ve kuruluşları, görüntüleme tesisleri, laboratuvarlar dâhil olmak üzere çok çeşitli aktörler ve kurumlarla yoğun bir idari iş akışı ile karakterize edilir. Eczaneler, ödeme yapanlar ve düzenleyiciler de bu sürecin bir parçasıdır. Bu sistemlerde, mali geri ödemenin geri alınması, çeşitli entegre edilmemiş uygulamaya dayalı bilgi sistemlerine veri girilmesi, hastanelerden ve diğer dış sağlayıcılardan alınan bilgilerin işlenmesi ve hastaların parçalanmış bir sağlık sisteminde gezinmesine yardımcı olmak için yoğun zaman harcanmaktadır. Uygulama süresinin %50'sinden fazlasının bürokrasiye harcandığı ve bunların çoğunun potansiyel olarak kaçınılabilir olduğu sonucuna varılmıştır (Clay ve Stern, 2015). YZ, bu rutin görevleri daha verimli, doğru ve tarafsız bir şekilde gerçekleştirebilme potansiyeline sahiptir. İdari faaliyetlerdeki hataların klinik ortamdaki hatalardan daha az ciddi olması yapay zekanın bu uygulamalarda kullanılmasının önünü açmıştır.

3. Yapay Zekanın Sağlık Sektörüne Getirdiği Avantajlar

Yapay zekanın sağlık sektöründeki uygulamaları, YZ'nin sektörün farklı alanlarına birçok avantaj sağladığını açıkça göstermektedir. Bu bölümde en yaygın avantajlar özetlenmiş olup literatürde içerikteki alanların dışında avantaj getirme potansiyeli yüksek farklı çalışmalar ve alanlar yer almaktadır (Athanasopoulou vd., 2022).

Görüntü işleme, veri analizi, sistemler arası entegrasyon gibi süreçlerde yapay zeka teknolojilerinin kullanımı ile hastalıkların erken teşhisine yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Örneğin, bilgisayarlı tomografi (BT) veya manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi görüntüleme yöntemleriyle elde edilen görüntüler, yapay zeka algoritmaları tarafından incelenerek ve potansiyel anormallikler tespit edilebilmektedir. Bu sayede, kanser, tümörler veya diğer rahatsızlıklar daha erken aşamalarda teşhis edilebilmektedir. Erken teşhis ile hastalığın ilerlemesi durdurulabilmekte veya daha az hasar ile hastalığın geçirilmesi sağlanabilmektedir. YZ'nin sağlık sektörüne sağladığı en büyük getiri hastalıkların erken dönemlerde teşhis edilmesine imkân vermesidir.

Tedavi planlarının özelleştirilmesi, YZ'nin sağlık sektörüne getirdiği bir diğer önemli avantaj olarak kabul edilmektedir. YZ, hastaların klinik özellikleri ve laboratuvar sonuçları gibi verileri analiz ederek, tedavi seçeneklerini sıralayabilmekte ve yan etki olasılıklarını değerlendirebilmektedir. Bu şekilde,

doktorların daha bilinçli kararlar alabilmesine ve hastalara daha iyi bir tedavi sunulmasına destek verilebilmektedir.

Zorlu ekonomik koşullarla başa çıkabilmek, her sektörde olduğu gibi sağlık sektörü için de birincil hedefler içerisinde yer almaktadır. Yapay zekâ algoritmaları, tekrarlayan ve zaman alıcı görevleri otomatikleştirerek iş gücü maliyetlerini azaltabilmektedir. Örneğin, yapay zeka destekli robotlar veya otomatikleştirilmiş yazılımlar, laboratuvar testleri, veri analizi veya belge işleme gibi görevleri daha hızlı ve daha verimli bir şekilde gerçekleştirebilir. Bu, personel maliyetlerini düşürebilir ve insan kaynaklarının daha stratejik görevlere odaklanmasına olanak tanır. Yapay zeka destekli uzaktan bakım sistemleri, hastaların evde veya uzaktan takip edilmesine ve danışmanlık hizmetlerinin sunulmasına imkan vermektedir. Bu, hastaların sık hastane ziyaretleri yapmasını ve sağlık hizmetlerine gereksiz maliyetlerin eklenmesini önleyebilir. Yapay zeka, uzaktan izleme verilerini analiz ederek, hastaların durumu hakkında bilgi sağlayabilir ve gerektiğinde müdahaleleri yönlendirebilir. Maliyetlerin düşürülmesi ve kaynakların verimli kullanımı ile sağlık hizmeti ekonomisinin iyileştirilmesi YZ'nin etkin kullanımı ile gerçekleştirilebilmektedir.

Yapay zeka destekli telemedicine ve uzaktan danışmanlık platformları, sağlık hizmetlerine erişimi kolaylaştırabilir. Hastalar, cep telefonları veya bilgisayarları aracılığıyla doktor görüşmeleri yapabilmektedir. Böylece uzak bölgelerde yaşayan veya ulaşım imkânları sınırlı olan insanların sağlık hizmetlerine erişiminde kolaylık sağlanmaktadır.

4. Yapay Zekanın Sağlık Sektöründe Karşılaştığı Zorluklar

YZ'nin sağlık hizmetleri ile ilgili kullanımının önündeki zorluklar, veri toplama, teknoloji geliştirme, klinik uygulama, etik ve sosyal konular gibi farklı aşamalarda ortaya çıkmaktadır. Verilerin eksikliği, kalitesi, veri paylaşımında isteksizlik ve yanlışlık YZ'nin doğru sonuçlar üretmesini engelleyebilir. YZ uygulamalarının geliştirilmesi zaman ve maliyet gerektirirken, klinik ortamlarda kullanımda doğruluk, güvenilirlik ve etkililik hakkında yeterli kanıtlar sunmak gerekmektedir. YZ uygulamalarının kullanımı, etik ve sosyal sorunlara yol açabilir (Jassar vd.,2022). Bu sorunların çözümü için, sağlık sektöründe paydaşların birlikte çalışması, YZ uygulamalarının geliştirilmesi, eğitimi ve kullanımı hakkında daha bilinçli olmaları gerekmektedir. Ayrıca, etik ve sosyal konuların ele alınması (Lekadir vd., 2022) ve gizlilik, güvenlik ve mahremiyet gibi konuların korunması için uygun yasal çerçeveler oluşturulması önemlidir. YZ uygulamalarında karşılaşılan başlıca zorluklar izleyen bölümde sınıflandırılmıştır.

- Veri toplama: YZ modellerinin eğitilmesi için yeterli miktarda doğru veriye ihtiyaçları vardır. Ancak, bazen sağlık hizmeti verenlerin veya hastaların veri paylaşımına isteksiz olmaları gibi nedenlerle yeterli veri elde etmek zor olabilir. Verilerin kalitesi de bir zorluk olabilir; verilerin eksik, hatalı veya yanlış olması, YZ'nin doğru sonuçlar üretmesini engelleyebilir.
- Teknoloji geliştirme: YZ uygulamaları geliştirirken, algoritmaların doğru şekilde tasarlanması, eğitim setlerinin uygun bir şekilde hazırlanması ve verilerin analiz edilmesi için uygun altyapının kurulması gereklidir. Ancak, bu teknolojilerin geliştirilmesi zaman alabilir ve maliyetli olabilir.
- Klinik uygulama: YZ uygulamaları klinik ortamlarda kullanıldığında, doktorların, hemşirelerin ve diğer sağlık çalışanlarının uygun bir şekilde eğitilmesi gereklidir. Ayrıca, YZ uygulamalarının güvenilirliği, doğruluğu ve etkililiği hakkında yeterli kanıt sağlanması da önemlidir.
- Etik ve sosyal konular: YZ uygulamalarının kullanımı, etik ve sosyal sorunlara yol açabilir. Örneğin, bazı insanlar YZ tarafından alınan kararlara güvenmeyebilirler veya YZ uygulamalarının kullanımının insanların mahremiyetini ihlal edebileceği endişesi olabilir. Ayrıca, YZ uygulamalarının kullanımı, bazı hastaların diğerlerine göre daha iyi sağlık hizmeti almasına neden olabilir ve bu da adalet sorunlarına yol açabilir.



Şekil 5. Uygulamada Karşılaşılan Zorluklar (Aung vd., 2021)

Bu zorlukların üstesinden gelmek için, sağlık sektöründeki paydaşların birlikte çalışması ve YZ uygulamalarının geliştirilmesi, eğitimi ve kullanımı hakkında daha iyi bir anlayışa sahip olması gereklidir. Ayrıca, etik ve sosyal konuların ele alınması ve gizlilik, güvenlik ve mahremiyet gibi konuların korunması için uygun yasal çerçeveler oluşturulması önemlidir.

KAYNAKÇA

- Agrawal, P. (2018). Artificial intelligence in drug discovery and development. *Journal of Pharmacovigilance*, 6(2), 1000e173.
- Ali, O., Abdelbaki, W., Shrestha, A., Elbasi, E., Alryalat, M. A. A., & Dwivedi, Y. K. (2023). A systematic literature review of artificial intelligence in the healthcare sector: Benefits, challenges, methodologies, and functionalities. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(1), 100333.
- Athanasopoulou, K., Daneva, G. N., Adamopoulos, P. G., & Scorilas, A. (2022). Artificial Intelligence: The Milestone in Modern Biomedical Research. *BioMedInformatics*, 2(4), 727-744.
- Aung, Y. Y., Wong, D. C., & Ting, D. S. (2021). The promise of artificial intelligence: a review of the opportunities and challenges of artificial intelligence in healthcare. *British medical bulletin*, 139(1), 4-15.
- Bajwa, J., Munir, U., Nori, A., & Williams, B. (2021). Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. *Future healthcare journal*, 8(2), e188.
- Bera K, Schalper KA, Rimm DL, Velcheti V, Madabhushi A. Artificial intelligence in digital pathology - new tools for diagnosis and precision oncology. *Nat Rev Clin Oncol*. 2019;16(11):703-715.
- Berlyand Y, Raja AS, Dorner SC, et al. How artificial intelligence could transform emergency department operations. *Am J Emerg Med*. 2018;36(8):1515-1517.
- Blasimme, Alessandro and Vayena, Effy, The Ethics of AI in Biomedical Research, Patient Care and Public Health (April 9, 2019). Oxford Handbook of Ethics of Artificial Intelligence, Forthcoming , Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3368756> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3368756>
- Bohr, A., & Memarzadeh, K. (2020). The rise of artificial intelligence in healthcare applications. In *Artificial Intelligence in healthcare* (pp. 25-60). Academic Press.
- C. Comito, D. Falcone and A. Forestiero, "Current Trends And Practices In Smart Health Monitoring And Clinical Decision Support," 2020 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), Seoul, Korea (South), 2020, pp. 2577-2584, doi: 10.1109/BIBM49941.2020.9313449.
- Chen, M., & Decary, M. (2020, January). Artificial intelligence in healthcare: An essential guide for health leaders. In *Healthcare management forum* (Vol. 33, No. 1, pp. 10-18). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

- Clay H, Stern R. 'Making time in general practice', Primary Care Foundation, 1–83, 2015
- Davenport, T., & Kalakota, R. (2019). The potential for artificial intelligence in healthcare. *Future healthcare journal*, 6(2), 94.
- Fiorini N, Canese K, Starchenko G, Kireev E, Kim W, Miller V, Osipov M, Kholodov M, Ismagilov R, Mohan S, Ostell J, Lu Z. 'Best Match: New relevance search for PubMed', *PLoS Biol.* 2018b;16(8):e2005343.
- Fiorini N, Leaman R, Lipman DJ, Lu Z. How user intelligence is improving. PubMed. *Nat Biotechnol.* 2018a.
- Firth J, Torous J, Nicholas J, Carney R, Pratap A, Rosenbaum S, Sarris J. 'The efficacy of smartphone-based mental health interventions for depressive symptoms: a meta-analysis of randomized controlled trials', *World Psychiatry.* 2017;16(3):287-298
- Fogel AL, Kvedar JC. Artificial intelligence powers digital medicine. *Npj Digit Med* [Internet] 14 March 2018
- Gerke, S., Minssen, T., & Cohen, G. (2020). Ethical and legal challenges of artificial intelligence-driven healthcare. In *Artificial intelligence in healthcare* (pp. 295-336). Academic Press.
- Islam MM, Nasrin T, Walther BA, Wu CC, Yang HC, Li YC. 'Prediction of sepsis patients using machine learning approach: a meta-analysis', *Comput Methods Programs Biomed.* 170:1-9, 2019.
- Jamthikar AD, Gupta D, Saba L, Khanna NN, Viskovic K, Mavrogeni S, Laird JR, Sattar N, Johri AM, Pareek G, Miner M, Sfrikakis PP, Protogerou A, Viswanathan V, Sharma A, Kitas GD, Nicolaides A, Kolluri R, Suri JS. 'Artificial intelligence framework for predictive cardiovascular and stroke risk assessment models: A narrative review of integrated approaches using carotid ultrasound', *Comput Biol Med.*;126:104043, 2020.
- Jassar, S., Adams, S. J., Zarzeczny, A., & Burbridge, B. E. (2022, May). The future of artificial intelligence in medicine: Medical-legal considerations for health leaders. In *Healthcare Management Forum* (Vol. 35, No. 3, pp. 185-189). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., ... & Wang, Y. (2017). Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke and vascular neurology*, 2(4).
- Kaul, V., Enslin, S., & Gross, S. A. (2020). History of artificial intelligence in medicine. *Gastrointestinal endoscopy*, 92(4), 807-812.
- Kirubarajan A, Taher A, Khan S, Masood S. 'Artificial intelligence in emergency medicine: A scoping review', *J Am Coll Emerg Physicians Open.*;1(6):1691-1702, 2019

- Lekadir, K., Quaglio, G., Garmendia, A. T., & Gallin, C. (2022). Artificial intelligence in healthcare applications, risks, and ethical and societal impacts. EPRS (European Parliamentary Research Service).
- Lopez-Jimenez F, Attia Z, Arruda-Olson AM, Carter R, Chareonthaitawee P, Jouni H, et al. 'Artificial Intelligence in Cardiology: Present and Future', *Mayo Clin Proc*; 95(5):1015–39, 2020.
- Niazi MKK, Parwani AV, Gurcan MN. 'Digital pathology and artificial intelligence', *Lancet Oncol.*; 20(5):e253-e261, 2019.
- Paul, D., Sanap, G., Shenoy, S., Kalyane, D., Kalia, K., & Tekade, R. K. (2021). Artificial intelligence in drug discovery and development. *Drug discovery today*, 26(1), 80.
- Peng J, Wang Y. 'Medical Image Segmentation with Limited Supervision: A Review of Deep Network Models', *IEEE Access.*; 99:, 2021.
- Rong, G., Mendez, A., Assi, E. B., Zhao, B., & Sawan, M. (2020). Artificial intelligence in healthcare: review and prediction case studies. *Engineering*, 6(3), 291-301.
- Sapci AH, Sapci HA. 'Innovative assisted living tools, remote monitoring technologies, artificial intelligence-driven solutions, and robotic systems for aging societies: systematic review', *JMIR Aging* ;2(2):e15429, 2019.
- Tsang, K. C. H., Pinnock, H., Wilson, A. M., & Shah, S. A. (2020). Application of machine learning to support self-management of asthma with mHealth. *The 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society* (pp. 5673–5677).
- Walters, L., & Eley, S. (2011). Robotic-assisted surgery and the need for standardized pathways and clinical guidelines. *AORN journal*, 93(4), 455-463.
- Wanless D. 'Securing Good Health for the Whole Population', HM Treasury; 2004.

4. Bölüm

ASTM E92 Standardına Göre Vickers Sertlik Ölçme Deneyinde Belirsizlik Hesaplamasının İncelenmesi

Bülent AYDEMİR¹

ÖZET

Bu çalışmada, Vickers ve Knoop sertlik ölçüm yöntemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri için ölçüm belirsizliğinin hesabı ele alınmıştır. Vickers ve Knoop sertlik ölçümleri yapan laboratuvarların ölçüm belirsizliği hesabında hangi belirsizlik bileşenlerini hesaba katacağı ve belirsizlik bileşenlerinin belirlenme yöntem ile toplam ölçüm belirsizliğinin hesabı detaylı olarak açıklanmıştır. Çalışmanın hazırlanmasında ASTM E92 standardı esas alınmıştır. Standartta tarif edilen farklı durumlarda için belirsizlik formülleri tek tek ele alınmıştır. Ayrıca her durum için farklı ölçüm belirsizliği sayısal hesap örnekleri verilmiştir. Bu sayede kullanıcıların ölçüm belirsizliği hesabını kolay bir şekilde gerçekleştirme yönteminin tarif edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile kullanıcılara ASTM E92 standardına göre ölçüm belirsizliği hesabı sayısal örneklerle açıklanarak bu alanda çalışma yapacak kişilere rehber bir çalışma olması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ASTM E92, Vickers, Belirsizlik hesabı, Ölçüm belirsizliği

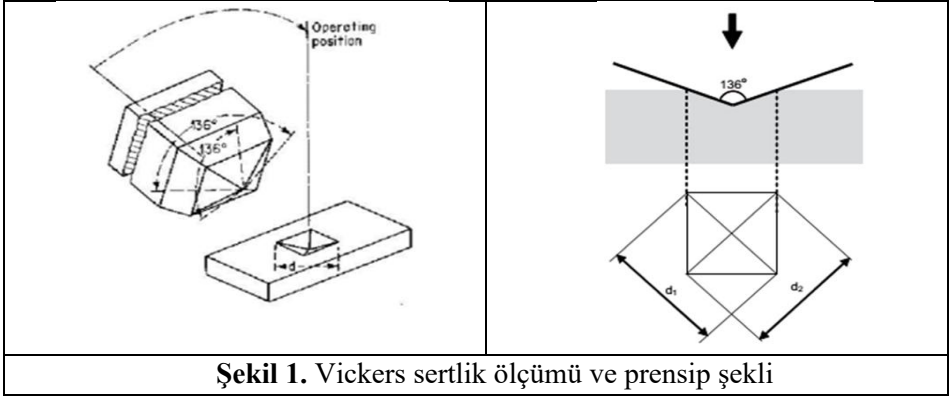
¹ Prof.Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., DÜBİT Laboratuvarı, Düzce, TÜRKİYE, bulentaydemir@duzce.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6848-2681

1. GİRİŞ

Sertlik, malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bu tanıma göre malzemenin şekil değiştirmeye, çizilmeye, sürtünmeye veya kesmeye karşı gösterdiği dirence sertlik denir. Sertlik, Uluslararası Birimler Sistemi SI'da yer almayan konvansiyonel bir büyüklüktür. Sertlik değerleri, "maksimum çekme dayanımı" gibi tasarım aşamasında doğrudan kullanılamamaktadır; ancak, elde edilen sonuçlar diğer mekanik özelliklerin tahmininde veya malzemeler ya da imalat usulleri arasında bir mukayese yapmak için kullanılabilir.

Sertlik ölçümü için pek çok ölçüm metodu vardır. Bunlardan en bilinenleri Rockwell, Brinell, Vickers, Knoop statik sertlik ölçüm yöntemleridir. Bu çalışmada Vickers ve Knoop sertlik ölçüm yöntemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri için belirsizlik hesabı örnekleri verilecektir. Temel olarak Vickers yönteminde kare tabanlı, karşılıklı yüzeyleri arasındaki açı değeri 136^0 olan dik piramit biçimindeki elmas bir batıcı ucun deney parçasının yüzeyine belirli bir kuvvet ile bastırılır ve ortaya çıkan izin köşegen uzunluğu ölçülür (Şekil 1). Daha sonra aşağıda verilen formül yardımı ile Vickers sertlik değeri hesaplanır (Tablo 1). Yada EN ISO 6507-4 standardında verilen tablolar kullanılarak sertlik değeri belirlenebilir. Vickers sertlik ölçme yöntemi EN ISO 6507-1 ve ASTM E92 standardında detaylı olarak tanımlanmıştır. ASTM E92 standardı Vickers sertlik ölçümünün yanında Knoop sertlik ölçümünü de aynı standart içinde ele alır. ISO standartlarında ise Knoop sertlik ölçümleri ISO 4545-1 standardında açıklanmıştır. Vickers sertlik ölçüm deneyinde uygulanan kuvvet değerleri ise Tablo 2 de verilmiştir.

Bu çalışmada, Vickers ve Knoop sertlik ölçümünde belirsizlik hesaplaması ele alınacaktır. Çalışmada Vickers ve Knoop sertlik ölçümleri için belirsizlik hesabı ASTM E92 standardı Ek X1 kısmına uygun şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, pratikte yapılmış olan Vickers ve Knoop sertlik deneyi ölçüm sonucu için belirsizlik hesaplaması ve değerlendirmesi örnek olarak verilmiştir.



Şekil 1. Vickers sertlik ölçümü ve prensip şekli

Tablo 1. Vickers sertlik değeri hesabı

Sembol/ Kısaltma	Açıklama
α	Piramit şekilli basma ucunun tepe noktasında karşılıklı yüzler arasındaki açı (136°)
F	Deney kuvveti, N
d	İki köşegenin (d_1 ve d_2) aritmetik ortalaması (Şekil 1'e bakınız)
HV	Vickers sertliği = Sabit $\times \frac{\text{Deney kuvveti}}{\text{İzin yüzey alanı}} = 0,102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$
Sabit = $0,102 \approx 1/9,80665$, burada 9,80665 kgf'den N'a çevrim faktörü	

Bu çalışmada, ölçüm belirsizlik hesaplamasının uygulanmasını kolaylaştırmak ve sayısal örneklerle konuya açıklık getirebilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, ASTM E92 standardına göre Vickers ve Knoop sertlik ölçümleri için ölçüm belirsizlik yaklaşımları, belirsizlik bileşenleri ve gereken bilgilere yer verilmiştir. Ayrıca ölçüm belirsizliği hesabının sayısal örnekler ile hesaplamaları bu çalışmada detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 2. Vickers ve Knoop sertlik deneyi kuvvet değerleri

Vickers scale	Knoop scale ^A	Test force (N)	Approximate Test force (kgf)	Approximate Test force (gf)
HV 0.001	HK 0.001	0.009807	0.001	1
HV 0.01	HK 0.01	0.09807	0.01	10
HV 0.015	HK 0.015	0.1471	0.015	15
HV 0.02	HK 0.02	0.1961	0.02	20
HV 0.025	HK 0.025	0.2451	0.025	25
HV 0.05	HK 0.05	0.4903	0.05	50
HV 0.1	HK 0.1	0.9807	0.1	100
HV 0.2	HK 0.2	1.961	0.2	200
HV 0.3	HK 0.3	2.942	0.3	300
HV 0.5	HK 0.5	4.903	0.5	500
HV 1	HK 1	9.807	1	1000
HV 2	HK 2	19.61	2	2000
HV 3		29.41	3	
HV 5		49.03	5	
HV 10		98.07	10	
HV 20		196.1	20	
HV 30		294.1	30	
HV 50		490.3	50	
HV 100		980.7	100	
HV 120		1177	120	

2. ASTM E92 STANDARDINA GÖRE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Sertlik alanındaki izlenebilirlik zinciri Şekil 2 de dört kademede olduğu gösterilmiştir. Zincir, uluslararası karşılaştırmaları yapmak için birçok tanımları kullanan uluslararası seviye ile başlar. Birçok birincil (primer) standart sertlik cihazları, kalibrasyon laboratuvarları seviyesi için birincil sertlik referans bloklarının kalibrasyonunda kullanılırlar. Bu cihazlar ilgili sertlik ölçeği standardında tanımlanan en iyi doğruluğu sahip cihazlardır.

Bu çalışmada, ASTM E92 standardının ek X1 verilen Vickers ve Knoop sertliği ölçüm belirsizliğini belirlemek için prosedür ve örnekler göre verilen hesaplamalar esas olarak oluşturulmuştur.

Vickers ve Knoop sertliği kullanıcılarının belirsizliği yorumlamasını basitleştirmek ve birleştirmek için Vickers ve Knoop sertlik ölçüm değerlerinin belirsizliğini değerlendirmek için temel bir yaklaşım sağlamaktır.

sertlik testlerinde sıklıkla olduğu gibi ölçüm sapması için düzeltilmediğinde, sapma daha sonra bir ölçümdeki genel belirsizliğe katkıda bulunur. Sapmaları belirsizlik hesaplamasına dahil etmek için bir dizi olası yöntem vardır ve bunların her birinin hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Basit ve korumacı bir yöntem, sapmayı genişletilmiş belirsizliğin hesaplanmasıyla aşağıdaki formül ile birleştirmektir:

$$U = k \cdot u_c + \text{ABS}(B)$$

Ölçüm belirsizliğini değerlendirmek ve ifade etmek için çeşitli yaklaşımlar kullanılabileceğinden, bildirilen ölçüm belirsizliği değerlerinin neyi temsil ettiğine ilişkin kısa bir açıklama, bildirilen ölçüm belirsizliği değerinin yanına eklenmesi uygun olacaktır.

2.2. Belirsizlik Kaynakları

Vickers veya Knoop sertlik ölçümündeki en önemli belirsizlik kaynakları ve sertlik değerindeki toplam belirsizliği hesaplamak için prosedür ve formüller bu bölümde verilecektir. Daha sonraki bölümlerde, bu belirsizlik kaynaklarının açıklanan 3 ölçüm durumu için toplam ölçüm belirsizliğine nasıl katkıda bulunduğu verilecektir.

Genel olarak belirsizlik kaynakları şunlardır:

1. Sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliği,
2. Test edilen malzemenin sertliğindeki düzensizlik,
3. Sertlik makinasının tekrar üretilebilirlik eksikliği,
4. Sertlik makinasının iz ölçüm ekranının çözünürlüğü
5. Referans test bloğunun sertifika değerindeki belirsizliktir.

Ölçüm sapmasının tahmini ve genişletilmiş belirsizliğe dahil edilmesi de ilave olarak ele alınacaktır. Tek tek belirsizlik kaynaklarının formül ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Tekrarlanabilirlik Eksikliğinden Kaynaklanan Belirsizlik (u_{Repeat}) ve Uniform(homojen) Olmayla Birleştiğinde ($u_{Rep\&NU}$)

Bir sertlik makinasının tekrarlanabilirliği, her ölçüm yapıldığında aynı sertlik değerini sürekli olarak ne kadar iyi tekrarlanabildiğinin bir göstergesidir. Tüm yüzeyinde sertliği mükemmel bir şekilde uniform (homojen) olan bir malzeme olduğunu düşünülebilir. Ayrıca, operatör de dahil olmak üzere test koşullarını değiştirmeden, bu uniform malzeme üzerinde kısa bir süre boyunca tekrar tekrar sertlik ölçümleri yapılır. Her test yerinin gerçek sertliği tam olarak aynı olsa bile,

rastgele hatalar nedeniyle her ölçüm değerinin diğer tüm ölçüm değerlerinden farklı olacağı görülecektir. Bu nedenle, tekrarlanabilirliğin olmaması, sertlik makinasının her zaman malzemenin gerçek sertliğini ölçebilmesini engeller ve dolayısıyla ölçümdeki belirsizliğe katkıda bulunur.

Bir sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliğinin genel ölçüm belirsizliğine yaptığı katkı, tek bir ölçüm değeri veya birden fazla ölçümün ortalamasının raporlanmasına bağlı olarak farklı şekilde belirlenir. Ek olarak, raporlanan ortalama ölçüm değerinin test edilen malzemenin ortalama sertliğinin bir tahmini olması amaçlandığında, makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden ve test malzemesinin sertliğindeki düzensizlikten kaynaklanan belirsizlik katkılarını ayırmak zordur ve birlikte belirlenmelidir. Bu koşulların her biri için belirsizlik katkıları aşağıdaki gibi tahmin edilebilir.

Tek Sertlik Ölçümü

Tek bir sertlik ölçümü için, tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan standart belirsizlik katkısı u_{repeat} , uniform bir test numunesi üzerinde yapılan bir dizi sertlik ölçümünden elde edilen değerlerin standart sapmasıyla şu şekilde tahmin edilebilir.

$$u_{\text{repeat}} = \text{STDEV} (H_1, H_2, \dots, H_n) \quad (1)$$

burada $H_1, H_2, \dots, H_n$ sertlik değeridir. Genel olarak, sertlik ölçümlerinin sayısı arttıkça tekrarlanabilirlik tahmini iyileştirilir. Genellikle, dolaylı bir doğrulama sırasında ölçülen sertlik değerleri u_{repeat} için yeterli bir tahmin sağlayacaktır.

Çoklu Ölçümlerin Ortalaması

Birden fazla sertlik testi değerinin ortalamasının raporlanması gerektiğinde, sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliği nedeniyle standart belirsizlik katkısı $u_{\text{repeat--}}$, standart belirsizlik katkısı u_{repeat} 'ın ortalaması alınan sertlik testi değerlerinin sayısının kareköküne bölünmesiyle tahmin edilebilir.

$$u_{\text{repeat--}} = u_{\text{repeat}} / \sqrt{n}$$

burada n ortalaması alınan sertlik testi değerlerinin sayısıdır.

Malzeme Sertliğinin Tahmini

Sertlik ölçümleri genellikle birkaç yerde yapılır ve malzemenin bir bütün olarak ortalama sertliğini tahmin etmek için değerler ortalaması alınır. Örneğin, bu birçok ürün türünün üretimi sırasında kalite kontrol ölçümleri yaparken; dolaylı bir doğrulamanın parçası olarak makina hatası E'yi belirlerken ve bir test bloğunu kalibre ederken yapılabilir. Tüm malzemeler test yüzeyi boyunca bir miktar sertlik düzensizliği gösterdiğinden, bir malzemenin düzensizliğinin

derecesi de malzemenin ortalama sertliğinin bu tahminindeki belirsizliğe katkıda bulunur. Birden fazla sertlik ölçüm değerinin ortalaması, ortalama malzeme veya ürün sertliğinin bir tahmini olarak hesaplandığında, bu değerdeki belirsizliğin malzemenin gerçek sertliğine göre belirtilmesi istenebilir. Bu durumda, sertlik makinasında tekrarlanabilirliğin olmaması ve test malzemesindeki düzensizlikten kaynaklanan birleşik belirsizlik katkıları, sertlik ölçüm değerlerinin "ortalama standart sapmasından" tahmin edilebilir. Bu, sertlik değerlerinin standart sapmasının, ölçüm sayısının kareköküne bölünmesiyle hesaplanır:

$$u_{\text{Rep\&NU}} = \frac{\text{STDEV}(HT_1, HT_2, \dots, HT_n)}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

burada n ölçüm değerlerinin sayısıdır.

Tekrar Üretilirliğin Eksikliğinden Kaynaklanan Belirsizlik (u_{Reprod})

Sertlik makinasının performansındaki günlük değişime, yeniden üretilebilirlik seviyesi denir. Farklı makina operatörleri ve test ortamındaki değişiklikler gibi değişimler genellikle sertlik makinasının performansını etkiler. Üretilirlik seviyesi, sertlik makinasının test değişkenleri uç noktalardaki değişimlere maruz kaldığı uzun bir süre boyunca sertlik makinasının performansının izlenmesiyle en iyi şekilde belirlenir. Tekrar üretilebilirliğin değerlendirilmesi sırasında test makinasının kontrol altında olması çok önemlidir. Makina bakıma ihtiyaç duyuyorsa veya yanlış çalıştırılıyorsa, tekrar üretilebilirlik eksikliği fazla bir değer olacaktır.

Bir sertlik makinasının tekrar üretilebilirlik eksikliğinin değerlendirilmesi, zaman içinde aynı test bloğu üzerinde yapılan periyodik doğrulama ölçümleri gibi sertlik makinasının periyodik izleme ölçümlerine dayanmalıdır. Belirsizlik katkısı, her bir izleme değerleri kümesinin ortalamasının standart sapmasıyla aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir:

$$u_{\text{Reprod}} = \text{STDEV}(M_1, M_2, \dots, M_n) \quad (3)$$

burada $M_1, M_2, \dots, M_n$, birden fazla izleme ölçüm değerinin her bir n kümesinin bireysel ortalamalarıdır.

Denklem 3'da hesaplandığı gibi, tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı, makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden ve izleme test bloğunun uniform olmamasından kaynaklanan bir katkıyı da içerir;

ancak, bu katkılar çoklu ölçümlerin ortalamasına dayanır ve tekrar üretilebilirlik belirsizliğini önemli ölçüde abartmamalıdır.

İz Ölçüm Sisteminin Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik (u_{Resol})

İz ölçüm sisteminin sonlu çözünürlüğü, sertlik makinasının kesinlikle doğru bir sertlik değeri sağlamasını engeller. Ölçüm sistemi çözünürlüğü r_H 'nin etkisinden kaynaklanan belirsizlik katkısı u_{Resol} , dikdörtgen bir dağılımla tanımlanabilir ve şu şekilde tahmin edilebilir:

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} \quad (4)$$

burada r_H , iz köşegen ölçüm sisteminden sertlik birimleri cinsinden bir sertlik değerinin tahmin edilebileceği çözünürlük sınırıdır. Çözünürlük sınırı r_H 'nin yalnızca iz ölçüm sisteminin uzunluk çözünürlüğüne r_d değil, aynı zamanda sertlik değeri H^- ve karşılık gelen köşegen uzunluk d 'ye de bağlı olacağını belirtmek önemlidir. Köşegen uzunluk birimlerindeki ölçüm çözünürlüğü, sertlik birimlerindeki çözünürlüğe şu şekilde dönüştürülebilir:

$$r_H = r_d \frac{2 H}{d} \quad (5)$$

Ölçüm çözünürlüğünün etkisi, özellikle küçük izler için HV ve HK ölçüm belirsizliğine önemli bir katkıda bulunabilir. Örneğin, 25 μm diyagonal uzunluğa sahip küçük bir izin, 1 μm çözünürlüğe sahip bir ölçüm sistemiyle ölçülmesini düşündüğünüzde. izin her ölçümünün aynı ölçüm değerinin okunması olasıdır. Bu da iz köşegen uzunluğunu ölçme yeteneğindeki tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan ölçüm belirsizliğinin ihmal edilebilir veya sıfır olacağını gösterir. Ancak, durum muhtemelen böyle değildir. Ölçüm tekrarlanabilirliğindeki gerçek belirsizlik, ölçüm çözünürlüğü nedeniyle muhtemelen çok daha yüksektir.

Çözünürlüğün genel sertlik ölçüm belirsizliğine nasıl katkıda bulunduğunu belirlerken birkaç faktör dikkate alınmalıdır. Ayrıca çözünürlük katkıları kullanılan ölçüm sisteminin türüne de bağlıdır. Çoğu durumda, bir Vickers veya Knoop izi köşegen uzunluğu, köşegenin her iki ucundaki izin uçlarını bulup çözerek ölçülür. Ölçüm sisteminin iz ucunu çözme yeteneği kısmen sistemin artımlı çözünürlüğünden ve aynı zamanda mikroskop objektifinin optik çözünürlüğünden de kaynaklanır. Video ölçüm sistemleri durumunda, artımlı çözünürlük, iki bitişik video görüntüleme pikseline karşılık gelen numunede gözlemlenen artımlı uzunluk aralığına veya ölçüm yazılımının video görüntüsünü

nasıl çözdüğüne dayanabilir. Filar mercekli bir optik mikroskop kullanılması durumunda, artımlı çözünürlük ölçüm ekranının veya mikrometre ölçeğinin çözünürlüğüne bağlı olabilir. Ölçüm sisteminin çözünürlüğü ayrıca izi gözlemlemek için kullanılan ışığın dalga boyuna ve merceğin sayısal açıklığına dayalı mikroskop objektifinin çözünürlüğüne de bağlıdır.

Ölçüm çözünürlüğünden kaynaklanan genel ölçüm belirsizliğini belirlemek için, hem sistemin artımlı çözünürlüğü $u_{Resol(incr)}$ hem de mikroskop objektifinin optik çözünürlüğü $u_{Resol(obj)}$ nedeniyle oluşan belirsizlikler dikkate alınmalıdır.

Bir iz köşegeninin bir ucunun çözülmesinden kaynaklanan sertlik ölçümü belirsizliği,

$$u_{Resol} = \sqrt{u_{Resol(incr)}^2 + u_{Resol(obj)}^2} \quad (6)$$

rd'yi (4) denkleme göre r_H 'ye dönüştürdükten sonra $u_{Resol(incr)}$ ve $u_{Resol(obj)}$ 'yi (6) denklemini kullanarak hesaplanabilir. Bir köşegen uzunluğunun ölçümü genellikle köşegenin her iki ucunun da çözülmesini içerdiğinden, bir sertlik izinin köşegeninin her iki ölçümünün çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_{Resol} = \sqrt{2 \cdot (u_{Resol(incr)}^2 + u_{Resol(obj)}^2)}$$

Referans Test Bloğunun Ortalama Sertlik Değerindeki Standart Belirsizlik (u_{RefBlk})

Referans test bloklarının ilgili sertifikasında belirtilen bir belirsizlik değeri ve referans test bloğu değerinin Vickers veya Knoop standardına göre izlenebilir olduğunu görülebilmelidir. Bu belirsizlik, referans test blokları ile kalibre edilen veya doğrulanan sertlik makinalarının ölçüm belirsizliğine katkıda bulunur. Referans test bloğu sertifikalarında bildirilen belirsizliğin genellikle genişletilmiş belirsizlik olduğu unutulmamalıdır. Genişletilmiş belirsizlik, standart belirsizliğin bir kapsam faktörüyle (genellikle 2 ile) çarpılmasıyla hesaplanır. Bu hesaplamada, genişletilmiş belirsizlik değerinin yerine standart belirsizlik kullanır. Bu nedenle, referans test bloğunun sertifikalı değerindeki belirsizlikten kaynaklanan belirsizlik değeri genellikle şu şekilde hesaplanabilir:

$$u_{RefBlk} = \frac{U_{RefBlk}}{k} \quad (7)$$

burada, $U_{(RefBlk)}$ referans test bloğunun sertifikalı değerinin bildirilen genişletilmiş belirsizliği ve k referans standardının sertifikalı değerindeki belirsizliği hesaplamak için kullanılan kapsam faktörüdür (genellikle 2).

Ölçüm Sapması (B)

Ölçüm sapması, sertlik makinasının gösterdiği sertlik ölçüm değerleri ile bir malzemenin "gerçek" sertliği arasındaki farktır. Ölçüm sapması B , dolaylı doğrulamanın bir parçası olarak belirlenen hata E ile şu şekilde tahmin edilebilir:

$$B = H^- \cdot H_{RefBlk}^- \quad (8)$$

burada H^- dolaylı doğrulama sırasında sertlik makinasının ölçtüğü ortalama sertlik değeridir ve H_{RefBlk}^- dolaylı doğrulama için kullanılan referans test bloğu standardının sertifikalı ortalama sertlik değeridir.

2.3. Belirsizlik Hesaplama Prosedürü: Dolaylı Doğrulama

Bu bölümde, kalibrasyon yapan laboratuvar tarafından, sertlik makinasının sertlik ölçüm hatası E_H 'deki belirsizliği U_{Mach} 'ı, ölçüm değerlerinin ortalaması ile doğrulama için kullanılan referans bloğunun sertifikalı değeri arasındaki fark olarak tahmin etmek için kullanılabilecek bir prosedür açıklanmaktadır. Sertlik ölçümünde her zaman belirsizlik olduğundan, ölçümlerin ortalama değerinin belirlenmesinde ve dolayısıyla makina hatasının belirlenmesinde belirsizlik olması gerektiği sonucu çıkar.

Sertlik ölçüm hatasının standart belirsizliğine (u_{Mach}), katkı sağlayan parametreler şunlardır:

(1) $u_{Rep\&NU}$ (Ref. Blok), sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik, sertlik makinasının hatası E 'yi belirlemek için bir referans test bloğunda yapılan sertlik ölçümlerinden belirlenen referans test bloğundaki (denklem 2) düzensizlikten kaynaklanan belirsizlikle birleştirilmiştir. $u_{Rep\&NU}$ terimine, belirsizliğin dolaylı doğrulama için kullanılan referans blokta yapılan ölçümlerden belirlendiğini açıklığa kavuşturmak için (Ref. Blok) eki eklenmiştir.

(2) u_{Resol} , sertlik birimlerinde iz ölçüm sisteminin (denklem 4) çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik ve

(3) u_{RefBlk} , referans test bloğunun sertifika değerindeki standart belirsizlik (denklem 7) parametreleridir.

Birleşik standart belirsizlik u_{Mach} ve genişletilmiş belirsizlik U_{Mach} , her Vickers ve Knoop sertlik ölçeğinin her sertlik seviyesi için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenlerinin birleştirilmesiyle hesaplanır:

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{Ref. Blok}) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2} \quad (9)$$

$$U_{Mach} = k \cdot u_{Mach} \quad (10)$$

Bu hesaplama için ASTM E92 standardına göre $k = 2$ 'lik bir kapsam faktörü kullanılmalıdır. Bu kapsama faktörü yaklaşık %95'lik bir güven düzeyi sağlar.

Ölçüm Belirsizliğinin Bildirilmesi

Genişletilmiş belirsizlik U_{Mach} , bir kalibrasyon laboratuvarı tarafından müşterisine, bir Vickers veya Knoop sertlik makinasının dolaylı doğrulamasının bir parçası olarak bildirilen sertlik makinası hatası E'deki belirsizliğin bir göstergesi olarak bildirilebilir. U_{Mach} değeri, belirsizliğin hangi Vickers veya Knoop sertlik ölçeğine ve sertlik seviyesine uygulanabileceğini tanımlayan bir ifadeyle desteklenmeli ve “Belirtilen sertlik ölçeği(leri) ve sertlik seviyesi(leri) için dolaylı doğrulamanın bir parçası olarak bildirilen sertlik makinası hatası E'nin genişletilmiş belirsizliği yaklaşık %95'lik bir güven aralığında ve 2 kapsam faktörü ile ASTM E92'nin Ek X1'ine uygun olarak hesaplanmıştır.” gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmelidir.

ASTM E92 de verilmiş bu konu ile ilgili örnek X1.1 de verilmiştir. Bu örnekte U_{Mach} 'ın nasıl hesaplanacağını örnek olarak verilir. Bu örnek için 420 HK 0,3 sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 6$ HK 0,3 genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Knoop referans bloğu üzerinden alınan ölçümler için yapılmıştır. İzi ölçmek için kullanılan mikroskobun çözünürlüğü $1 \mu\text{m}$ 'dir. Blok üzerinde beş doğrulama ölçümü gerçekleştirildi. Beş diyagonal ölçümü ve bunlara karşılık HK 0,3 sertlik değerleri Tablo 3 de verilmiştir. Ortalama sertlik değeri 404 HK 0,3 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen değerler						Ort., x
ölçüm	1	2	3	4	5	HK0,3
d (μm) =	103,9	104,8	102,3	102,8	100,2	102,8
HK 0,3 =	395,0	389,0	408,0	404,0	425,0	404,2

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Ref. Blok}) = \frac{STDEV(395, 389, 408, 404, 425)}{\sqrt{5}} = 6,18 \text{ HK } 0,3$$

$$r_d = 1 \mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$$

$$r_H = r_d \frac{2H}{d} = 0,001 \frac{2 \cdot 404,2}{0,1028} = 7,86 \text{ HK } 0,3$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 2,27 \text{ HK } 0,3$$

$$u_{RefBlk} = \frac{6}{2} = 3 \text{ HK } 0,3$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{RefBlok}) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2} = \sqrt{6,18^2 + 2,27^2 + 3^2}$$

$$= 7,24 \text{ HK } 0,3$$

$$U_{Mach} = k \cdot u_{Mach} = 2 \cdot 7,24 = 14,5 \text{ HK } 0,3$$

Sonuç olarak, sertlik makinasındaki –16 HK 0.3 hata E_H 'deki belirsizlik 14.5 HK 0.3'tür. Bu değerlendirme yaklaşık 420 HK 0.3 sertliğe sahip bir malzeme üzerinde yapılmış olsa da, belirsizliğin HK 0.3 sertlik ölçeğinin ortalama aralığına uygulandığı düşünülebilir. Bu hesaplama, HK 0.3 sertlik ölçeğinin düşük ve yüksek aralıkları ve doğrulanan diğer Vickers ve Knoop sertlik ölçeklerinin aralıkları için yapılmalıdır.

2.4. Belirsizliği Hesaplama Prosedürü: Vickers ve Knoop Sertlik Ölçüm Değerleri

Bir kullanıcı tarafından ölçülen bir sertlik değerindeki belirsizlik U_{Meas} , ölçülen değer malzemenin sertliğinin "gerçek" değeriyle ne kadar uyumlu olduğunun bir göstergesi olarak ifade edilir.

Tek Ölçüm Değeri için

Tek bir sertlik ölçüm değeri için ölçüm belirsizliği belirlenecekse, standart belirsizlik u_{Meas} 'a aşağıdaki bileşenler katkıda bulunur.

(1) u_{Repeat} , makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 1),

(2) u_{Reprod} , tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , iz ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Meas} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Vickers veya Knoop sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Repeat}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (11)$$

Ortalama Ölçüm Değeri için

Aynı test parçası veya birden fazla test parçası üzerinde yapılan birden fazla sertlik ölçümünün ortalama değeri için ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi durumunda, standart belirsizlik u_{Meas} 'e aşağıdaki bileşenler katkıda bulunur.

(1) $u_{Repeat-}$, birden fazla ölçümün ortalamasına dayalı olarak makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 1),

(2) u_{Reprod} , tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , iz ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Meas} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Vickers veya Knoop sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Repeat-}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (12)$$

Yukarıda belirtilen tek ve ortalama sertlik değerleri için tartışılan ölçüm belirsizliğinin yalnızca ölçüm sürecinin belirsizliklerini temsil eder.

Ortalama Ölçüm Değeri, Ortalama Malzeme Sertliğinin Tahmini Olarak

Ölçüm laboratuvarları ve üretim tesisleri genellikle test malzemesinin ortalama sertliğini tahmin etmek amacıyla bir test numunesinin veya ürününün Vickers veya Knoop sertliğini ölçerler. Genellikle, test parçasının yüzeyi boyunca birden fazla sertlik ölçümü yapılır ve ardından sertlik değerlerinin ortalaması, malzemenin ortalama sertliğinin bir tahmini olarak raporlanır. Belirsizliğin, ortalama ölçüm değerinin malzemenin gerçek ortalama sertliğini ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olarak raporlanması isteniyorsa, standart belirsizlik u_{Meas} 'a aşağıdaki bileşenler katkıda bulunur.

(1) $u_{Rep\&NU}$ (Malzeme), makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik, malzemenin homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlikle ifade edilir. Değeri denklem 2 yardımıyla test malzemesi üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinden belirlenir. $u_{Rep\&NU}$ terimine, belirsizliğin test edilen malzeme üzerinde yapılan ölçümlerden belirlendiğini açıklığa kavuşturmak için (Malzeme) ifadesi eklenmiştir.

(2) u_{Reprod} , tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , iz ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Meas} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Vickers veya Knoop sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (13)$$

Belirsizliği, ortalama ölçüm değerinin malzemenin gerçek ortalama sertliğini ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olarak bildirirken, malzemenin sertliğindeki herhangi temsili bir örneklemesini sağlamak için uygun test yerlerinde yeterli sayıda ölçüm yapıldığından emin olmak önemlidir.

Genişletilmiş belirsizlik U_{Meas} , yukarıda verilen 3 durum için aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) \quad (14)$$

Bu analiz için $k = 2$ 'lik bir kapsama faktörü kullanılmalıdır. Bu kapsama faktörü yaklaşık %95'lik bir güven aralığını ifade eder.

Ölçüm Belirsizliğinin Raporlanması

Tek ve Ortalama Ölçüm Değerleri

Raporlanan ölçüm değeri tek bir sertlik testi veya birden fazla sertlik testinin ortalaması olduğunda, U_{Meas} değeri, "Raporlanan sertlik değerinin (veya ortalama sertlik değerinin) genişletilmiş ölçüm belirsizliği, sertlik referans standartlarına göredir ve yaklaşık %95'lik bir güven aralığını temsil eden 2'lik bir kapsam faktörü ile ASTM E92'nin Ek X1'ine uygun olarak hesaplanmıştır." gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmesi uygun olur.

Ortalama Ölçüm Değeri, Ortalama Malzeme Sertliğinin Bir Tahmini Olarak

Ortalama ölçüm değerinin malzemenin gerçek ortalama sertliğini ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olarak belirsizliği bildirmek istendiğinde, U_{Meas} değeri, "Test edilen malzemenin bildirilen ortalama sertliğinin genişletilmiş belirsizliği, ölçüm sürecinden ve malzemenin sertliğinin homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlik katkılarına dayanmaktadır. Belirsizlik, sertlik referans standartlarına göredir ve yaklaşık %95'lik bir güven aralığını temsil eden 2'lik bir kapsam faktörü ile ASTM E92'nin Ek X1'ine uygun olarak hesaplanmıştır." gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmelidir. Test raporunda ortalaması alınan ölçüm sayısı ve ölçümlerin yapıldığı yerler belirtilmiyorsa, bu bilgi belirsizliğin nasıl hesaplandığına ilişkin kısa açıklamanın bir parçası olarak da eklenmesi tavsiye edilir.

ASTM E92 de verilmiş bu konu ile ilgili örnek X1.2 de verilmiştir. Bu örnekte, bir laboratuvar, ürün sertliğini tahmin etmek için yüzeyinde 6 adet Vickers HV 0.5 sertlik ölçümü almıştır. Ürünün sertlik ölçümlerinin değerleri aşağıdaki tablo 4 de HV 0.5 değeriyle verilmiştir. İzleri ölçmek için kullanılan mikroskobun çözünürlüğü 1 μm 'dir. Laboratuvar, ortalama sertlik değerindeki ölçüm belirsizliğini belirlemek ister. 308 HV 0.5 sertlik, HV 0.5 test aralığının orta aralığındadır. HV 0.5 test aralığının orta aralığının son dolaylı doğrulaması $U_{Mach} = 8.4 \text{ HV } 0.5$ ve $-6 \text{ HV } 0.5$ hata E'yi bildirmiştir.

Tablo 4. Test numunesinden alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri, HV 0,5						Ort, x
1	2	3	4	5	6	HV 0,5
303,0	310,0	301,0	312,0	301,0	320,0	307,8

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Malzeme}) = \frac{STDEV(303, 310, 301, 312, 301, 320)}{\sqrt{6}} = 3,1 \text{ HV } 0,5$$

$u_{Reprod} = STDEV(M1, M2, \dots, Mn) = 4,2 \text{ HV } 0,5$ olduğu örnekte verilmiştir.

$$r_d = 1 \mu m = 0.001 \text{ mm}$$

$$r_H = r_d \frac{2H}{d} = 0,001 \frac{2 \cdot 307,8}{0,0549} = 11,21 \text{ HV } 0,5$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 3,24 \text{ HV } 0,5$$

$$u_{Mech} = \frac{9,2}{2} = 4,6 \text{ HV } 0,5$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$$
$$= \sqrt{3,1^2 + 4,2^2 + 3,24^2 + 4,6^2} = 7,68 \text{ HV } 0,5$$

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 7,68 + ABS(-6) = 21,4 \text{ HV } 0,5$$

HV 0.5 ortalama değeri için tek ölçüm üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinin sonucu olarak verilebilir.

Belirsizliği Hesaplama Prosedürü: Standard Test Bloklarının Sertifikalı Değerine Göre

Referans test bloklarının kalibrasyonu ile uğraşan kalibrasyon laboratuvarları, bildirilen sertifikalı değerlerdeki belirsizliği belirlemelidir. Bu belirsizlik U_{Cert} , sertifikalı değer test bloğunun "gerçek" ortalama sertliğiyle ne kadar uyumlu olduğuna dair bir gösterge sağlar.

Test blokları, test bloğunun yüzeyi boyunca yapılan kalibrasyon ölçümlerine dayalı olarak ortalama bir sertlik değerine sahip olarak sertifikalandırılır. Bu analiz, esasen bir ürünün ortalama sertliğini ölçmek için yapılan işlem ile aynıdır. Bu durumda, ürün kalibre edilmiş bir referans test bloğudur. Test bloğunun sertifikalı ortalama değerinin standart belirsizliğine U_{Cert} katkı sağlayan bileşenler aşağıda tanımlanmıştır.

(1) $u_{Rep\&NU}$ (Calib.Blok), standart makinelerin tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik, kalibre edilmiş blokların homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlikle denklem 2 kullanılarak hesaplanır ve test bloğu üzerinde yapılan kalibrasyon ölçümlerinden belirlenir. Belirsizliğin kalibre edilmiş blok üzerinde yapılan kalibrasyon ölçümlerinden belirlendiğini açıklamak için $u_{Rep\&NU}$ teriminin yanına (Calib.Blok) ifadesi eklenir.

(2) U_{Reprod} , yeniden üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , iz ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Cert} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Vickers veya Knoop sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Cert} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{Cal. Blok}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (15)$$

$$U_{Cert} = k \cdot u_{Cert} + \text{ABS}(B) \quad (16)$$

Bu analiz için $k = 2$ 'lik bir kapsama faktörü kullanılmalıdır. Bu kapsama faktörü yaklaşık %95'lik bir güven aralığını ifade eder.

U_{Cert} değerinin yanında, "Test edilen sertifikalı bloğun bildirilen ortalama sertliğinin genişletilmiş belirsizliği, ölçüm sürecinden ve malzemenin sertliğinin homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlik katkılarına dayanmaktadır. Belirsizlik, sertlik referans standartlarına göredir ve yaklaşık %95'lik bir güven aralığını temsil eden 2'lik bir kapsam faktörü ile ASTM E92'nin Ek X1'ine uygun olarak hesaplanmıştır." gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmelidir.

ASTM E92 de verilmiş bu konu ile ilgili örnek X1.3 de verilmiştir. Bu örnekte, bir ikinci seviye test blok standart laboratuvar, sertliği tahmin etmek için yüzeyinde 5 adet Vickers HV 5 sertlik ölçümü almıştır. Ürünün sertlik ölçümlerinin değerleri aşağıdaki Tablo 5 de HV 5 değeriyle verilmiştir. İzleri ölçmek için kullanılan mikroskobun çözünürlüğü $1 \mu\text{m}$ 'dir. Laboratuvar, yüksek sertlik değerindeki ölçüm belirsizliğini belirlemek ister. 676 HV 5 sertlik, HV 0.5 test aralığının yüksek aralığındadır. HV 5 test aralığının yüksek aralığının son dolaylı doğrulaması $U_{Mach} = 6.4 \text{ HV } 5$ ve $+5 \text{ HV } 5$ hata E'yi bildirmiştir.

Tablo 5. Kalibrasyon blok numunesinden alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri, HV 5					
1	2	3	4	5	Ort, x
674,0	674,0	680,0	682,0	670,0	676,0

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Calib. Blok}) = \frac{STDEV(674, 674, 680, 682, 670)}{\sqrt{5}} = 2,2 \text{ HV } 5$$

$$u_{Reprod} = STDEV(M1, M2, \dots, Mn) = 3,8 \text{ HV } 5 \text{ olduğu örnekte verilmiştir.}$$

$$r_d = 1 \mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$$

$$r_H = r_d \frac{2H}{d} = 0,001 \frac{2 \cdot 676}{0,1171} = 11,55 \text{ HV } 5$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 3,33 \text{ HV } 5$$

$$u_{Mech} = \frac{6,4}{2} = 3,2 \text{ HV } 5$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{Calib. Blok}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$$

$$= \sqrt{2,2^2 + 3,8^2 + 3,33^2 + 3,2^2} = 6,37 \text{ HV } 5$$

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 6,37 + ABS(5) = 17,74 \text{ HV } 5$$

HV 5 ortalama değeri için tek ölçüm üzerinde yapılan sertifikalı sertlik test bloğu ölçümlerinin sonucu olarak verilebilir.

3. ASTM E92 STANDARDINA BENZER ÖRNEK SAYISAL BELİRSİZLİK HESAPLAMALARI

ASTM E92 de verilen örneklerle benzer şekilde farklı durumlar için belirsizlik hesaplama örnekleri aşağıda verilmiştir.

Örnek 1

Eğer bir sertifikalı bir referans bloğunu var ise bunu kullanarak sertlik makinanızın belirsizlik seviyesini belirlemeniz gerektiğinde ASTM E92 örnek X1.1 e ve aşağıda verilen örneğe benzer şekilde belirsizlik hesabı yapabilirsiniz.

Bu örnekte U_{Mach} 'ın nasıl hesaplanacağını örneği verilmiştir. Elinizde 401,6 HV 30 sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 5,1$ HV 30 genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Vickers referans bloğunuzun olduğunu düşünelim. İzi ölçmek için kullanılan mikroskobun çözünürlüğü 1 μm 'olsun. Blok üzerinde beş adet ölçüm gerçekleştirip aşağıda Tablo 6 te verilen değerlerin ölçülmüştür. Bu değerlere göre ölçüm belirsizliği hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmalıdır.

Tablo 6. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen değerler						Ort., x
ölçüm	1	2	3	4	5	HV30
d (mm) =	0,3704	0,3734	0,3725	0,3714	0,3741	0,3724
HV =	405,5	399,0	400,9	403,4	397,5	401,3

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Ref. Blok}) = \frac{STDEV(405,5, 399, 400,9, 403,4, 397,5)}{\sqrt{5}}$$

$$= 1,45 \text{ HV } 30$$

$$r_d = 1 \text{ } \mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$$

$$r_H = r_d \frac{2H}{d} = 0,001 \frac{2 \cdot 401,3}{0,3724} = 2,16 \text{ HV } 30$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 0,62 \text{ HV } 30$$

$$u_{RefBlk} = \frac{5,1}{2} = 2,55 \text{ HV } 30$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{Ref. Blok}) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2} = \sqrt{1,45^2 + 0,62^2 + 2,55^2}$$

$$= 3,0 \text{ HV } 30$$

$$U_{Mach} = k \cdot u_{Mach} = 2 \cdot 3,0 = 6 \text{ HV } 30$$

Örnek 2

Eğer bir test numuneniz ve sertifikalı bir referans bloğunu var ise bunu kullanarak sertlik makinanızın belirsizlik seviyesini belirlemeniz gerektiğinde ASTM E92 örnek X1.2 ye ve aşağıda verilen örneğe benzer şekilde belirsizlik hesabı yapabilirsiniz.

Bu örnekte U_{Meas} 'ın nasıl hesaplanacağını örneği verilmiştir. Ölçümü istenen malzemenin sertlik ölçümlerinin standarda uygun olarak gerçekleştirilmiş ve aşağıda Tablo 7 de verilen HV 30 değeri elde edilmiştir. Ayrıca elinizde 401,6 HV 30 sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 5,1 \text{ HV } 30$ genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Vickers referans bloğunuzun olduğunu düşünelim. Referans blok üzerinde beş adet ölçüm gerçekleştirip aşağıda Tablo 8 da verilen değerlerin ölçülmüştür. İzi ölçmek için kullanılan mikroskobun çözünürlüğü $1 \text{ } \mu\text{m}$ olsun. Bu değerlere göre ölçüm belirsizliği hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmalıdır.

Tablo 7. Test numunesinden alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HV 30
408,0	412,0	416,0	406,0	408,0	410,0

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Malzeme}) = \frac{STDEV(408, 412, 416, 406, 408)}{\sqrt{5}} = 1,79 \text{ HV } 30$$

Tablo 8. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HV 30
400,5	399,0	400,9	403,4	397,5	400,3

$$B = H_{CRM} - H_x = 401,6 - 400,3 = 1,3 \text{ HV } 30$$

$$u_{Reprod} = STDEV(400,5, 399, 400,9, 403,4, 397,5) = 2,21 \text{ HV } 30$$

Elinde referans bloğu olmayan bir laboratuvar referans blok ölçüm değerlerini cihazın kalibrasyonunu yapan laboratuvarın sertifikasından değerleri alarak bu değerler elde edebilir. Sertlik cihazının kalibrasyonu için farklı sertlik seviyelerinde referans sertlik blokları ile ölçümler gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu blok ölçümlerinden en büyük hataya sahip blok değeri olarak u_{reprod} değerini yapılan ölçüm sonuçlarını kullanarak hesaplayabilir.

$$r_d = 1 \text{ } \mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$$

$$r_H = r_d \frac{2H}{d} = 0,001 \frac{2 \cdot 410}{0,3684} = 2,23 \text{ HV } 30$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 0,64 \text{ HV } 30$$

$$u_{Mech} = \frac{5,1}{2} = 2,55 \text{ HV } 30$$

Toplam belirsizlik,

$$\begin{aligned}
 u_{Meas} &= \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mech}^2} \\
 &= \sqrt{1,79^2 + 2,21^2 + 0,64^2 + 2,55^2} = 3,87 \text{ HV } 30 \\
 U_{Meas} &= k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 3,87 + ABS(1,3) = 9,09 \text{ HV } 30
 \end{aligned}$$

Örnek 3

Elinde referans bloğunuz var ve cihazının kalibrasyonu içinde ilave referans sertlik bloğunuz var ise ASTM E92 standardının örnek X1,3 e ve aşağıda verilen örneğe benzer şekilde belirsizlik hesabı yapabilirsiniz.

Bu örnekte U_{Meas} 'ın nasıl hesaplanacağını örneği verilmiştir. Ölçümü istenen referans sertlik bloğunun sertlik ölçümlerinin standarda uygun olarak gerçekleştirilmiş ve aşağıda Tablo 9 de verilen HV 30 değeri elde edilmiştir. Ayrıca elinizde 701,2 HV 30 sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 6,2$ HV 30 genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Vickers referans bloğunuzun olduğunu düşünelim. Referans blok üzerinde beş adet ölçüm gerçekleştirip aşağıda Tablo 10 de verilen değerlerin ölçülmüştür. İzi ölçmek için kullanılan mikroskobun çözünürlüğü 0,1 μm olsun. Bu değerlere göre ölçüm belirsizliği hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmalıdır.

Tablo 9. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HV 30
713,0	711,0	699,0	704,0	709,0	707,2

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Malzeme}) = \frac{STDEV(713, 711, 699, 704, 709)}{\sqrt{5}} = 2,54 \text{ HV 30}$$

Tablo 10. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HV 30
700,5	702,8	701,6	703,2	700,8	701,8

$$B = H_{CRM} - H_x = 701,2 - 701,8 = -0,6 \text{ HV 30}$$

$$u_{Reprod} = STDEV(700,5, 702,8, 701,6, 703,2, 700,8) = 1,19 \text{ HV 30}$$

Referans blok ölçüm değerlerini cihazın kalibrasyonunu yapan laboratuvarın sertifikasından değerleri alarak bu değerler elde edebilir. Sertlik cihazının kalibrasyonu için farklı sertlik seviyelerinde referans sertlik blokları ile ölçümler gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu blok ölçümlerinden en büyük hataya sahip blok değeri olarak u_{reprod} değerini yapılan ölçüm sonuçlarını kullanarak hesaplayabilir.

$$r_d = 0,1 \mu\text{m} = 0.0001 \text{ mm}$$

$$r_H = r_d \frac{2 H}{d} = 0,0001 \frac{2.707,2}{0,2805} = 0,5 \text{ HV } 30$$

$$u_{\text{Resol}} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 0,15 \text{ HV } 30$$

$$u_{\text{Mech}} = \frac{6,2}{2} = 3,1 \text{ HV } 30$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{\text{Meas}} = \sqrt{u_{\text{Rep\&NU}}^2(\text{malzeme}) + u_{\text{Reprod}}^2 + u_{\text{Resol}}^2 + u_{\text{Mach}}^2}$$

$$= \sqrt{2,54^2 + 1,19^2 + 0,5^2 + 3,1^2} = 4,18 \text{ HV } 30$$

$$U_{\text{Meas}} = k \cdot u_{\text{Meas}} + \text{ABS}(B) = 2 \cdot 4,18 + \text{ABS}(-0,6) = 8,94 \text{ HV } 30$$

Verilen 3 örnek ile ASTM E92 standardına göre ölçüm belirsizliği hesabının farklı durumlara göre hesabı sayısal örnekler ile verilmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde yaygın olarak kullanılmakta olan sertlik ölçümlerinin kalitesinin göstergesi ölçüm belirsizliği değeridir. Ölçüm belirsizliklerinin doğru parametreler katılarak en düşük seviyede olacak şekilde hesaplanması arzu edilen durumdur. Bu kapsamda ölçüm yapan ve akredite olan deney laboratuvarları için belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla bu çalışma planlanmıştır. Verilen sayısal örnek ile hesaplamadaki tüm aşamalar açıklanmıştır. Bu sayede, ASTM E92 standardına göre Vickers ve Knoop skalasında sertlik ölçümleri yapan veya kullanan konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile ölçüm belirsizliği hesabı konusunda araştırma yapanlara rehber bir doküman hazırlanması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] ASTM E92, 2023, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials
- [2] ASTM E384, 2022, Test Method for Microindentation Hardness of Materials
- [3] TS EN ISO 6507-1, 2018, Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu
- [4] TS EN ISO 6507-2, 2018, Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 2: Deney cihazlarının doğrulanması ve kalibrasyonu
- [5] TS EN ISO 6507-4, 2018, Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 4: Çizelgeler ve sertlik değerleri
- [6] TS EN ISO 4545-1, 2023, Metalik malzemeler - Knoop sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu
- [7] Aydemir, B., Mekanik Testlerde Ölçüm Belirsizliği Uygulamaları, 2018, 4. Ulusal Laboratuvar Akreditasyonu ve Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, 25-27.04.2018, 1
- [8] Aydemir, B., Knoop sertlik deneyinde ölçüm belirsizliği hesaplaması ve sayısal uygulaması, IMSMATEC 21, 28-30 May 2021, Nevşehir, S.41-45
- [9] Aydemir, B., Malzeme Deneylerinde (Çekme deneyi) Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Eğitim Dokümanı-G2KV-110, 2015, G2KV-110, Nisan 2015, TÜBİTAK UME
- [10] Aydemir, B., Calculation of Measurement Uncertainty in Vickers Hardness Testing and Numerical Application, IMASCON Autumn 2019, 01 – 03 November 2019, Kocaeli, P. 582-588
- [11] Aydemir, B., Sertlik ölçüm yöntemlerinin bugünü ve yarını, 2009, Metal Dünyası, Sayı 196, S.84-87, İstanbul

5. Bölüm

SLE ile Üretilen Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Furkan CENGİZ¹

ÖZET

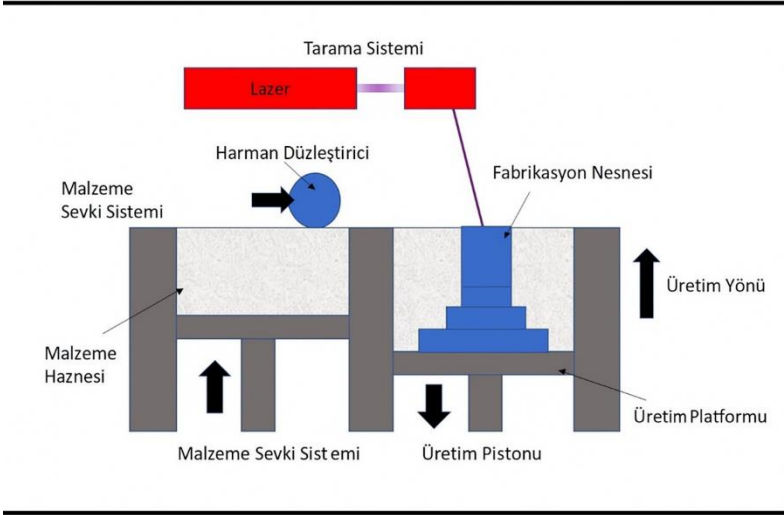
Seçici lazer ergitme (SLE), biyomedikal, savunma, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde son derece özelleştirilmiş ve katma değerli parçalar üretmek için uygulanan bir toz yatak füzyon tipi metal eklemeli imalat sürecidir. Alüminyum alaşımı, hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle bu sektörlerde SLE ile parça imalatında yaygın olarak kullanılan metallerden biridir. Bu tür uygulamalarda kullanılan parçalar, hizmet sırasında şiddetli dinamik yüklemelere ve yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalabilir. SLE ile üretilen bu tür ürünlerin farklı yükleme ve çalışma koşulları altında mekanik tepkisini anlamak önemlidir. Bu makale, araştırma boşluklarını ve gelecekteki araştırma yönlerini belirlemek amacıyla, SLE ile işlenen alüminyum alaşımlarının statik, dinamik, farklı yapı yönelimleri ve ısıtma işlem koşulları altında mekanik özelliklerini anlamak için yürütülen en son araştırmaların kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, Seçici lazer ergitme, Alüminyum alaşımları, mekanik özellikler, çekme

¹ Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
furkan.cengiz11@erzurum.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0011-5476

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ), daha yaygın olarak 3B baskı olarak bilinir ve çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, katman katman üretim süreci sayesinde kafes yapılar gibi oldukça karmaşık parçalar Eİ ile üretilebilmektedir (Hutasoit et al. 2020). Metalik parçaların eklemeli imalat ile üretilebilmesi için seçici lazer ergitme (SLE), elektron ışınlı ergitme (EIE), lazerle tasarlanmış ağ şekillendirme (LTAŞ), doğrudan metal biriktirme (DMB) ve soğuk püskürtmeli eklemeli imalat (SPEİ) gibi çeşitli teknolojiler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin her biri, baskı parçasının kalitesi, mekanik özellik, bileşenin performansı ve üretilebilecek malzeme yelpazesi açısından kendine özgü avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Bu Eİ yöntemleri arasında SLE, havacılık, otomotiv, savunma ve biyomedikal uygulamaları için özelleştirilmiş, yüksek katma değerli ve karmaşık metal bileşenler üretmek amacıyla endüstri tarafından yaygın olarak kabul görmektedir (Fu et al. 2024). SLE, bir lazer ışını kullanılarak bir platform üzerinde metal tozlarının seçici olarak birleştirilmesiyle metal parçalar üreten bir toz yatak füzyon tipi işlemdir. SLE yönteminin şematik gösterimi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. SLE yönteminin şematik gösterimi (Jiao et al. 2018)

Kempen ve arkadaşlarına (Kempen et al. 2012) göre, füzyon, bir işleme yazılımı tarafından oluşturulan 3B baskı yolu boyunca bir lazer ışını tarafından taranan metal tozlarının ergitilmesi ve hızlı bir şekilde katılaştırılması yoluyla gerçekleşir. Alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, paslanmaz çelikler ve

takım çelikleri dahil olmak üzere çelikler, nikel süper alaşımları ve kobalt-krom alaşımları en yaygın SLE yöntemiyle üretilen metallerdir. Mekanik, termal ve diğer özelliklerin dövme veya geleneksel olarak üretilen malzemelerle karşılaştırılabilir olduğu yoğun parçalar oluşturmak için SLE'ye olan ihtiyaç artmaktadır. SLE'de parça kalitesini ve özelliklerini etkileyen ana işlem parametrelerinden bazıları lazer gücü, tarama hızı, yana kayma mesafesi, toz tabakası kalınlığı ve tarama stratejisidir. Maamoun ve arkadaşları (Maamoun et al. 2018), bu işlem parametrelerinin bağlı yoğunluk, gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerindeki etkisine dair ayrıntılı bir çalışma sunmuştur. Her bir performans karakteristiği için istenen değerleri elde etmek üzere işlem haritalarını kullanarak optimum bir parametre belirlediler. Benzer şekilde, Rashid ve arkadaşları (Rashid et al. 2017) tek bir SLE parametresinin, yani tarama stratejisinin değiştirilmesinin, basılı parçaların mikro yapısal ve mekanik özelliklerinde önemli ölçüde farklılıklara yol açabileceğini bildirmiştir. Bu nedenle, farklı SLE işlem parametrelerinin parça kalitesi ve özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak çok önemlidir.

Alüminyum (Al) ve alaşımları, hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, korozyon dirençleri ve iyi kaynaklanabilirlikleri ile öne çıkmaktadır ve bu özellikleri onları otomotiv, havacılık, makine ve takım, savunma ve inşaat gibi çeşitli endüstrilerde uygulamalar için uygun hale getirmektedir Farklı alaşım kombinasyonları arasında alüminyum-silisyum esaslı alaşımlar (Al-Si), özellikle AlSi10Mg, AlSi12, A356 (AlSi7Mg0.3) ve A357 (AlSi7Mg0.7), üretilebilirlikleri nedeniyle SLE sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, SLE ile üretilen Al alaşımlarının mekanik özellikleri üzerine yürütülen en son araştırmalar hakkında bir inceleme sunmaktadır.

2. SLE ile Alüminyum Alaşımlarının Üretimi

SLE ile üretilen alüminyum alaşımları, hafiflikleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları, korozyon direnci ve iyi mekanik özellikleri ile geometrik özgürlük, özelleştirilmiş tasarım ve karmaşık şekiller gibi SLE'nin sunduğu benzersiz avantajlar nedeniyle ilgi çekmektedir. Sonuç olarak, araştırmacıların SLE kullanarak istenen özelliklere sahip Al-Si alaşım bileşenleri üretmeye olan ilgisi artmaktadır. Al-Si alaşımları döküm formunda geniş uygulama alanları bulsada, hızlı erime ve katılma sağlayan lazer tabanlı bir işlem olduğu için SLE kullanılarak işlenmesi zordur. Al tozları hafiftir, düşük akışkanlığa, yüksek yansıtıcılığa ve yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Dahası, Al tozları düşük lazer emilimine sahiptir ve oksidasyona ve topaklanmaya eğilimlidir (Louvis, Fox, and Sutcliffe 2011a). Montero-Sistiaga ve arkadaşları (Montero-Sistiaga et al. 2016), yüksek yansıtıcılık, oksijenle

yüksek reaktivite ve yüksek iletkenliğin yanı sıra, SLE kullanarak alüminyum alaşımlarının üretilmesinde potansiyel zorluklar olduğunu belirtmişlerdir. Bu dezavantajlara rağmen, alüminyum, bu zorlukların bazılarının üstesinden gelmek için diğer metallerle alaşımlanabilmektedir. Bu nedenle, SLE sistemlerinde kullanılan en yaygın iki Al-Si alaşımı AlSi10Mg ve AlSi12'dir. Alüminyuma silisyum eklenmesi akışkanlığını artırır ve erime sıcaklığını düşürür. Alüminyuma magnezyum eklenmesi, katı çözelti güçlendirmesi yoluyla mukavemetini artırır ve ayrıca sertleştirme kabiliyetini de geliştirir (Trevisan et al. 2017). AlSi10Mg hakkında önemli miktarda çalışma yayınlanmış olsa da, AlSi12 ve A356 ve A357 dahil diğer Al-Si alaşımları üzerindeki araştırma çalışmaları hala gelişmektedir (Aboulkhair et al. 2014; Hwang, Bang, and Choa 2023; Siddique, Imran, and Walther 2017; Thijs et al. 2013; Vora et al. 2015; Zou et al. 2022).

Olakanmi ve arkadaşları (Olakanmi, Cochrane, and Dalgarno 2015), alüminyum alaşımlarının yoğunlaştırılmasında proses parametrelerinin, toz özelliklerinin ve lazer tiplerinin etkisini ayrıntılı olarak bildirmiştir. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının SLE yöntemiyle üretimi sırasında ortaya çıkabilecek metalurjik kusurlar, gözeneklilik ve oksidasyon gibi potansiyel sorunları da bildirmişlerdir. Bu işleme zorluklarının temel nedenleri arasında, yüksek yansıtma özelliği, yüksek ısı iletkenlik ve alüminyum alaşım tozlarının zayıf akışkanlığı yer almaktadır. Aversa ve arkadaşları (Aversa et al. 2019) tarafından bildirildiği gibi, bu sorunlar, çeşitli alüminyum alaşımlarının SLE ile üretiminin dezavantajını gidermek üzere özel olarak tasarlanmış yeni alaşımların geliştirilmesiyle ele alınabilir. Bu fikir, SLE yoluyla üretilen çeşitli alüminyum metal matris kompozitlerinin iyileştirilmiş mikro yapılarını ve geliştirilmiş mekanik özelliklerini bildiren Sercombe ve Li (Sercombe and Li 2016) tarafından doğrulanmıştır.

3. SLE ile Üretilen Alüminyum Alaşımların Mekanik Özellikleri

Eklemeli üretimle üretilen herhangi bir parçanın mekanik özelliklerinin karakterizasyonu genellikle oldukça zorlu bir süreçtir. ASTM F3122-14, 3B yazıcıyla üretilen metalik malzemelerin mekanik özelliklerinin çoğunu değerlendirmek için standart kılavuzlar sunsa da, bu amaç için geliştirilmiş belirli bir standart bulunmamaktadır. Bu durum, farklı geometrilere sahip farklı Eİ yazıcıları kullanılarak basılan aynı malzemenin özelliklerinin kıyaslanmasını ve/veya karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, SLE yöntemiyle üretilmiş Al alaşımlarının statik, dinamik ve ısı işlem koşulları altında çeşitli mekanik özelliklerini karakterize etmek için kapsamlı araştırmalar yayınlanmıştır. Isıl işlem, SLM ile üretilen parçanın sünekliği gibi

istenen özelliği elde etmek için gerekli süreçlerden biridir. Ma ve arkadaşları (Ma et al. 2014), hiper-ötektik alaşım AlSi20'nin mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemek için ısıtma işlem uygulamışlardır. Isıtma işlem sürecinde, Si parçacıkları daha iri hale gelmiş ve morfolojisi lifli yapıdan levha benzeri yapıya dönüşmüştür. Ayrıca, öngörüldüğü gibi, ısıtma işlem sırasında mikro yapıdaki değişiklikler mekanik özellikleri etkilemektedir. Mukavemet açısından önemli bir düşüş, diğer yandan süneklikte ise çok yüksek bir artış gözlemlenmiştir.

3.1. SLE Yöntemiyle Üretilen AlSi10Mg Alaşımlar

AlSi10Mg en yaygın alüminyum alaşımlarından biridir ve otomotiv ve havacılık gibi çeşitli 3B baskı uygulamalarında geniş uygulama alanı bulmaktadır. Aboulkhaire ve arkadaşlarına (Aboulkhaire et al. 2014) göre, işlem parametreleri ve tarama stratejisi optimize edildiğinde, SLE ile üretilen AlSi10Mg parçalarının yoğunluğu doğrudan etkilenecektir. Bu nedenle, gözeneklilik bileşeni değerlendirilmiş ve parçanın %99,8 yoğunluğa sahip olduğu bulunmuştur. Read ve arkadaşları (Read et al. 2015) tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numunelerinin mekanik özelliklerinin, aynı bileşimdeki döküm alaşımlarından daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Test edilen mekanik özellikler çekme dayanımı, sürtünme ve porozitedir. Benzer şekilde, Li ve arkadaşları (Li et al. 2016), SLE yöntemiyle üretilen, döküm alaşım AlSi10Mg numunelerinin çözeltiye alınmasının daha iyi süneklik sağladığını (%5'ten yaklaşık %24'e), çekme dayanımının ise 434 MPa'dan yaklaşık 168 MPa'ya önemli ölçüde düştüğünü bildirmiştir. Li ve arkadaşları (Li et al. 2017), inşa edilmiş SLE AlSi10Mg numunelerini inceledi ve bunları mekanik özellikler açısından -70 °C'de test etti. İnşa yönü boyunca balık pulu morfolojisi ve inşa yönüne dik yönde oval yapılar gözlemlendiğini bildirdi. Hitzler ve arkadaşları (Hitzler et al. 2018) tarafından yapılan bir çalışma, SLE ile üretilen AlSi10Mg'nin anizotropik basma davranışına odaklanmıştır. Basma Young modülünün, çekme yükü Young modülünden ve dökme taban malzemesi Young modülünden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Basma Young modülünün yaklaşık 82 GPa olduğu bulunmuştur. Ayrıca, basma akma dayanımının çekme akma dayanımına benzer olduğu, ancak nihai basma dayanımının çekme dayanımından önemli ölçüde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Wang ve arkadaşları (Wang, Wang, and Wu 2017), enerji yoğunluğunun SLE ile üretilen AlSi10Mg'nin yoğunlaşma davranışı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. Yoğunlaşma davranışı, X-ışını ve BT taraması kullanılarak analiz edilmiştir. 140-160 µs pozlama süresiyle 80-105 µm nokta

mesafesinde yüksek bağıl yoğunluk elde edilmiştir. Ayrıca, enerji yoğunluğunun yüzey morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bir yandan, artan enerji yoğunluğu bir top oluşumu kusuruna yol açabilirken, diğer yandan, azalan enerji yoğunluğu gözeneklilik ve mikro çatlaklar gibi kusurlara neden olabilir. Everitt ve arkadaşları (M. Everitt et al. 2016), nano indentasyon yoluyla sertliği araştırdı ve SLE ile üretilen AlSi10Mg numunelerinin döküm muadillerinden daha yüksek sertliğe sahip olduğunu buldu. Ayrıca, mikro yapısal çalışmalar, eriyik havuzu kenarlarında tane boyutlarının arttığını ve bunun numune boyunca Si parçacıklarının homojen dağılımıyla ilişkili olduğunu ortaya koydu. Leon ve Aghion (Leon and Aghion 2017), tarafından yapılan bir çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün, gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanan SLE ile işlenmiş AlSi10Mg üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada, korozyon direnci ve korozyon yorulma performansına odaklanılmıştır. Ayrıca, SLE ile üretilmiş AlSi10Mg numunelerinin sonuçları, döküm muadilleriyle karşılaştırılmıştır. Parlatmanın, SLE numunelerinin korozyon yorulma ömrünü uzattığı, parlatılmamış SLE numunelerinin ise yüzey pürüzlülüğünde ve diğer yüzey kusurlarında artışa neden olduğu bulunmuştur.

3.2. SLE Yöntemiyle Üretilen AlSi12 Alaşımlar

AlSi12 alaşımı, iyi döküm kabiliyeti ve yüksek özgül mukavemet özellikleriyle karakterize edilen ötektik bir alaşım olması nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu alaşımın düşük erime noktası, düşük yoğunluğu ve iyi aşınma özellikleri sayesinde iyi dökülebilirlik sağlamaktadır. AlSi12, otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki uygulamalar için oldukça caziptir. Düşük sıcaklıklarda mukavemetini koruyabildiği için kriyojenik uygulamalarda kullanılabilir (Rathod et al. 2019). Siddique ve arkadaşları (Siddique et al. 2017), otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, motor blokları, silindir kapakları, pistonlar, güç aktarma organları ve emme manifoldları gibi bileşenlerde hafiflik sağlamak için dökme demirin Al-Si alaşımlarıyla değiştirilmesi yönünde bir eğilim olduğunu bildirmiştir. Bu parçaların çoğu, yüksek sıcaklıklardaki dinamik yükleme koşulları altında hareket etmekte ve çalışmaktadır. Bu nedenle, SLE ile işlenen Al-Si alaşımlarının dinamik yükleme, darbe, aşınma ve yüksek sıcaklık koşulları altındaki mekanik davranışını anlamak için kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Prashanth ve arkadaşları (K G Prashanth et al. 2014), SLM AlSi12'nin mekanik davranışını incelemiş ve akma dayanımı ile çekme dayanımının sırasıyla 260 MPa ve 380 MPa olduğunu bildirmiştir. Tavlamanın mikro yapı ve çekme özellikleri üzerindeki etkisi, mekanik özelliklerin hassas bir şekilde

ayarlanabileceğini ve geniş bir mukavemet ve süneklilik aralığının elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Başka bir çalışmada, Prashanth ve arkadaşları (K. G. Prashanth et al. 2014), kayma ve sürtünme aşınma testleri aracılığıyla SLE ile üretilmiş AlSi10Mg'nin tribolojik ve korozyon özellikleri üzerinde tavlamanın etkisini değerlendirmiştir. Kayma aşınması, döküm parçalara kıyasla daha düşük aşınma oranı göstermiştir. Çalışmalar, aşınma özellikleri ve korozyon davranışlarının birbirleriyle korelasyon içinde olduğunu, çünkü her ikisinin de mikro yapıdaki bir değişiklikte güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Mikro yapıdaki değişiklik, ısıtma işleminden kaynaklanmıştır; Si parçacıkları büyüdükçe yoğunluk artmakta ve tavlama sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Başka bir araştırmada, Prashanth ve arkadaşları (Prashanth et al. 2016), hem AlSi12-Titanyum, Niyobyum ve Molibden (TNM) kompozitleri hem de SLE ile üretilen AlSi12 matrisi üzerinde basma testleri gerçekleştirdiler ve davranışlarını incelediler. Basma testleri, TNM+AlSi12 matrisinin saf AlSi12 matrisine kıyasla önemli ölçüde daha iyi basma dayanımına sahip olduğunu ortaya koydu. Ancak, TNM kompozitleri daha az süneklilik gösterdi. Prashanth ve arkadaşları (K G Prashanth et al. 2014) ayrıca, taban plakası ısıtması ve dört farklı tarama stili uyguladıkları SLE AlSi12'nin çekme davranışını da analiz ettiler. Numuneler benzer kristal boyutları ancak farklı dokular gösterdi. Ek olarak, taban plakası ısıtmasıyla üretilen numuneler daha az kalıntı gerilime sahipti. Raporlanan sonuçlar, akma dayanımının 235 MPa ile 290 MPa arasında değişirken, nihai çekme dayanımının 385 MPa ile 460 MPa arasında değiştiği idi. Ayrıca, uzama %2,8 ile %4,5 arasında değişti. Taban plakası ısıtması istenilen sonuçları verdiği için, taban plakası ısıtması 473 K, 573 K ve 673 K olmak üzere üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir ve sırasıyla %3,5, %3 ve %9,5 çekme uzaması elde edilmiştir. Wang ve arkadaşları (Wang et al. 2014), SLE AlSi12 numuneleri üzerinde üretim odası atmosferinin etkisini incelemiştir. Argon, azot ve helyum olmak üzere üç farklı atmosferin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sertlik, yoğunluk ve bağıl yoğunluk analiz edilmiş ve tüm atmosferler için benzer özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, argon ve azot atmosferlerinde üretilen parçaların mekanik özelliklerinin helyum atmosferinden daha iyi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, SLE parçalarının mekanik özellikleri, geleneksel olarak üretilen AlSi12 muadillerinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Lykov ve Baitimerov (Lykov and Baitimerov 2018), en az gözenekliliği sağlamak için işlem parametrelerini belirlemek amacıyla SLE AlSi12'yi araştırdı. Numunelerin farklı mikro yapıya sahip olduğu ve gözenekliliğin yaklaşık %0,5 olduğu bildirildi. AlSi12 tozlarının zayıf akışkanlığa sahip

olduğu bulundu. Yüzey morfolojisi, numunelerin engebeleri bir yüzeye sahip olduğunu ortaya koydu. Yüzey pürüzlülüğünü ve gözenekliliği azaltmak için, yaklaşık 17 µm ince fraksiyonlu AlSi12 tozu kullanılmasının ve tarama stratejisinin çift geçişli lazer tarama stratejisini içermesinin şart olduğunu önerdiler. Mendřický ve Keller (Mendřický and Keller 2014), SLE ile üretilen AlSi12 parçalarının hassasiyetine, geometrisine ve boyutsal doğruluğuna odaklanmıştır. Parça yönlendirmesi, iç gerilimi en aza indirecek şekilde planlanmıştır. Örnek verileri toplamak için SLE parçası sayısallaştırılmıştır. Toplanan veriler, boyutsal ve geometrik doğruluğu değerlendirmek için CAD verileriyle karşılaştırılmıştır. Modelin deformasyonu, inşa edilmiş AlSi12 parçaları üzerindeki iç gerilimden kaynaklanmıştır. Şafka ve diğerleri (Şafka et al. 2015), SLE yapı alt tabakasındaki parça yerleşimini ve yapı yönünü analiz ederek, gereken destek yapılarının miktarını azaltıp SLE AlSi12 parçalarının eğilme mukavemetini artırabileceklerini belirtmişlerdir. En az enerjinin ve dolayısıyla daha az ısı, basılı nihai parçada çok az deformasyona yol açacağını gözlemlemişlerdir.

Chou ve arkadaşları (Chou et al. 2015), AlSi12 için geleneksel SLM yerine darbeli SLM kullanarak yeni bir yaklaşım önermiş ve ısı girdisi üzerinde daha fazla kontrol sağlamıştır. SLM AlSi12'de, 200 nm'nin altında Si incilmesi elde edilmiştir. Ayrıca, %95 yoğun parça ve 135 HV sertlik elde edilmiştir. Darbeli SLM yöntemiyle üretilen parça, geleneksel döküm alaşımli muadilinden daha iyi sertlik sağlamıştır. Soğuma hızı ve termal gradyan, katılma fazı ve mikro yapı üzerinde etkili olmuştur. Suryawanshi (Suryawanshi et al. 2016), SLE AlSi12'nin çekme dayanımını ve tokluğunu araştırmış ve süneklik hariç mekanik özelliklerinin döküm muadillerine göre nispeten daha iyi olduğunu bulmuştur. Tarama stratejisi, özellikle doğrusal tarama ve dama tahtası tarama stili açısından analiz edilmiş ve ikincisinin çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, lazer tarama takibinden kaynaklanan yapı, kırılma tokluğuna yol açmaktadır. Ayrıca, daha yüksek yorulma dayanımı elde etmek için kalıntı gerilmelerin, gözenekliliğin ve erimemiş toz parçacıklarının giderilmesi gerekmektedir. SLE AlSi12'nin, gelişmiş mukavemet ve tokluğa sahip malzeme tasarımı ve üretimi için daha fazla yol sunduğu bulunmuştur. Li ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (Li et al. 2015), SLE AlSi12'nin kontrol edilebilir ve ultra ince bir mikro yapıya sahip olduğu bildirilmiştir. Daha iyi mekanik özellikler, çözeltiye alma ısı işlemiyle elde edilmiştir. Ötektik AlSi12 alaşımının rafine edilmesi için, döküm muadillerine göre daha iyi çekme özellikleri sağlayan yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Çözeltiye tabi tutulan AlSi12'nin yaklaşık %25 çekme uzaması sağladığı bulunmuştur. Ayrıca, çözelti ısı işlem süresinin kontrol

edilmesiyle mekanik özelliklerin uygulamalara göre uyarlanması mümkün olmuştur. Louvis ve arkadaşları (Louvis, Fox, and Sutcliffe 2011b), bağıl yoğunluk elde etmek için SLE AlSi12'nin üretim parametrelerini araştırdı. Araştırılan işlem parametreleri lazer gücü ve lazer tarama hızıydı. Araştırma, paslanmaz çelik ve titanyum alaşımıyla karşılaştırıldığında AlSi12'nin üretiminin zorluğunu anlamak için genişletildi. Bağıl yoğunluğu etkileyen en önemli faktör oksidasyon faktörüydü. İşlem parametreleri, biri 50 W lazer gücüne sahip diğeri 100 W lazer gücüne sahip iki farklı SLE makinesi kullanılarak değiştirildi. Optimum işlem parametreleri kombinasyonu ile, 100 W lazer gücüne sahip makine yalnızca %89,5'lik bağıl yoğunluk üretti. Ayrıca, %100 bağıl yoğunluğa sahip SLE AlSi12 parçaları üretmek için oksit oluşumunu bozmak veya oksidasyonu önlemek için yöntemler geliştirmenin şart olduğu önerildi.

3.3. SLE Yöntemiyle Üretilen AlSi7Mg Alaşımlar

SLE ile üretilmiş iki farklı Al-Si alaşım türü daha vardır: A356 ve A357. Bu iki alaşım da Al-Si-Mg alaşımlarıdır. Her ikisi de ağırlıkça %7 Si içerir, ancak Mg içerikleri biraz farklıdır. A356 alaşımı AlSi7Mg0.3 ve A357 alaşımı AlSi7Mg0.7'dir. Kimura ve Nakamoto (Kimura and Nakamoto 2016), yoğun SLE A356 elde etmek için işlem parametrelerini optimize etmeye çalışmıştır. Lazer ısınlama koşulları altında elde edilen bağıl yoğunluk %99,8 idi. Mekanik test sonuçları, ~400 MPa'lık nihai çekme dayanımı, ~200 MPa'lık akma dayanımı ve %12-17 arasında uzama olarak bulunmuştur. Isıl işlem, SLE A356 numuneleri ile döküm numunelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklerindeki farkı ortaya koydu. Tavlama işleminden sonra, SLE numuneleri %30'a kadar uzadı, A356 numunelerinin çekme dayanımı ise yarı yarıya azalarak ~200 MPa oldu. Yang ve arkadaşları (Yang et al. 2018), mekanik özellik ve mikro yapıyı analiz etmek için gerilim gidermeye odaklanarak SLM A357 üzerindeki ısıl işlemin etkisini araştırmıştır. Üretildiği haliyle A357 numuneleri için, hızlı erime ve hızlı soğuma, Mg₂Si çökeltileri gibi metaller arası fazları etkilemektedir. Isıl işlem süreci sırasında, Si ağının parçalandığı ve bunun da yüksek süneklığe yol açtığı söylenmektedir. Tane sınırlarındaki Si parçacıklarının irileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikro yapı daha homojen hale geldiğinde, akma dayanımı ve sünekliliği etkileyen anizotropinin ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.

3.4. SLE Yöntemiyle Üretilen Diğer Alüminyum Alaşımlar

Araştırma perspektifinden ve istenen mekanik özelliklere sahip uygulamalar için, yeni alüminyum alaşımları SLE kullanılarak geliştirilmekte ve

üretilmektedir. Bu yeni alüminyum alaşımları, Cu, Ni, Sc, Zr, V ve Zn gibi yeni elementlerle alaşımlandırılarak geliştirilmiş olup, SLE ile daha iyi özellikler ve daha iyi işleme imkanı sunmaktadır. Aversa ve arkadaşları (Aversa et al. 2017), SLE için AlSi10Mg ve Ni tozlarının bir kombinasyonu Al-Si-Ni alaşım numuneleri geliştirdiler. Bu kombinasyonun bileşim olarak ötektik olduğu bulundu. Ayrıca, AlSi10Mg ve Ni kombinasyonunun AlSi10Mg'den daha iyi sertliğe sahip olduğu bildirildi. Sertlikteki artış, esas olarak nano girinti ölçümleriyle gösterilen Ni ilavesine atfedildi. SLE işlem parametreleri, gözenekliliği azaltmak için optimize edildi. Spierings ve arkadaşları (Spierings et al. 2017), SLE üretimi için Sc ve Zr modifiyeli AlMg alaşımları geliştirdiler. Sc ve Zr modifiyeli Al alaşımı ticari olarak "Scalmalloy" olarak bilinir ve geleneksel 4xxx döküm alaşımlarına göre daha fazla avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar arasında düşük anizotropide yüksek mukavemet ve yüksek süneklik yer almaktadır. Ayrıca, yapım yönü boyunca ince taneli mikro yapı ve zayıf doku düşük anizotropiye neden olmaktadır. Ayrıca, daha yüksek tarama hızlarının Scalmalloy'un mekanik özellikleri üzerindeki etkisini analiz ettiler ve tane boyutlarının 1,1 µm'den 600 nm'ye düştüğünü buldular. Croteau ve arkadaşları (Croteau et al. 2018), SLE Al-Mg-Zr alaşımlarının mikro yapısını ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. SLE parçalarının imalatı için uygulanan enerji yoğunlukları 123 ila 247 J/mm³ arasında değişmiş ve elde edilen bağlı yoğunluk X-ışını tomografisi kullanılarak doğrulanmıştır. Alaşım elementleri önemli bir role sahiptir; Mg katı çözelti güçlendiricisi olarak görev yaparken, Zr ise tane incilmesi ve sıcak yırtılmanın önlenmesiyle sonuçlanan yarı kararlı çökeltilere katkıda bulunmuştur. Ayrıca, Zr alaşımı mekanik özellikleri iyileştirmiştir.

4. Sonuç

Alüminyum, yaşlanma sertleştirme alaşımları, döküm alaşımları ve iş sertleştirme alaşımları üretmek için Zn, Cu, Mg, Mn ve Si ile birlikte kullanılabilmesine rağmen, bu incelemede odaklanılan alan, seçici lazer ergitme (SLE) metal eklemeli üretim tekniği ile işlenen Al-Si alaşımları ve mekanik özellikleriydi. Al-Si alaşımı, benzersiz bir kombinasyon oluşturan ve SLEde işlenmeye uygun bir aday olan dökülebilirlik ve kaynaklanabilirliğe sahiptir. Belirtildiği gibi, literatür taramasına göre en yaygın SLE alüminyum alaşımları AlSi10Mg ve AlSi12'dir. Bu inceleme, dört ana Al-Si alüminyum alaşımı türü üzerinde proses optimizasyonu, yapı yönlendirmesi ve ısıl işlemin etkileri üzerine yürütülen araştırmalar açısından SLE'de işlenmiş alüminyum alaşımları üzerine yayınlanmış araştırmaların sınıflandırılmasına odaklanmıştır. Yayınlanmış makaleler ayrıca, endüstriyel uygulamalar

açısından hangi mekanik özelliklerin daha derinlemesine araştırılması gerektiğini belirlemek için SLE parçalarında dikkate alınan çeşitli mekanik özellik türlerine göre kategorize edilmiştir. Bu inceleme, SLE alüminyum alaşımlarının çekme mekanik özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, baskı parçalarının çekme ve basma, yorulma, darbe, aşınma ve eğilme tepkisi dinamik davranışları üzerine çok az çalışma yapıldığını ortaya koymuştur. Özellikle, DMB, EIE ve SLE gibi metal bazlı katkı üretim prosesleriyle üretilen parçaların yüksek gerinim oranlı yükleme davranışları üzerine çok az çalışma yayınlanmıştır.

Son olarak, son ısıtma işlemi, üretilen parçaların mikro yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi ve istenen uygulamalar için uygun hale getirilmesinde önemli bir rol oynar. Çoğu araştırmacı, geleneksel olarak üretilen alüminyum alaşımları için kullanılan ısıtma işlemi protokolünü araştırmıştır; ancak bu protokol, farklı doğal özelliklere sahip oldukları için SLE ile üretilmiş parçalar için ideal olmayabilir. Bu nedenle, farklı ısıtma işlem stratejilerinin üretilen parçaların performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Aboulkhair, Nesma T., Nicola M. Everitt, Ian Ashcroft, and Chris Tuck. 2014. "Reducing Porosity in AlSi10Mg Parts Processed by Selective Laser Melting." *Additive Manufacturing* 1:77–86. doi:10.1016/j.addma.2014.08.001.
- Aversa, Alberta, Massimo Lorusso, Giulio Cattano, Diego Manfredi, Flaviana Calignano, Elisa P. Ambrosio, Sara Biamino, Paolo Fino, Mariangela Lombardi, and Matteo Pavese. 2017. "A Study of the Microstructure and the Mechanical Properties of an AlSiNi Alloy Produced via Selective Laser Melting." *Journal of Alloys and Compounds* 695:1470–78. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.285.
- Aversa, Alberta, Giulio Marchese, Abdollah Saboori, Emilio Bassini, Diego Manfredi, Sara Biamino, Daniele Ugues, Paolo Fino, and Mariangela Lombardi. 2019. "New Aluminum Alloys Specifically Designed for Laser Powder Bed Fusion: A Review." *Materials* 12(7).
- Chou, R., J. Milligan, M. Paliwal, and M. Brochu. 2015. "Additive Manufacturing of Al-12Si Alloy Via Pulsed Selective Laser Melting." *JOM* 67(3):590–96. doi:10.1007/s11837-014-1272-9.
- Croteau, Joseph R., Seth Griffiths, Marta D. Rossell, Christian Leinenbach, Christoph Kenel, Vincent Jansen, David N. Seidman, David C. Dunand, and Nhon Q. Vo. 2018. "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Zr Alloys Processed by Selective Laser Melting." *Acta Materialia* 153:35–44. doi:https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.053.
- Fu, Ao, Zhonghao Xie, Jian Wang, Yuankui Cao, Bingfeng Wang, Jia Li, Qihong Fang, Xiaofeng Li, Bin Liu, and Yong Liu. 2024. "Controlling of Cellular Substructure and Its Effect on Mechanical Properties of FeCoCrNiMo0.2 High Entropy Alloy Fabricated by Selective Laser Melting." *Materials Science and Engineering: A* 901:146547. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146547.
- Hitzler, L., N. Schoch, B. Heine, M. Merkel, W. Hall, and A. Öchsner. 2018. "Compressive Behaviour of Additively Manufactured AlSi10Mg." *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik* 49(5):683–88. doi:10.1002/mawe.201700239.
- Hutasoit, N., R. A. Rahman Rashid, S. Palanisamy, and A. Duguid. 2020. "Effect of Build Orientation and Post-Build Heat Treatment on the Mechanical Properties of Cold Spray Additively Manufactured Copper Parts." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110(9):2341–57. doi:10.1007/s00170-020-06010-5.

- Hwang, Woo Jin, Gyung Bae Bang, and Sung Hoon Choa. 2023. "Effect of a Stress Relief Heat Treatment of AlSi7Mg and AlSi10Mg Alloys on Mechanical and Electrical Properties According to Silicon Precipitation." *Metals and Materials International* 29(5):1311–22. doi:10.1007/s12540-022-01304-7.
- Jiao, Lishi, Zhong Chua, Seung Moon, Jie Song, Guijun Bi, and H. Y. Zheng. 2018. "Femtosecond Laser Produced Hydrophobic Hierarchical Structures on Additive Manufacturing Parts." *Nanomaterials* 8:601. doi:10.3390/nano8080601.
- Kempen, Karolien, Lore Thijs, Jan Humbeeck, and Jean-Pierre Kruth. 2012. "Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting." *Physics Procedia* 39:439–446. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.059.
- Kimura, Takahiro, and Takayuki Nakamoto. 2016. "Microstructures and Mechanical Properties of A356 (AlSi7Mg0.3) Aluminum Alloy Fabricated by Selective Laser Melting." *Materials & Design* 89:1294–1301. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.065.
- Leon, Avi, and Eli Aghion. 2017. "Effect of Surface Roughness on Corrosion Fatigue Performance of AlSi10Mg Alloy Produced by Selective Laser Melting (SLM)." *Materials Characterization* 131:188–94. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.06.029.
- Li, Wei, Shuai Li, Jie Liu, Ang Zhang, Yan Zhou, Qingsong Wei, Chunze Yan, and Yusheng Shi. 2016. "Effect of Heat Treatment on AlSi10Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting: Microstructure Evolution, Mechanical Properties and Fracture Mechanism." *Materials Science and Engineering: A* 663:116–25. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088.
- Li, X. P., X. J. Wang, M. Saunders, A. Suvorova, L. C. Zhang, Y. J. Liu, M. H. Fang, Z. H. Huang, and T. B. Sercombe. 2015. "A Selective Laser Melting and Solution Heat Treatment Refined Al-12Si Alloy with a Controllable Ultrafine Eutectic Microstructure and 25% Tensile Ductility." *Acta Materialia* 95:74–82. doi:10.1016/j.actamat.2015.05.017.
- Li, Xiaodan, Jiaqiang Ni, Qingfeng Zhu, Hang Su, Jianzhong Cui, Yifei Zhang, and Jianzhong Li. 2017. "Structure and Mechanical Properties of the AlSi10Mg Alloy Samples Manufactured by Selective Laser Melting." in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 269. Institute of Physics Publishing.
- Louvis, Eleftherios, Peter Fox, and Christopher J. Sutcliffe. 2011a. "Selective Laser Melting of Aluminium Components." *Journal of Materials*

- Processing Technology* 211(2):275–84.
doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019.
- Louvis, Eleftherios, Peter Fox, and Christopher J. Sutcliffe. 2011b. “Selective Laser Melting of Aluminium Components.” *Journal of Materials Processing Technology* 211(2):275–84.
doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019.
- Lykov, P. A., and R. M. Baitimerov. 2018. “Selective Laser Melting of AlSi12 Powder.” *Solid State Phenomena* 284:667–72.
doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.284.667.
- M. Everitt, Nicola, Nesma T. Aboulkhair, Ian Maskery, Chris J. Tuck, and Ian Ashcroft. 2016. “Nanoindentation Shows Uniform Local Mechanical Properties Across Melt Pools And Layers Produced By Selective Laser Melting Of AlSi 10Mg Alloy.” *Advanced Materials Letters* 7(1):13–16.
doi:10.5185/amlett.2016.6171.
- Ma, Pan, Konda Prashanth, Sergio Scudino, Yandong Jia, Hongwei Wang, Chunming Zou, Zunjie Wei, and Jürgen Eckert. 2014. “Influence of Annealing on Mechanical Properties of Al-20Si Processed by Selective Laser Melting.” *Metals* 4(1):28–36. doi:10.3390/met4010028.
- Maamoun, Ahmed H., Yi F. Xue, Mohamed A. Elbestawi, and Stephen C. Veldhuis. 2018. “Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy.” *Materials* 11(12).
doi:10.3390/ma11122343.
- Mendřický, Radomír, and Petr Keller. 2014. “Precision Analysis of Part Manufacturing Using SLM Method.” *Applied Mechanics and Materials* 693:183–88. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.693.183.
- Montero-Sistiaga, Maria L., Raya Mertens, Bey Vrancken, Xiebin Wang, Brecht Van Hooreweder, Jean-Pierre Kruth, and Jan Van Humbeeck. 2016. “Changing the Alloy Composition of Al7075 for Better Processability by Selective Laser Melting.” *Journal of Materials Processing Technology* 238:437–45.
doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.003.
- Olakanmi, E. O., R. F. Cochrane, and K. W. Dalgarno. 2015. “A Review on Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM) of Aluminium Alloy Powders: Processing, Microstructure, and Properties.” *Progress in Materials Science* 74:401–77.
- Prashanth, K. G., B. Debalina, Z. Wang, P. F. Gostin, A. Gebert, M. Calin, U. Kühn, M. Kamaraj, S. Scudino, and J. Eckert. 2014. “Tribological and Corrosion Properties of Al-12Si Produced by Selective Laser Melting.”

- Journal of Materials Research* 89(3):2044–54.
doi:10.1557/jmr.2014.133.
- Prashanth, K G, S. Scudino, H. J. Klauss, K. B. Surreddi, L. Löber, Z. Wang, A. K. Chaubey, U. Kühn, and J. Eckert. 2014. “Microstructure and Mechanical Properties of Al–12Si Produced by Selective Laser Melting: Effect of Heat Treatment.” *Materials Science and Engineering: A* 590:153–60. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.023>.
- Prashanth, Konda G., Sergio Scudino, Anil K. Chaubey, Lukas Löber, Pei Wang, Hooyar Attar, Frank P. Schimansky, Florian Pyczak, and Jürgen Eckert. 2016. “Processing of Al–12Si–TNM Composites by Selective Laser Melting and Evaluation of Compressive and Wear Properties.” *Journal of Materials Research* 31(1):55–65. doi:DOI: 10.1557/jmr.2015.326.
- Rashid, R., S. H. Masood, D. Ruan, S. Palanisamy, R. A. Rahman Rashid, and M. Brandt. 2017. “Effect of Scan Strategy on Density and Metallurgical Properties of 17-4PH Parts Printed by Selective Laser Melting (SLM).” *Journal of Materials Processing Technology* 249:502–11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.023>.
- Rathod, Hemant J., T. Nagaraju, K. G. Prashanth, and U. Ramamurty. 2019. “Tribological Properties of Selective Laser Melted Al12Si Alloy.” *Tribology International* 137:94–101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.04.038>.
- Read, Noriko, Wei Wang, Khamis Essa, and Moataz M. Attallah. 2015. “Selective Laser Melting of AlSi10Mg Alloy: Process Optimisation and Mechanical Properties Development.” *Materials & Design (1980-2015)* 65:417–24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044>.
- Šafka, Jiří, Radomír Mendřický, Michal Ackermann, and Daniel Tuháček. 2015. “Shape and Size Accuracy of 3D-Printed AlSi12 Parts.” *Acta Metallurgica Slovaca* 21(4):278–84. doi:10.12776/ams.v21i4.630.
- Sercombe, T. B., and X. Li. 2016. “Selective Laser Melting of Aluminium and Aluminium Metal Matrix Composites: Review.” *Materials Technology* 31(2):77–85. doi:10.1179/1753555715Y.0000000078.
- Siddique, Shafaqat, Muhammad Imran, and Frank Walther. 2017. “Very High Cycle Fatigue and Fatigue Crack Propagation Behavior of Selective Laser Melted AlSi12 Alloy.” *International Journal of Fatigue* 94:246–54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.003>.
- Spierings, A. B., K. Dawson, K. Kern, F. Palm, and K. Wegener. 2017. “SLM-Processed Sc- and Zr- Modified Al-Mg Alloy: Mechanical Properties and Microstructural Effects of Heat Treatment.” *Materials Science and*

- Engineering: A* 701:264–73.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.089>.
- Suryawanshi, Jyoti, K. G. Prashanth, S. Scudino, J. Eckert, Om Prakash, and U. Ramamurty. 2016. “Simultaneous Enhancements of Strength and Toughness in an Al-12Si Alloy Synthesized Using Selective Laser Melting.” *Acta Materialia* 115:285–94.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.009>.
- Thijs, Lore, Karolien Kempen, Jean Pierre Kruth, and Jan Van Humbeeck. 2013. “Fine-Structured Aluminium Products with Controllable Texture by Selective Laser Melting of Pre-Alloyed AlSi10Mg Powder.” *Acta Materialia* 61(5):1809–19. doi:10.1016/j.actamat.2012.11.052.
- Trevisan, Francesco, Flaviana Calignano, Massimo Lorusso, Jukka Pakkanen, Alberta Aversa, Elisa Paola Ambrosio, Mariangela Lombardi, Paolo Fino, and Diego Manfredi. 2017. “On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties.” *Materials* 10(1).
- Vora, Pratik, Kamran Mumtaz, Iain Todd, and Neil Hopkinson. 2015. “AlSi12 In-Situ Alloy Formation and Residual Stress Reduction Using Anchorless Selective Laser Melting.” *Additive Manufacturing* 7:12–19.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.003>.
- Wang, Lin-zhi, Sen Wang, and Jiao-jiao Wu. 2017. “Experimental Investigation on Densification Behavior and Surface Roughness of AlSi10Mg Powders Produced by Selective Laser Melting.” *Optics & Laser Technology* 96:88–96.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.05.006>.
- Wang, X. J., L. C. Zhang, M. H. Fang, and T. B. Sercombe. 2014. “The Effect of Atmosphere on the Structure and Properties of a Selective Laser Melted Al–12Si Alloy.” *Materials Science and Engineering: A* 597:370–75.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.012>.
- Yang, Kun V, Paul Rometsch, C. H. J. Davies, Aijun Huang, and Xinhua Wu. 2018. “Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Anisotropy in Mechanical Properties of A357 Alloy Produced by Selective Laser Melting.” *Materials & Design* 154:275–90.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.026>.
- Zou, Tianchun, Mingying Chen, He Zhu, and Siyuan Mei. 2022. “Effect of Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi7Mg Fabricated by Selective Laser Melting.” *Journal of Materials Engineering and Performance* 31(3):1791–1802. doi:10.1007/s11665-021-06324-9.

6. Bölüm

Yapay Zekâ Destekli Yazılım Testi: Yöntemler, Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri

Fatih YÜCALAR¹, Akın ÖZÇİFT²

Özet

Yapay zekâ, yazılım test süreçlerini geleneksel yöntemlerin ötesine taşıyarak bu alanda köklü bir dönüşüm başlatmıştır. Bu bölümde, yapay zekânın test otomasyonuna entegrasyonu, temel bileşenleri ve gerçek dünya uygulamaları ayrıntılı bir şekilde ele alınmaktadır. Geleneksel test yaklaşımlarının genellikle statik, kırılgan ve yüksek bakım maliyetli yapısına karşılık, yapay zekâ destekli sistemler; otonom test senaryosu üretimi, kendi kendini onarabilen betikler ve akıllı hata analizi gibi ileri düzey yeteneklerle öne çıkmaktadır. Finans, sağlık, e-ticaret ve otomotiv gibi farklı sektörlerdeki vaka analizleri, yapay zekânın yalnızca test verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda daha kapsamlı, doğru ve öngörülebilir test süreçleriyle yazılım kalitesini önemli ölçüde yükselttiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu dönüşüm süreci; veri kalitesine duyulan yüksek bağımlılık, başlangıç yatırım maliyetlerinin fazlalığı ve yapay zekâ modellerinin açıklanabilirlikten uzak "kara kutu" doğası gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Ancak geleceğe yönelik beklentiler umut vericidir. Üretken yapay zekâ uygulamaları, proaktif hata önleme sistemleri ve insan- yapay zekâ etkileşimine dayalı hibrit yaklaşımlar sayesinde bu engellerin aşılması öngörülmektedir. Yapay zekâ destekli test çözümleri, yalnızca reaktif hata tespitiyle sınırlı kalmayıp, yazılım yaşam döngüsü içerisinde proaktif risk yönetiminin etkin bir aracı haline gelerek test süreçlerini daha akıllı, çevik ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürmektedir. Bu bölüm, yapay zekânın yazılım testi alanında sunduğu potansiyeli, karşılaşılan zorlukları ve gelecek eğilimlerini anlamak isteyen araştırmacılar ve uygulayıcılar için kapsamlı bir rehber niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Yazılım Testi, Test Otomasyonu, Yapay Zekâ, Yapay Zekâ Destekli Yazılım Testi, Otonom Test Sistemleri.

¹ Doç. Dr.; Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü. fatih.yucalar@cbu.edu.tr; ORCID No: 0000-0002-1006-2227

² Prof. Dr.; Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü. akin.ozcift@cbu.edu.tr; ORCID No: 0000-0002-5317-5678

GİRİŞ

Günümüz yazılım geliştirme dünyası, çevik metodolojiler, DevOps ve Sürekli Entegrasyon/Sürekli Dağıtım (Continuous Integration/Continuous Deployment – CI/CD) gibi hız ve çeviklik odaklı yaklaşımların etkisiyle köklü bir dönüşüm geçirmektedir. Bu hızlı ve dinamik üretim ortamında, yazılım kalitesini güvence altına alma süreçleri, her zamankinden daha karmaşık, daha kritik ve aynı zamanda daha zaman baskısı altında yürütülmektedir. Geleneksel test yöntemleri – özellikle manuel testler ve önceden tanımlanmış statik test senaryoları – bu hız, ölçek ve karmaşıklık karşısında yetersiz kalmakta, test sürecinin darboğaz haline gelmesine neden olmaktadır (Humble & Harley, 2010). Modern yazılımların sahip olduğu çok çeşitli kullanıcı arayüzleri ve senaryo kombinasyonları, test edilecek durumların geometrik olarak artmasına, yani test senaryolarının sayısında adeta bir “kombinatoriyal patlamaya” yol açarak; bu da test kapsamının tam anlamıyla sağlanmasını neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Bu bağlamda, manuel testlerin yavaşlığı, hata eğilimi ve yüksek maliyeti; test otomasyonu için yazılan kodların ise yoğun bakım ve güncelleme gereksinimi, test süreçlerinde önemli darboğazlar yaratmaktadır (Zhang vd., 2022).

Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, yazılım endüstrisi giderek artan bir biçimde Yapay Zekâ (YZ) ve Makine Öğrenmesi (Machine Learning – ML) teknolojilerine yönelmektedir. YZ destekli test yaklaşımları, geleneksel test otomasyonunun sınırlarını aşarak, akıllı, otonom ve çevresel değişkenlere uyum sağlayabilen sistemler geliştirmeyi hedeflemektedir (Islam vd., 2023). Bu yeni paradigma sayesinde, geçmiş test verilerinden öğrenebilen algoritmalar; potansiyel hata noktalarını önceden tahmin edebilmekte, test senaryolarını önceliklendirebilmekte ve hatta daha önce tanımlanmamış yeni test yollarını dinamik olarak üretebilmektedir (Zhang vd., 2022). Örneğin, Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing – NLP) teknikleri kullanılarak gereksinim dokümanlarından otomatik test senaryoları çıkarılabilirken, bilgisayarlı görü algoritmaları sayesinde kullanıcı arayüzündeki görsel regresyon hataları insan müdahalesi olmadan tespit edilebilmektedir (Pandhare, 2025). Böylece test süreçleri; daha hızlı, daha kapsamlı ve insan hatalarından arındırılmış biçimde yürütülebilir hale gelmektedir (Abu Bakar, 2025).

Bu bölüm, YZ destekli test otomasyonunun temel prensiplerini, yöntemlerini ve uygulama alanlarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Amacımız, YZ ve ML algoritmalarının test süreçlerine nasıl entegre edildiğini açıklamak; otomatik test senaryosu üretimi, yürütülmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik yaklaşımları detaylandırmak; aynı zamanda bu teknolojilerin doğasında bulunan zorlukları ve gelecekteki potansiyel katkılarını tartışmaktır. Bu çalışma, YZ’nin yazılım test ekosistemine olan etkisini sistematik biçimde ortaya koyarak, daha

sağlam, verimli ve akıllı bir kalite güvence yaklaşımı inşa etme yolunda kapsamlı bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir.

YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ TEST SENARYOSU GELİŞTİRME

YZ destekli test (AI-powered testing), geleneksel yazılım test paradigmalarının karşılaştığı temel zorluklara çözüm üretme amacıyla ortaya çıkmıştır. Geleneksel test yaklaşımları, çoğunlukla kullanıcı hikâyelerinden veya gereksinim dokümanlarından türetilen statik ve önceden tanımlı test senaryolarına dayanır. Bu yöntemler, özellikle regresyon testleri gibi tekrarlayan görevlerde belirli bir düzeye kadar etkili olsa da yazılımın keşifsel yönlerini test etmede, dinamik kullanıcı davranışlarına uyum sağlamada ve beklenmedik hataları tespit etmede yetersiz kalabilmektedir (Ricca vd., 2023). Ayrıca, geleneksel otomasyon teknikleri test sürecinin yalnızca “tekrar” eden kısmını otomatikleştirir; buna karşılık testin daha karmaşık ve zekâ gerektiren “tasarım”, “analiz” ve “önceliklendirme” gibi aşamalarını çoğunlukla göz ardı eder. Bu da testin kapsamını ve etkinliğini sınırlayan önemli bir darboğazdır.

YZ destekli testin temel yaklaşımı, makine öğrenmesi (ML), derin öğrenme (DL) ve doğal dil işleme (NLP) gibi algoritmaları test süreçlerinin bu daha yüksek bilişsel düzeydeki aşamalarına entegre etmektir. Bu sayede test süreçleri yalnızca yazılımın doğruluğunu kontrol eden bir mekanizma olmaktan çıkar; yazılımın davranışını anlayabilen, değişiklikleri bağlama göre yorumlayabilen ve hataları proaktif biçimde tespit edebilen akıllı sistemlere dönüşür (Fu vd., 2018). YZ destekli test uygulamalarının en büyük avantajlarından biri, dinamik ve evrimsel test senaryoları oluşturabilmesidir. Sistem, yazılımın önceki sürümlerinden ve kullanıcı etkileşimlerinden elde edilen verilere dayanarak, riskli bileşenleri önceliklendirebilir, eksik test alanlarını belirleyebilir ve hiç düşünülmemiş test yollarını keşfedebilir. Bu, özellikle büyük ve sık değişen yazılım projelerinde test verimliliğini ve yazılım güvenilirliğini artıran kritik bir avantajdır. Bu bağlamda, YZ destekli testin üç temel bileşeni öne çıkmaktadır:

- **Akıllı Test Senaryosu Üretimi (Intelligent Test Case Generation):** Geleneksel test senaryosu üretimi, çoğunlukla manuel olarak veya önceden tanımlanmış kurallar çerçevesinde gerçekleştirilir ve bu durum test kapsamını sınırlayıcı bir etki yaratır. Buna karşılık, YZ tabanlı yaklaşımlar; geçmiş test verileri, kullanıcı etkileşim kalıpları ve gereksinim dokümanları gibi çeşitli kaynaklardan öğrenerek yeni ve etkili test senaryolarını dinamik ve adaptif biçimde oluşturabilir. Bu yöntem, yalnızca mevcut test kapsamını genişletmekle kalmaz, aynı zamanda olasılığı yüksek olan hata alanlarını hedefleyerek risk odaklı test stratejilerinin uygulanmasını da mümkün kılar. Ayrıca test tasarımcılarının

üzerindeki manuel iş yükünü önemli ölçüde azaltır ve daha stratejik görevler için zaman kazandırır (Mohapatra, 2025).

- **Akıllı Test Yürütme ve Optimizasyon (Intelligent Test Execution and Optimization):** YZ algoritmaları, sadece neyin test edileceğini değil, ne zaman ve hangi sırayla test edileceğini de optimize edebilir. Bu sayede, mevcut kaynaklar daha verimli kullanılırken, yüksek risk barındıran modüllere öncelik verilerek hata yakalama oranı artırılabilir (Zhang, 2024). ML temelli önceliklendirme algoritmaları, test senaryolarını yazılımın geçmiş arızalarına, kullanım sıklığına veya değişim yoğunluğuna göre sıralayabilir. Bunun yanı sıra, gereksiz veya düşük öncelikli testlerin devre dışı bırakılması, test süresini ve sistem kaynak kullanımını azaltarak sürekli entegrasyon/delivery (CI/CD) süreçlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırır (Yang, 2025).
- **Akıllı Hata Analizi ve Raporlama (Intelligent Defect Analysis and Reporting):** YZ destekli test sistemleri yalnızca hata bulmakla kalmaz, aynı zamanda bulunan hataların anlamlı ve eyleme dönüştürülebilir biçimde analiz edilmesini sağlar. Test sonuçları otomatik olarak işlenerek, olası hata kök nedenleri (root causes) belirlenir ve hata raporları geliştirici ekipler için daha açıklayıcı hâle getirilir. Özellikle anomali tespiti algoritmaları, sistemde beklenmeyen davranışları, performans sapmalarını ya da kullanıcı arayüzündeki görsel farklılıkları algılayarak, manuel testle tespit edilmesi zor olan sorunları gün yüzüne çıkarabilir. Bu yaklaşım, hata ayıklama süresini azaltırken, sistem güvenilirliğini ve kullanıcı memnuniyetini artırır (Chigurupati & Lassar, 2017).

YZ destekli test sistemleri, yazılım testinin yalnızca otomasyon boyutunu geliştirmekle kalmaz; aynı zamanda test süreçlerini daha akıllı, çevik ve öngörülü hâle getirir. Bu dönüşüm, test mühendislerinin manuel ve tekrar eden görevlerden sıyrılarak daha yüksek seviyeli, stratejik test planlama, test mimarisi tasarımı ve risk yönetimi gibi alanlara odaklanmasına olanak tanır. Aynı zamanda genel yazılım kalitesinin artırılmasına, daha hızlı sürüm döngülerine ve müşteri memnuniyetinde artışa doğrudan katkı sağlar.

YZ İLE OTOMATİK TEST SENARYOSU OLUŞTURMA

Test otomasyonunda en çok çaba gerektiren ve en zorlu aşamalardan biri, etkili test senaryolarının tasarlanması ve oluşturulmasıdır. YZ, bu süreci tamamen otomatikleştirebilecek veya büyük ölçüde destekleyebilecek çeşitli yöntemler sunmaktadır (Brunetto vd., 2021). Bu yöntemler, yalnızca statik gereksinim dokümanlarını değil, aynı zamanda dinamik uygulama davranışlarını da dikkate alarak geniş bir veri yelpazesini kullanır. Böylece insan müdahalesine gerek

kalmadan yüksek kaliteli, kapsamlı ve bağlama duyarlı test vakaları üretmek mümkün hâle gelmektedir.

Model Tabanlı Test Senaryosu Üretimi

Model tabanlı test senaryosu üretim yaklaşımı, test edilecek sistemin bir modelini (örneğin durum geçiş diyagramı veya sistem davranış modeli) oluşturarak çalışır. YZ algoritmaları, bu model üzerinde en uygun veya en riskli yolları keşfederek test senaryoları üretir (Mohd-Shafie vd., 2022). Bu yaklaşım, özellikle karmaşık iş akışlarına sahip sistemler için oldukça etkilidir. ML modelleri, geçmiş verilere dayanarak hangi durum geçişlerinin daha sık hata ürettiğini öğrenebilir ve test senaryolarını bu bilgilere göre önceliklendirebilir. Örneğin, bir web uygulamasının ana akışında en sık kullanılan 1000 yolu modelleyen bir grafik oluşturularak, bu yolların uç durumlarını ve nadir görülen kombinasyonlarını test eden senaryolar otomatik olarak türetilir. Böylece hem yaygın kullanım senaryoları hem de beklenmedik durumlar kapsanarak test kapsamı artırılmış olur.

Doğal Dil İşleme Kullanımı

Yazılım gereksinimleri genellikle doğal dilde ifade edilmektedir. Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing – NLP) teknikleri, bu metinleri analiz ederek anlamlı bilgileri çıkarabilir ve bu bilgilerden otomatik olarak test senaryoları üretebilir. NLP algoritmaları, gereksinim dokümanlarındaki anahtar kelimeleri, fiilleri ve nesneleri (örneğin, “Kullanıcı, sepete ürün ekleyebilmelidir”) tespit ederek bu eylemleri ve beklentileri test senaryolarına dönüştürür (Mustafa vd., 2021). Böylece gereksinimler ile test senaryoları arasında güçlü bir bağ kurulmakta, ayrıca gereksinimlerdeki herhangi bir değişiklik test senaryolarının otomatik olarak güncellenmesini sağlamaktadır. Son yıllarda gelişen Büyük Dil Modelleri (LLM’ler), daha karmaşık, bağlamsal ve insan benzeri test senaryoları üretme potansiyeliyle bu alanda önemli bir ilerleme kaydetmektedir.

Üretken Karşıt Ağlar ve Evrimsel Algoritmalar

Test verisi oluşturmak, özellikle uç senaryolar ve karmaşık senaryoları kapsayan verilerin elde edilmesi açısından test sürecindeki en büyük zorluklardan biridir. YZ bu sorunu, Üretken Karşıt Ağlar (Generative Adversarial Networks – GANs) gibi gelişmiş modeller aracılığıyla ele almaktadır. GAN’ler, sentetik ancak gerçekçi test verileri üretebilen iki sinir ağından (üreteç ve ayırt edici) oluşur. Bu mekanizma sayesinde, uygulamanın davranışını taklit eden ve mevcut verilerde yer almayan yeni durumları kapsayan test verileri üretilir. Böylece test senaryoları daha kapsamlı hale gelir ve geleneksel yöntemlerle ortaya çıkarılması zor olan güvenlik açıkları veya nadir görülen hatalar tespit edilebilir (Guo vd., 2022).

Benzer şekilde, Evrimsel Algoritmalar da test senaryosu üretiminde güçlü bir yaklaşım sunmaktadır. Bu algoritmalar, doğal seçim ilkesini taklit ederek bir test senaryosu popülasyonunu sürekli olarak “evrimleştirir” (Latiu vd., 2012). Her test senaryosu, yazılımda kod kapsamını artırma veya hata tetikleme potansiyeli gibi belirli bir amaca (fitness function) göre değerlendirilir. En iyi performans gösteren senaryolar bir sonraki nesil için “üretilirken”, düşük başarı gösterenler elenir. Bu döngü, en yüksek potansiyel hata bulma oranına sahip test senaryoları elde edilene kadar devam eder.

YZ İLE TEST SENARYOLARININ YÜRÜTÜLMESİ VE ANALİZİ

Yazılım geliştirme sürecinde test otomasyonunun değeri, yalnızca test senaryolarının oluşturulmasıyla sınırlı değildir; aynı zamanda bu senaryoların etkin bir şekilde yürütülmesi, sonuçların doğru ve anlamlı biçimde analiz edilmesi ve süreçten değerli çıkarımlar elde edilmesi de kritik önem taşır. Geleneksel test otomasyonu araçları, çoğunlukla statik ve önceden tanımlanmış komut dosyalarını çalıştırmakla sınırlı kalırken, YZ destekli yaklaşımlar bu sürece dinamiklik, öğrenme yeteneği ve öngörü kazandırmaktadır. Böylece test süreçleri yalnızca otomatikleştirilmekle kalmaz, aynı zamanda adaptif, kendini geliştiren ve daha proaktif bir yapıya kavuşarak yazılım kalitesini artırmada daha etkin bir rol üstlenir.

Akıllı Test Yürütme Motorları ve Senaryo Optimizasyonu

Akıllı test yürütme motorları, geleneksel test motorlarının aksine yalnızca pasif araçlar olmaktan çıkarak, aktif problem çözücüler haline gelmektedir. Bu motorlar; test yürütme verilerini, kod değişikliklerini ve hata geçmişini sürekli analiz ederek test senaryolarını dinamik biçimde önceliklendirmektedir (Khankhoje, 2023). Örneğin, bir CI/CD hattında son kod değişikliğinin hangi modülleri veya özellik alanlarını etkilediğini belirlemek için kod bağımlılık grafikleri ile ML modelleri kullanılabilmektedir (John vd., 2025). Böylece yalnızca ilgili test senaryoları çalıştırılırken, diğerleri atlanabilir; bu yaklaşım test süresini önemli ölçüde kısaltarak geliştirme hızını artırmaktadır.

Akıllı yürütme motorlarının en dikkat çekici özelliklerinden biri, kendi kendini onaran (self-healing) test senaryolarını destekleyebilmesidir. Geleneksel otomasyon testlerinde, bir web sayfasındaki öğenin (örneğin bir butonun) kimliği (ID) veya yolu (XPath) değiştiğinde test hemen başarısız olur ve manuel müdahale gerektirir. Oysa YZ destekli motorlar, bilgisayarlı görü algoritmalarını kullanarak öğenin görsel özelliklerini (konum, boyut, renk gibi), metin içeriğini ve hatta HTML yapısını analiz ederek öğenin yeni konumunu ya da kimliğini akıllıca belirleyebilir ve testi kesintisiz sürdürebilir (Saarathy vd., 2024). Buna ek olarak, pekiştirmeli öğrenme algoritmaları uygulamanın dinamik arayüz değişikliklerine nasıl adapte olunacağını

öğrenerek test senaryolarını daha dayanıklı hale getirmektedir. Bu sayede, test senaryolarının bakım maliyetleri dramatik biçimde azalırken, test otomasyonunun sürdürülebilirliği de önemli ölçüde artmaktadır.

YZ Destekli Hata Tespiti ve Kök Neden Analizi

Test yürütme sonuçlarının derinlemesine incelenmesi, YZ'nin yazılım testine kattığı en önemli değerlerden biridir. Geleneksel test raporları yalnızca “geçti” veya “kaldı” gibi basit çıktılar sunarken, YZ algoritmaları bu verilerden çok daha kapsamlı içgörüler üretebilir. ML modelleri; binlerce test çalışmasından elde edilen log dosyalarını, hata mesajlarını ve performans metriklerini analiz ederek, insan gözünden kaçabilecek anomali ve örüntüleri ortaya çıkarır. Bu tür anomali tespiti, özellikle “geçmişte başarılı iken şimdi başarısız olan (flaky) testlerin” veya nadir görülen sistem davranışlarının belirlenmesi açısından kritik önem taşır (Tahir vd., 2023).

YZ, hata tespitini yalnızca yüzeysel bir analizle sınırlamaz, aynı zamanda kök neden analizi için de etkili bir araçtır. Örneğin, bir testin neden başarısız olduğunu belirlemek amacıyla, ML modelleri testin başarısız olduğu andaki sistem durumunu, ilgili kod değişikliklerini (commit'leri) ve diğer test sonuçlarını bir arada değerlendirerek potansiyel hata kaynaklarını tahmin edebilir (Hirsch & Hofer, 2020). Ayrıca, doğal dil işleme (NLP) algoritmaları; test senaryosu açıklamaları ve hata mesajlarının metinsel içeriğini çözümleyerek, hatanın semantik açıdan ne anlama geldiğini daha iyi kavrayabilir. Bu derinlemesine analiz, geliştiricilerin hata ayıklama sürecini hızlandırırken, yazılım kalitesinin proaktif biçimde iyileştirilmesine de katkı sağlar (Necula vd., 2024).

Tahmine Dayalı Bakım ve Test Kümesi Optimizasyonu

YZ, test sürecinin bakım ve optimizasyon aşamalarına entegre edilerek, test mühendislerinin daha bilinçli ve stratejik kararlar almasına katkı sağlar. Geçmiş test verilerinden öğrenen tahmine dayalı modeller, hangi test senaryolarının “flaky” olmaya ya da gereksiz hale gelmeye yatkın olduğunu öngörebilir. Flaky testler, aynı kod tabanında kimi zaman başarısız, kimi zaman ise başarılı sonuç üreten güvenilir testlerdir ve CI/CD hattında ciddi zaman ve kaynak kaybına yol açabilir. YZ modelleri bu testleri önceden tespit ederek, test mühendislerine bu senaryoları gözden geçirmeleri veya yeniden tasarlamaları için proaktif öneriler sunar (Ahmad vd., 2020). Benzer şekilde, YZ, geliştiricilerin gerçekleştirdiği kod değişikliklerinin hangi test senaryolarını etkileme olasılığının yüksek olduğunu tahmin edebilir. Bu sayede yalnızca ilgili ve gerekli testler çalıştırılarak test süreci optimize edilir. Bu yaklaşım, tüm test kümesini çalıştırmak yerine en yüksek riski taşıyan alt kümenin seçilmesini sağlayarak hem zaman hem de kaynak kullanımında önemli tasarruflar

yaratır (Machalica vd., 2019). Sonuç olarak, tahmine dayalı bakım ve test kümesi optimizasyonu, özellikle çok sayıda test senaryosuna sahip büyük ölçekli projelerde, test maliyetlerinin azaltılmasında ve sürelerin kısaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedir.

YZ DESTEKLİ TESTLERİN GERÇEK DÜNYA UYGULAMALARI VE VAKA ANALİZLERİ

YZ destekli testler, artık yalnızca teorik bir kavram olmaktan çıkmış, yazılım kalitesinin kritik öneme sahip olduğu sektörlerde aktif biçimde uygulanan bir gerçekliğe dönüşmüştür. Bu teknolojilerin sunduğu hız, kapsam ve doğruluk; finans, sağlık, e-ticaret ve otomotiv gibi karmaşık ve yüksek risk içeren alanlarda yazılım geliştirme ve test süreçlerini köklü bir biçimde dönüştürmektedir. Bu bölümde, YZ'nin söz konusu sektörlerde nasıl uygulandığını ortaya koyan somut kullanım örnekleri ve ayrıntılı vaka analizleri ele alınmaktadır.

Finans Sektörü Uygulamaları

Finansal yazılımlar, yüksek güvenlik gereksinimleri, anlık işlem hacimleri ve katı düzenleyici standartlar nedeniyle test süreçlerinde benzersiz zorluklar barındırır. YZ destekli test, bu zorlukların üstesinden gelmek için kritik bir rol oynamaktadır.

Dijital Bankacılık Uygulamaları için Test Süreçleri: Büyük ölçekli bir bankanın mobil bankacılık uygulaması, yüzlerce farklı cihaz modeli ve işletim sistemi sürümünde kusursuz bir kullanıcı deneyimi sunmak zorundadır. Geleneksel yöntemlerle bu cihazların tamamında görsel tutarlılığı manuel olarak denetlemek neredeyse imkânsızdır. YZ bu soruna, görsel regresyon testi yetenekleri aracılığıyla çözüm sunmaktadır (Moradi vd., 2024). YZ destekli bilgisayarlı görü (computer vision) algoritmaları, uygulamanın arayüzüne ait binlerce ekran görüntüsünü saniyeler içinde analiz ederek, kod değişikliklerinden kaynaklanan piksel kaymaları, yazı tipi bozulmaları veya beklenmedik görsel hataları insan gözünden çok daha hızlı ve hatasız biçimde tespit edebilmektedir. Bu sayede kullanıcı deneyiminde görsel tutarlılık korunmuş, aynı zamanda bankanın test süresi yaklaşık %80 oranında kısaltılmıştır.

Dolandırıcılık Tespit Sistemleri için Test Süreçleri: Finansal kuruluşlar, dolandırıcılık faaliyetlerini belirlemek amacıyla giderek daha karmaşık ML modelleri geliştirmektedir. Ancak bu modellerin etkinliğini test etmek, yeni ve sofistike dolandırıcılık yöntemlerini simüle edecek uygun test verilerinin eksikliği nedeniyle önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu noktada, Üretken Karşıt Ağlar (Generative Adversarial Networks – GANs), mevcut dolandırıcılık verilerinden öğrenerek özgün ve gerçekçi sentetik veriler üretmektedir (Efimov vd., 2019). Üretilen bu sentetik veriler, hassas müşteri verilerine ihtiyaç duyulmaksızın,

dolandırıcılık tespit modellerinin bilinmeyen senaryolara karşı dayanıklılığını sınamak için kullanılmaktadır. Böylece, modellerin gerçek zamanlı performansına ilişkin güvenilir içgörüler elde edilirken, aynı zamanda veri gizliliği riskleri de ortadan kaldırılmaktadır.

Sağlık Sektörü Uygulamaları

Sağlık sektöründe kullanılan yazılımlar, hasta güvenliği ve veri gizliliğini (örneğin HIPAA gibi düzenlemelerle) en üst düzeyde korumak zorundadır. Bu nedenle, test süreçlerinin yalnızca hızlı değil aynı zamanda yüksek güvenilirlik ve doğrulukla yürütülmesi kritik öneme sahiptir. YZ, bu alandaki test süreçlerini otomatikleştirerek hem kapsamı genişletmekte hem de hata tespit oranını artırmaktadır.

Medikal Görüntüleme Yazılımları için Test Süreçleri: Medikal görüntüleme yazılımları, röntgen, MRI veya BT gibi görüntüleri analiz ederek klinik teşhislere destek sağlar. Bu tür yazılımların test edilmesi, farklı çözünürlük, kontrast düzeyleri ve anomali türleri karşısında yazılımın doğru tepki verebilmesini garanti etmeyi gerektirir. YZ, model tabanlı test senaryosu üretimi tekniklerini kullanarak, gerçek hasta verilerine ihtiyaç duymadan farklı şiddet ve konumlardaki anomalileri içeren binlerce sentetik tıbbi görüntü üretebilmektedir (Frid-Adar vd. 2018). Bu sentetik görüntülerle gerçekleştirilen testler sayesinde, yazılımın nadir görülen hastalık belirtilerini dahi doğru şekilde algılama ve yorumlama kapasitesi güvenilir biçimde doğrulanmaktadır. Böylece hem yazılım güvenilirliği artırılmakta hem de etik ve yasal açıdan kritik olan hasta verisi gizliliği korunmaktadır.

E-Sağlık Platformlarında Uyumluluk ve Güvenliği için Test Süreçleri: E-sağlık platformları, hasta verilerinin gizliliğini ve bütünlüğünü korumak amacıyla katı yasal düzenlemelere tabidir. YZ destekli testler, bu platformların kullanıcı arayüzlerini ve veri akışlarını düzenli olarak izleyerek otomatik güvenlik açığı taramaları gerçekleştirir ve veri giriş formlarının gizlilik ile uyumluluk kurallarına uygunluğunu doğrular (Hossain vd., 2020). Örneğin, doğal dil işleme (NLP) algoritmaları, yazılımın hata mesajlarını analiz ederek sistemin olası bir veri sızıntısı durumunda kullanıcıya yanıltıcı veya eksik bilgi verip vermediğini tespit edebilir. Bu proaktif yaklaşım, yalnızca düzenleyici kurum denetimlerinden önce potansiyel uyumluluk sorunlarının belirlenmesine katkı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sistemin güvenilirliğini ve hasta güvenliğini de güçlendirir.

Otomotiv Sektörü Uygulamaları

Otonom sürüş sistemleri ve modern araç içi eğlence çözümleri, gerçek zamanlı karar verme, güvenlik, kullanıcı deneyimi ve farklı bileşenlerin entegrasyonu gibi çok boyutlu gereksinimler nedeniyle otomotiv sektörünü yazılım mühendisliğinin en karmaşık ve kritik alanlarından biri haline getirmiştir.

Otonom Sürüş Sistemlerine Yönelik Simülasyonlar için Test Süreçleri:

Otonom araç yazılımları, binlerce farklı trafik, hava durumu ve yol koşulu senaryosuna göre test edilmek zorundadır. Gerçek dünyada bu senaryoları uygulamak hem tehlikeli hem de son derece maliyetlidir. YZ, bu soruna çözüm olarak simülasyon tabanlı test ortamları oluşturmaktadır (Cho & Behl, 2020). Öğrenme modelleri kullanan YZ sistemleri, yoğun yağmur altında yola çıkan bir yaya ya da sisli havada ani şerit değiştiren bir araç gibi dinamik koşulların sanal ortamlarda nasıl sonuçlar doğurduğunu test edebilmektedir. Pekiştirmeli öğrenme algoritmaları ise test sürecini insan müdahalesine daha az ihtiyaç duyacak şekilde otomatikleştirerek, en riskli ve hata yapma olasılığı en yüksek senaryoların keşfedilmesine odaklanır. Bu yaklaşım, araç güvenliğinin gerçek dünya koşullarını yüksek doğrulukla taklit eden ortamlarda kapsamlı biçimde doğrulanmasını sağlamakta ve geliştirme süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Koren vd., 2018).

E-ticaret Uygulamaları

E-ticaret platformları, sürekli güncellenen ürün içerikleri, kişiselleştirilmiş kullanıcı deneyimleri ve özellikle promosyon dönemlerinde karşılaşılan yoğun trafik yükü nedeniyle son derece dinamik bir test ortamı gerektirir. Bu hızlı değişimlere karşı, geleneksel otomasyon yaklaşımları senaryo çeşitliliğini yönetmekte ve beklenmedik durumları yakalamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, YZ destekli testler; kullanıcı davranışlarını öngörme, değişen koşullara uyum sağlama ve yüksek ölçekli test süreçlerini optimize etme noktasında kritik bir rol üstlenmektedir.

Akıllı Kullanıcı Yolculuğu için Test Süreçleri: E-ticaret sitelerinde milyonlarca ürün ve sayısız olası kullanıcı etkileşim yolu bulunmaktadır. YZ, kullanıcıların geçmiş etkileşim verilerini analiz eden pekiştirmeli öğrenme modelleri aracılığıyla, en olası ve en kritik kullanıcı yolculuklarını (örneğin ürün arama, sepete ekleme, ödeme adımları) belirleyebilir. Bu yolculuklara yönelik otonom test senaryoları üreterek, manuel yöntemlerle tespit edilmesi güç olan ancak kullanıcı deneyimi açısından kritik öneme sahip akışlardaki hataları ortaya çıkarabilir (Zheng vd., 2021).

Kişiselleştirme ve Öneri Sistemleri için Test Süreçleri: E-ticaret platformlarının temel gelir kaynaklarından biri, kişiselleştirilmiş öneri motorlarıdır. Bu sistemlerin doğruluğunu test etmek oldukça zordur, çünkü her kullanıcının deneyimi farklılık göstermektedir. YZ, farklı demografik özelliklere, geçmiş alışveriş davranışlarına ve

ilgi alanlarına sahip binlerce sanal kullanıcı profili oluşturarak bu sistemleri test edebilir. Böylece öneri motorlarının, farklı kullanıcı segmentleri için tutarlı, doğru ve beklentilere uygun sonuçlar üretilip üretilmediği güvenilir biçimde doğrulanabilir (Zhao vd., 2019).

E-ticaret Uygulamaları Yük ve Performansı için Test Süreçleri: Kara Cuma gibi yoğun satış dönemlerinde, bir e-ticaret sitesinin yüksek trafik altında çökmeden çalışabilmesi hayati önem taşır. YZ, geçmiş trafik verilerini kullanarak, insan davranışlarını taklit eden gerçekçi yük test senaryoları oluşturabilir. Bu senaryolar, statik komut dosyalarının aksine, kullanıcıların ürünleri sepete ekleme, site içinde gezinme ve ödeme yapma gibi dinamik eylemlerini simüle ederek, sistemin en stresli koşullar altında nasıl tepki verdiğini doğru bir şekilde ölçer. Böylece, performans darboğazları önceden tespit edilip giderilebilir (Seelamneni, 2025).

YZ DESTEKLİ TESTLER İLE KLASİK TEST YAZILIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Yazılım test süreçleri, statik ve manuel olarak kodlanmış betiklere dayanan geleneksel yöntemlerden, YZ'nin dönüştürücü etkisiyle şekillenen akıllı sistemlere doğru önemli bir evrim geçirmektedir. Bu iki paradigma, test süreçlerini ele alış biçimleri, sağladıkları değerler ve karşılaştıkları zorluklar açısından köklü farklılıklar göstermektedir. Bu bölümde, YZ destekli testler ile klasik test yazılımlarının karşılaştırılması yapılacak; her iki yaklaşımın modern yazılım geliştirme ortamlarında sunduğu avantajlar ve sahip oldukları sınırlılıklar detaylı biçimde ele alınacaktır.

Test Senaryosu Oluşturma Açısından Klasik ve YZ Destekli Yaklaşımlar

Geleneksel test yazılımlarında senaryo oluşturma süreci, manuel tasarıma ve statik betiklerin kodlanmasına dayanır. Test mühendisleri, gereksinimleri ayrıntılı biçimde analiz ederek her bir adımı tek tek belirlemek ve bunları Java, Python veya C# gibi programlama dilleriyle kodlamak zorundadır. Özellikle karmaşık kullanıcı arayüzleri, çoklu veri girişleri ve uç durum senaryolarında bu süreç son derece zaman alıcıdır ve insan kapasitesinin sınırlarıyla kısıtlanır. Ayrıca, test senaryolarının yazımı ve güncel tutulması için yüksek bir emek harcaması gerektiğinden, geliştirme döngüsünün yavaşlamasına neden olur. Buna karşın, YZ destekli testler senaryo oluşturma sürecine otonom ve akıllı bir boyut kazandırır. YZ algoritmaları; geçmiş kullanıcı verileri, loglar, gereksinim dokümanları ve uygulamanın kendisinden öğrenerek dinamik biçimde test senaryoları üretebilir (Baqar & Khanda, 2025). Örneğin, pekiştirmeli öğrenme algoritmaları, uygulamanın tüm olası durum geçişlerini keşfederek manuel yöntemlerle tasarlanması imkânsız olan kullanıcı yolculuklarını test edebilirken; doğal dil işleme (NLP) teknikleri, gereksinim metinlerinden otomatik olarak senaryolar çıkarabilir (Takerngsaksiri vd., 2025).

Böylece test kapsamı önemli ölçüde genişler, insan hataları en aza iner ve manuel test tasarımına ayrılan süre radikal biçimde azalır.

Test Yürütme, Bakım ve Optimizasyon Açısından Klasik ve YZ Destekli Yaklaşımlar

Klasik test otomasyonu, büyük ölçüde kırılgan betiklere dayanır. Uygulama arayüzünde yapılan küçük değişiklikler, örneğin bir butonun kimliğinin (ID) veya konumunun değiştirilmesi bile testlerin başarısız olmasına yol açar ve manuel müdahaleyle onarılmasını gerektirir. Bu durum, özellikle Çevik (Agile) ve Sürekli Entegrasyon/Sürekli Dağıtım (CI/CD) ortamlarında bakım maliyetlerini hızla artırır. Ayrıca, klasik yaklaşımda test yürütme süreci genellikle sabit bir sıra izler; değişikliklerin risk seviyesine göre bir optimizasyon yapılmadığından, zaman kısıtlı senaryolarda en kritik bileşenler önceliklendirilemez. Buna karşılık, YZ destekli testler bu zorluklara akıllı çözümler sunar. YZ tabanlı test motorları, kod değişikliklerinin riskini analiz ederek test senaryolarını dinamik biçimde önceliklendirir; böylece en kritik testler kısa sürede çalıştırılır ve CI/CD hattında zamanın en verimli şekilde kullanılması sağlanır (Spieker vd., 2017). Dahası, YZ destekli testler “kendi kendini onarma” (self-healing) yeteneğiyle klasik yaklaşımdan ayrılır. Bilgisayarlı görü ve diğer öğrenme algoritmaları sayesinde, UI elementleri yeniden adlandırılrsa veya konumları değişse bile, testler ilgili öğeyi tanıyıp yürütmeye devam edebilir (Saarathy vd., 2024). Bu özellik, test senaryosu bakım maliyetlerini dramatik biçimde azaltırken, otomasyonun sürdürülebilirliğini ve uzun vadeli değerini de artırır.

Hata Tespiti Açısından Klasik ve YZ Destekli Yaklaşımlar

Klasik test yazılımları, genellikle testlerin sonucunu yalnızca “başarılı” veya “başarısız” olarak raporlar. Başarısız bir testin altında yatan nedeni anlamak için geliştiricilerin test loglarını, yığın izlerini (stack trace) ve hata mesajlarını manuel olarak incelemesi gerekir. Özellikle karmaşık hatalarda bu süreç, kök nedeni bulmak için saatler hatta günler sürebilir ve geliştirme sürecinde ciddi bir darboğaz oluşturur. Klasik yaklaşımda öngörü mekanizmaları da bulunmadığından, hatalar yalnızca ortaya çıktıktan sonra ele alınabilir. YZ destekli testler ise bu süreci çok daha ileri bir seviyeye taşır. ML algoritmaları, binlerce test çalışmasından üretilen log dosyalarını, hata mesajlarını ve kod değişiklik geçmişini analiz ederek anormallikleri tespit edebilir, olası kök nedenleri tahmin edebilir (Wittkopp vd., 2024). Böylece geliştiriciler, hata ayıklama sürecinde saatler harcamak yerine doğrudan sorunun kaynağına odaklanabilir. Ayrıca YZ, geçmiş hata verilerinden öğrenerek gelecekte hangi modüllerde hata çıkma olasılığının daha yüksek olduğunu öngörebilir. Bu

öngörü yeteneği, test kaynaklarının daha stratejik kullanılmasına imkân tanır ve yazılım kalitesinin proaktif biçimde artırılmasını sağlar.

Maliyet, Entegrasyon ve Ölçeklenebilirlik Açısından Klasik ve YZ Destekli Yaklaşımlar

Klasik test otomasyonu, başlangıçta test betiklerinin yazılması ve gerekli altyapının kurulmasıyla belirli bir maliyet gerektirir. Ancak asıl yük, testlerin sürekli değişen uygulamalara uyum sağlaması için güncellenmesi ve bakımının yapılması sırasında ortaya çıkar. Test süiti büyüdükçe bu bakım maliyeti hızla artar, önemli miktarda insan kaynağı tüketir ve CI/CD süreçlerinde ciddi bir darboğaz oluşturur. Ayrıca klasik yaklaşımların çevik geliştirme döngülerine entegrasyonu zordur; testler geliştirme hızına ayak uydurmakta zorlandığı için süreç yavaşlar. Ölçeklenebilirlik açısından bakıldığında ise, test kapsamı arttıkça verimlilik azalır ve yönetim karmaşık hale gelir. YZ destekli testler ise başlangıçta YZ altyapısı ve araçlarına yönelik yatırım gerektirir. Bununla birlikte, uzun vadede kendi kendini onaran (self-healing) betikler ve akıllı test optimizasyonu sayesinde bakım maliyetleri önemli ölçüde azalır. YZ destekli sistemler, test kümesi büyüdükçe bile performans ve verimliliklerini koruyabilir, hatta artırabilir (Saarathy vd., 2024). Entegrasyon açısından bakıldığında, bu sistemler CI/CD süreçlerine dinamik şekilde uyum sağlayarak hızlı geliştirme döngülerine doğal olarak entegre olur. Ayrıca ölçeklenebilirlik bakımından, farklı modüllerin ve artan test yükünün üstesinden gelerek geniş çaplı projelerde dahi sürdürülebilir bir test altyapısı sunar.

YZ DESTEKLİ TESTLERİN ZORLUKLARI VE GELECEĞİ

YZ destekli testler, yazılım kalite güvencesi süreçlerini dönüştürme potansiyeline sahip olmakla birlikte, bu dönüşüm süreci hem önemli zorluklar hem de umut verici fırsatlar barındırmaktadır. Bu bölümde, YZ'nin test alanında yaygınlaşmasının önünde duran teknik, organizasyonel ve etik engeller ele alınacak; aynı zamanda bu teknolojinin gelecekteki olası yönelimleri ve yazılım mühendisliği disiplinine sağlayabileceği katkılar ayrıntılı biçimde tartışılacaktır.

YZ Destekli Testlerin Zorlukları

YZ'nin yazılım test süreçlerine entegrasyonu, önemli kazanımlar vadetmesine rağmen çeşitli teknik, organizasyonel ve etik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların başında veri bağımlılığı ve kalitesi gelmektedir. YZ modellerinin başarısı, beslendikleri verinin miktarı ve niteliğine doğrudan bağlıdır. Kapsamlı test geçmişleri, log dosyaları, hata raporları ve kod değişiklikleri gibi büyük hacimli ve temiz verilerin sağlanması kritik bir gerekliliktir (Gupta vd., 2021). Ancak bu verilerin toplanması, temizlenmesi ve sürekli güncel tutulması büyük bir operasyonel çaba gerektirir. Aksi

durumda, hatalı veya eksik veri kullanımı, güvenilir olmayan test senaryolarının üretilmesine ve modelin hatalı tahminler yapmasına yol açabilir.

Bir diğer önemli zorluk ise yüksek başlangıç maliyeti ve uzmanlık ihtiyacıdır. YZ destekli test çözümleri, geleneksel otomasyon araçlarına kıyasla daha yüksek bir ilk yatırım gerektirir. Bu maliyet yalnızca yazılım ve donanım altyapısıyla sınırlı değildir; aynı zamanda ML mühendisleri, veri bilimcileri ve test süreçlerine YZ algoritmalarını entegre edebilecek uzman personelin istihdamını da kapsar. Dolayısıyla, sınırlı bütçeye sahip küçük ve orta ölçekli işletmeler açısından bu durum ciddi bir engel teşkil edebilir.

YZ destekli testlerin yaygınlaşmasının önündeki bir diğer engel kara-kutu (black-box) test sorunudur. Özellikle derin öğrenme tabanlı modeller, karar alma mekanizmalarını şeffaf bir biçimde açıklayamaz. Bir test senaryosunun neden üretildiğini ya da belirli bir hatanın neden kritik olarak işaretlendiğini anlamak çoğu zaman mümkün değildir. Bu açıklanabilirlik eksikliği, test mühendislerinin ve geliştiricilerin YZ sistemlerine duyduğu güveni azaltmakta ve hata kökeni analizini zorlaştırmaktadır (Chigurupati & Lassar, 2017).

Son olarak, etik ve yasal sorunlar da göz ardı edilemez. YZ'nin test süreçlerinde kullanımı sırasında, özellikle kişisel verilerin işlendiği durumlarda, GDPR gibi veri koruma yönetmelikleri önemli kısıtlamalar getirmektedir. Sentetik veri üretimi bu soruna kısmi çözümler sunabilse de gerçek dünya verisinin karmaşıklığını ve çeşitliliğini tam olarak yansıtmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Tüm bu zorluklar, YZ destekli testlerin yazılım geliştirme yaşam döngüsünde yaygınlaşmasını yavaşlatan kritik faktörlerdir. Ancak bu engellerin doğru stratejilerle yönetilmesi, YZ tabanlı testlerin potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılabilmesi için kaçınılmazdır.

YZ Destekli Testlere İlişkin Gelecek Yönelimleri

Zorluklara rağmen, YZ'nin yazılım test alanındaki geleceği oldukça parlak ve dönüştürücü niteliktedir. Teknolojinin gelişimi ve mevcut engellere yönelik yenilikçi çözümlerin ortaya çıkmasıyla birlikte, test süreçlerinin daha akıllı, proaktif ve otonom hale gelmesi beklenmektedir. Üretken YZ ve Otonom Test Ajanları geleceğin en dikkat çekici yönelimlerinden biridir. Büyük Dil Modelleri (Large Language Models – LLMs), doğal dilde yazılmış gereksinim dokümanlarından doğrudan test senaryoları üretebilecek ve bu senaryoları otomatik olarak kodlayabilecektir. Uzun vadede ise, yazılımı baştan sona insan müdahalesi olmadan test edebilecek tam otonom test ajanlarının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu ajanlar, uygulamanın amacını anlayarak senaryoları kendileri tasarlayacak, yürütecek ve sonuçlarını analiz edebilecektir (Feldt vd., 2023).

Bununla birlikte, YZ'nin test süreçlerindeki rolü giderek reaktif hata bulmadan proaktif hata önlemeye doğru kaymaktadır. Gelecekte, ML modelleri bir geliştiricinin kod gönderme işlemlerini analiz ederek, daha kod birleştirilmeden önce olası hata

risklerini öngörebilecek ve geliştiricileri erken aşamada uyarabilecektir. Bu yaklaşım, yazılım kalitesini baştan güvence altına alarak hataların ortaya çıkmasını önleyecektir (Bryan & Moriano, 2023). Ayrıca, geleceğin yalnızca tamamen otomatik sistemlere dayanmayacağı, hibrit yaklaşımların da önem kazanacağı öngörülmektedir. YZ, tekrarlayan ve zaman alıcı görevleri üstlenirken; insan test mühendisleri yaratıcılık, stratejik düşünme ve keşifsel test senaryolarına odaklanacaktır. Böylece, insan zekâsı ile yapay zekânın güçlü yönlerini bir araya getiren hibrit test ekipleri, yazılım test süreçlerinde daha dengeli ve verimli bir yapı oluşturacaktır. Sonuç olarak, YZ destekli testlerin geleceği, yalnızca mevcut süreçleri hızlandırmakla kalmayacak, aynı zamanda yazılım kalitesini proaktif olarak güvence altına alacak, insan-YZ işbirliğini güçlendirecek ve test süreçlerini baştan sona dönüştürecek.

SONUÇ

YZ destekli testler, yazılım kalite güvencesi süreçlerinin geleceğini şekillendiren köklü bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Bu çalışmada ele alındığı üzere, YZ artık yalnızca bir otomasyon aracı değil, aynı zamanda test süreçlerini daha akıllı, verimli ve kapsayıcı hale getiren stratejik bir ortak konumundadır. Geleneksel test yazılımları, insan gücüne bağımlı ve statik senaryolarla sınırlı kalırken; YZ destekli sistemler, otonom senaryo oluşturma, kendi kendini onaran betikler ve akıllı hata analizi gibi yeteneklerle bu sınırlamaları aşmaktadır. Finans, sağlık ve otomotiv gibi kritik sektörlerdeki vaka analizleri, YZ'nin karmaşık ve dinamik sistemlerdeki değerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Otomasyon maliyetlerini düşürme, test kapsamını genişletme ve hataların kök nedenini hızla belirleme gibi yetkinlikler, YZ'yi modern yazılım geliştirme döngülerinin ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir. Bununla birlikte, bu dönüşüm veri bağımlılığı, yüksek başlangıç maliyetleri ve kara kutu sorunu gibi önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Gelecekte, bu zorlukların üretken YZ, hibrit test yaklaşımları ve proaktif hata önleme gibi çözümlerle aşılması öngörülmektedir. YZ, insan test uzmanlarının yerini almak yerine, onların yaratıcılığını ve stratejik düşünme becerilerini daha karmaşık ve keşifsel test senaryolarına yönlendirecek tamamlayıcı bir araç olarak konumlanacaktır. Sonuç olarak, YZ destekli testler; daha hızlı, güvenilir ve ölçeklenebilir yazılım geliştirme süreçleri için bir seçenek değil, giderek bir zorunluluk haline gelmektedir. Bu teknolojinin doğru anlaşılması ve stratejik biçimde uygulanması, organizasyonların yalnızca rekabet avantajı elde etmesini değil, aynı zamanda dijital çağın yüksek kalite ve hız beklentilerini karşılamasını da mümkün kılacaktır.

KAYNAKLAR

- Abu Bakar, N. S. A. (2025). Machine Learning Implementation in Automated Software Testing: A Review. *Journal of Data Analytics and Artificial Intelligence Applications*, 1(1), 110-122.
- Ahmad, A., Leifler, O., Sandal, K. (2020). An Evaluation of Machine Learning Methods for Predicting Flaky Tests. *Proceedings of the 8th International Workshop on Quantitative Approaches to Software Quality (QuASoQ 2020)*, 2767, 37–46.
- Baqar, M., & Khanda, R. (2025). The Future of Software Testing: AI-Powered Test Case Generation and Validation. In *Intelligent Computing-Proceedings of the Computing Conference* (pp. 276-300). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Brunetto, M., Denaro, G., Mariani, L., & Pezzè, M. (2021). On introducing automatic test case generation in practice: A success story and lessons learned. *Journal of Systems and Software*, 176, 110933.
- Bryan, J., & Moriano, P. (2023). Graph-based machine learning improves just-in-time defect prediction. *Plos one*, 18(4), e0284077.
- Chigurupati, A., & Lassar, N. (2017). Root cause analysis using artificial intelligence. In *2017 Annual reliability and maintainability symposium (RAMS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Cho, H. J., & Behl, M. (2020). Towards automated safety coverage and testing for autonomous vehicles with reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:2005.13976*.
- Efimov, D., Xu, D., Kong, L., Nefedov, A., Anandkrishnan, A. (2019). Using Generative Adversarial Networks to Synthesize Artificial Financial Datasets, *33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019)*, Vancouver, Canada.
- Feldt, R., Kang, S., Yoon, J., & Yoo, S. (2023). Towards autonomous testing agents via conversational large language models. In *2023 38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)* (pp. 1688-1693). IEEE.
- Frid-Adar, M., Diamant, I., Klang, E., Amitai, M., Goldberger, J., & Greenspan, H. (2018). GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification. *Neurocomputing*, 321, 321–331.
- Fu, S., Xu, A., Liu, X., Zhou, H., & Akkiraju, R. (2018). Challenge AI mind: A crowd system for proactive AI testing. *arXiv preprint arXiv:1810.09030*.
- Guo, X., Okamura, H., & Dohi, T. (2022). Automated software test data generation with generative adversarial networks. *IEEE Access*, 10, 20690-20700.
- Gupta, N., Mujumdar, S., Patel, H., Masuda, S., Panwar, N., Bandyopadhyay, S., Mehta, S., Guttula, S., Afzal, S., Mittal, R. S., Munigala, V. (2021). Data

- quality for machine learning tasks. *In Proceedings of the 27th ACM SIGKDD conference on knowledge discovery & data mining* (pp. 4040-4041).
- Hirsch, T., & Hofer, B. (2020). Root cause prediction based on bug reports. *2020 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, 171-176.
- Hossain, M.S., Muhammad, G., & Guizani, N. (2020). Explainable AI and Mass Surveillance System-Based Healthcare Framework to Combat COVID-19 Like Pandemics. *IEEE Network*, 34, 126-132.
- Humble, J., & Farley, D. (2010). Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation. *Addison-Wesley*.
- Islam, M., Khan, F., Alam, S., Hasan, M. (2023). Artificial Intelligence in Software Testing: A Systematic Review, *2023 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Chiang Mai, Thailand, pp. 524-529.
- John, A., John, I., & Dion, T. (2025). Integrating AI-Driven Test Case Optimization into Continuous Integration/Continuous Delivery (CI/CD) Pipeline Authors. Continuous Delivery (CI/CD) Pipeline Authors (May 13, 2025).
- Khankhoje, R. (2023). An Intelligent Approach to Code-Driven Test Execution. *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*, 109-117.
- Koren, M., Alsaif, S., Lee, R., & Kochenderfer, M. J. (2018). Adaptive stress testing for autonomous vehicles. *In 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 1-7). IEEE.
- Latiu, G. I., Cret, O. A., & Vacariu, L. (2012). Automatic test data generation for software path testing using evolutionary algorithms. *In 2012 Third International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies* (pp. 1-8). IEEE.
- Machalica, M., Samylkin, A., Porth, M., Chandra, S. (2019). Predictive test selection. *In Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP '19)*. IEEE Press, 91–100.
- Mohapatra, P. S. (2025). Artificial Intelligence-Driven Test Case Generation in Software Development. *Intelligent Assurance: Artificial Intelligence-Powered Software Testing in the Modern Development Lifecycle*, 4, 38.
- Mohd-Shafie, M. L., Kadir, W. M. N. W., Lichter, H., Khatibsyarbini, M., & Isa, M. A. (2022). Model-based test case generation and prioritization: a systematic literature review. *Software and Systems Modeling*, 21(2), 717-753.
- Mustafa, A., Wan-Kadir, W. M., Ibrahim, N., Shah, M. A., Younas, M., Khan, A., Zareei, M., & Alanazi, F. (2021). Automated test case generation from requirements: A systematic literature review. *Computers, Materials and Continua*, 67(2), 1819-1833.

- Necula, S.-C., Dumitriu, F., Greavu-Șerban, V. (2024). A Systematic Literature Review on Using Natural Language Processing in Software Requirements Engineering. *Electronics*, 13, 2055.
- Pandhare, H. V. (2025). Future of Software Test Automation Using AI/ML. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 14(05): 27159-27182.
- Ricca, F., Marchetto, A., & Stocco, A. (2023). A retrospective analysis of grey literature for AI-supported test automation. In *International Conference on the Quality of Information and Communications Technology* (pp. 90-105). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Saarathy, S., Bathrachalam, S., & Rajendran, B. (2024). Self-Healing Test Automation Framework using AI and ML. *International Journal of Strategic Management*, 3(3), 45–77.
- Seelamneni, A. (2025). The role of automated testing in scaling global E-commerce operations: A technical deep dive. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 26(1), 1257-1263.
- Spieker, H., Gotlieb, A., Marijan, D., & Mossige, M. (2017, July). Reinforcement learning for automatic test case prioritization and selection in continuous integration. In *Proceedings of the 26th ACM SIGSOFT international symposium on software testing and analysis* (pp. 12-22).
- Tahir, A., Rasheed, S., Dietrich, J., Hashemi, N., Zhang, L. (2023). Test flakiness' causes, detection, impact and responses: A multivocal review. *Journal of Systems and Software*, 206: 111837.
- Takerngsaksiri, W., Charakorn, R., Tantithamthavorn, C., & Li, Y. F. (2025). Pytester: Deep reinforcement learning for text-to-testcase generation. *Journal of Systems and Software*, 224, 112381.
- Wittkopp, T., Wiesner, P., & Kao, O. (2024). LogRCA: Log-based Root Cause Analysis for Distributed Services. In *European Conference on Parallel Processing* (pp. 362-376). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Yang, S. (2025). The Impact of Continuous Integration and Continuous Delivery on Software Development Efficiency. *Journal of Computer, Signal, and System Research*, 2(3), 59-68.
- Zhang, J. M., Harman, M., Ma, L. Liu, Y. (202). Machine Learning Testing: Survey, Landscapes and Horizons, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(1): 1-36.
- Zhang, Y. (2024). Application and Practice of Intelligent Algorithms in Computer Software Design and Testing. *Procedia Computer Science*, 243, 708-715.

- Zhao, X., Xia, L., Ding, Z., Yin, D., & Tang, J. (2019). Toward Simulating Environments in Reinforcement Learning Based Recommendations. *arXiv preprint arXiv:1906.11462*.
- Zheng, Y., Liu, Y., Xie, X., Liu, Y., Ma, L., Hao, J., & Liu, Y. (2021). Automatic web testing using curiosity-driven reinforcement learning. *In 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 423-435). IEEE.

7. Bölüm

Yapay Zekâ Uygulamalarında MATLAB Kullanımı

Yıldız ATEŞ¹, Güneş AÇIKGÖZ²

Yapay Zekâ Uygulamalarında MATLAB Kullanımı

Giriş

Yapay zeka, makinenin algılama, öğrenme ve muhakeme gibi insan zekâsı süreçlerinin davranışının bilgisayar sistemleri tarafından simüle edilmesidir. Ayrıca, yapay zeka, akıl yürütebilen, öğrenebilen, bilgi toplayabilen, iletişim kurabilen, nesneleri işleyebilen ve algılayabilen akıllı makinelerin ve yazılımların incelenmesi ve geliştirilmesidir (Pannu, 2015; Mughal vd., 2022).

Yapay zeka bilgi teknolojisinin önemli bir yere sahip olduğu günümüzde bilgi teknolojisinde devrim yarattı ve karmaşık sorunların çözümünde başarıyla uygulanabildiğinden dolayı farklı bilim dallarında araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Özellikle de optimizasyon sorunlarının düzenli olarak ortaya çıktığı mühendislik ve veri bilimleri alanlarında yapay zeka algoritmalarının kullanılması sorunların çözümünde başarı sağlamıştır.

Küçük veri kümeleri ve düşük boyutlu problemlerde bilimsel hesaplamalar ve araştırma alanındaki ilerlemeler optimizasyon için bir sorun değildir. Fakat verilerin büyük ve doğası gereği stokastik ve/veya çok boyutlu olması durumunda optimizasyon sorun olarak ortaya çıkar. Temel optimizasyon araçları, karmaşıklık nedeniyle bu tür sorunlar için başarısız olur ve doğal seçim hipotezine dayanan genetik algoritmalar, bu tür karmaşık sorunlarla başa çıkmak için zorunlu bir rol oynar (Sohail, 2023).

Yapay zekâ alanı, toplanan büyük miktardaki veriyi etkili bir şekilde analiz etme ve üzerinde işlem yapma yeteneği nedeniyle çok fazla ilgi görmektedir. İlgideki hızlı artış, esas olarak makine öğrenimi alt alanında yapılan ilerlemelere ve veri depolama ve hesaplama gücü gibi destekleyici faktörlere atfedilmektedir.

Derin öğrenme ve makine öğrenmesi gibi yapay zeka teknikleri (Şekil 1), geleneksel yöntemleri kullanarak elde edilmesi zor olan büyük verileri incelemek ve işlemek için alışılmadık analitik araçlar sunmaktadır (Zhang vd., 2021).

¹ Öğr. Gör. Dr., Hakkari Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-1131-2427

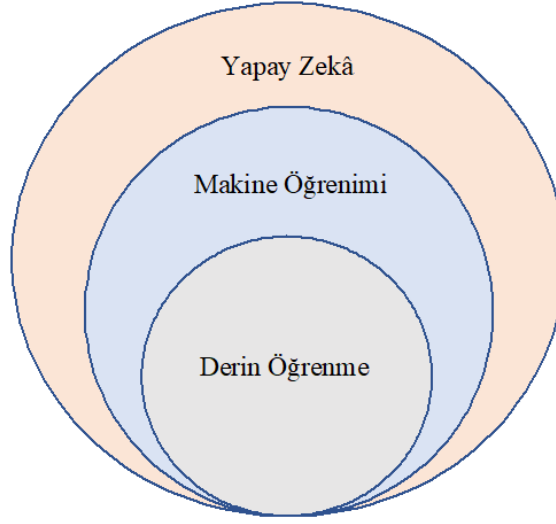
² Dr. Öğr. Üyesi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-9118-3153

Yapay zekâ, akıllı bir bilgisayar programıdır; makine öğrenimi ise makinenin veri alıp (toplayıp) bu veriler doğrultusunda öğrenmesi anlamına gelir. Ayrıca yapay zeka, karmaşık problemleri çözmek için doğal zekayı simüle etmeyi amaçlar. Makine öğreniminin amacı, belirli bir görev için toplanan verilerden öğrenerek makinenin performansını en üst düzeye çıkarmaktır. Dolayısıyla makine öğrenimi, toplanan verilerden yeni şeyler öğrenme sistemidir. Yapay zeka, en uygun çözümü belirlemek ve elde etmek için çalışır. Makine öğrenimi ise yalnızca tek bir cevabı, yani optimal olup olmadığını dikkate alır (Mijwil vd., 2022).

Makine öğrenimi çalışmaları, bilgisayarların insan öğrenme yeteneğini simüle etmesini veya gerçekleştirmesini ve yeni bilgi ve beceriler edinmesini sağlamayı amaçlar. Derin öğrenme, yapay sinir ağlarının incelenmesinden türemiştir. Makine öğreniminin yeni bir alt alanı olan derin öğrenme, görüntü, ses ve metin gibi verileri yorumlarken insan beyninin mekanizmalarını taklit etmeye odaklanır.

Verilerin gittikçe artmasıyla birlikte, derin öğrenme, yapay zeka alanında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Derin öğrenme algoritmaları, geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla güçlü özellik öğrenme ve ifade yetenekleri ile karakterize edilir ve bu da farklı alanlardan dünya çapındaki araştırmacıları giderek yaygınlaşan uygulamalarına çekmektedir (Zhang vd., 2021).

Derin öğrenme uygulamalarının yaygın kategorileri arasında şunlar yer almaktadır: Görüntü Tanıma, Doğal Dil İşleme, Konuşma Tanıma, Makine Çevirisi, Tıbbi Tanı, Finansal Tahmin, Dolandırıcılık Tespiti, Robotik (Vinothkumar ve Karunamurthy, 2023). Derin öğrenme yöntemleri, bir makinenin büyük miktarda ham veriyle beslenmesini ve tespit/sınıflandırma için gerekli gösterimleri keşfetmesini sağlar. Derin öğrenme yöntemleri, girdinin ayrımcılık için önemli olan yönlerini güçlendiren ve alakasız varyasyonları bastıran ardışık dönüşümlerle verilerin birden fazla katmandan oluşan gösterimine dayanır. Derin öğrenme, denetlenen veya denetlenmeyen olabilir (Panch vd., 2018).



Şekil 1. Yapay zekâ, makine öğrenimi, derin öğrenme/yapay sinir ağları arasındaki ilişki

Yapay Zekanın Faydaları

Yapay zekanın çok fazla yararı bulunmaktadır. Yapay zekanın faydaları inanılmazdır; bu alanın bize sunabileceği şey, kesin bir şekilde evrimleşerek yapay robotların tarihine geçmektir. Yapay zekanın başlıca avantajları şunlardır:

- ☐ Bir insandan daha hızlı görev tamamlama,
- ☐ Stresli ve karmaşık işler kolayca tamamlanma,
- ☐ Zor işler kısa sürede halledilme,
- ☐ Çeşitli işlevler aynı anda yapılabilme,
- ☐ Başarı oranı yüksek,
- ☐ Görevde daha az hata ve kusur,
- ☐ Kısa sürede daha fazla verimlilik,
- ☐ Daha az alan ve daha küçük boyut,
- ☐ Uzun vadeli ve karmaşık durumların hesaplanması,
- ☐ Uzay gibi keşfedilmemiş şeyleri keşfetme (Khanzode ve Sarode, 2020).

Yapay zeka, zamandan tasarruf etmek ve iş verimliliğini artırmak için faydalıdır. Yapay zekâ, daha önce insanlar tarafından gerçekleştirilen rutin görevleri otomatikleştirir, dolayısıyla insan kaynağı işe alma maliyeti azalır. Dahası, yapay zekanın yardımıyla insanlardan çok daha hızlı ve daha akıllı olacak makineler geliştirilebilir.

Yapay zekada kararlar, bir dizi algoritma kullanılarak önceden toplanmış bilgilerden alınır. Sonuç olarak, hatalar en aza indirilir ve daha yüksek bir doğruluk derecesiyle doğruluğa ulaşma olasılığı hızla artar.

İnsanlardan yapay zekaya risk transferi yapay zekanın en büyük avantajlarından biridir. Yapay zekanın geliştirilmesiyle birçok yüksek riskli meslek aşılabılır, bu da insanların ölüm veya yaralanma riskini en aza indirir. Örneğin, yapay zekaya sahip bir robot Mars'a gidebilir, bir bombayı etkisiz hale getirebilir, okyanusların en derin kısımlarını keşfedebilir, kömür ve petrol çıkarabilir ve herhangi bir doğal afette etkili bir şekilde kullanılabilir.

Yapay zekanın yardımıyla günlük görevler üretken bir şekilde otomatikleştirilebilir, hatta insanlar için "sıkıcı" olan görevler bile kaldırılabilir ve serbest bırakılabilir, böylece insanlar daha yaratıcı hale gelebilir.

Yapay zekayı diğer teknolojilerle birlikte kullanarak makineler insanlardan daha hızlı kararlar alabilir ve eylemleri gerçekleştirebilir. Bir karar verirken, kişi birçok faktörü (hem duygusal hem de olgusal olarak) analiz edecektir, ancak yapay zekâ ile çalışan bir makine programlandığı şekilde çalışır ve sonuçları daha hızlı sunar (Jenis vd., 2023).

Yapay Zeka Teknolojileri

Yapay zeka teknolojileri Bilgisayarlı Görme, Konuşma İşleme ve Doğal Dil İşleme olmak üzere üç çeşit uygulama teknolojisini içerir.

Bilgisayarlı görme, bilgisayarların nesneleri nasıl "göreceğini" araştıran bir bilim dalıdır ve üç tür yapay zekâ uygulama teknolojisi arasında en köklü teknolojidir. Bilgisayarlı görmenin temel olarak ele aldığı konular arasında görüntü sınıflandırma, nesne algılama, görüntü segmentasyonu, görsel izleme, metin tanıma ve yüz tanıma bulunur.

Konuşma işleme, konuşma sinyallerinin ve ses üretiminin istatistiksel özelliklerinin incelenmesidir. Konuşma tanıma, konuşma sentezi ve konuşma uyandırma gibi işleme teknolojileri topluca "konuşma işleme" olarak ele alınabilir. Konuşma işleme araştırmalarının alt alanları arasında ağırlıklı olarak konuşma tanıma, konuşma sentezi, ses uyandırma, ses izi tanıma ve ses olayı algılama yer alır. En gelişmiş alt alan ise, sessiz bir iç mekân ortamında ve yakın alan tanıma koşullarında %96 doğruluk oranına ulaşabilen konuşma tanımadır (Yunxiang vd., 2023).

Doğal dil işleme, doğal dili bilgisayar teknolojileri aracılığıyla yorumlamayı ve kullanmayı amaçlayan bir teknolojidir ve bilgisayarlar ve insan dilleri arasındaki etkileşimi inceler.

Doğal dil işleme teknikleri, metinden bilgi çıkarır, dil çevirisini mümkün kılar ve metinsel içerik üretir. Bilgi çıkarma, adlar, tarihler ve konumlar gibi öğeleri kapsayan, yapılandırılmamış metinden yapılandırılmış verilerin çıkarılmasını içerir (Vinothkumar ve Karunamurthy, 2023).

Yapay Zeka Uygulamaları

Yapay zekâ deneyimlerden öğrenme, yeni girdilere uyum sağlama ve zaman içinde performansını sürekli iyileştirme kapasitesine sahiptir. Yapay zekanın insanlara birçok farklı alanda fayda sağlayabilecek sayısız uygulaması vardır. Sorularımıza yanıt veren sanal asistanlardan karmaşık ortamlarda yol alan sürücüsüz arabalara kadar, yapay zekâ, bir zamanlar bilim kurgu dünyasına ait sayılan yeni bir yetenek dalgasının habercisidir. Yapay zeka uygulamalarının bazı örnekleri şunlardır:

1. Sağlık hizmetleri

Yapay zeka, manuel sağlık sistemini insanların tıbbi uygulamalardaki rutin görevleri yürütmesine ve hastaların ve tıbbi kaynakların yönetimine olanak tanıyan otomatize bir sisteme dönüştürdüğünden dolayı sağlık sisteminde kullanımı gittikçe artmaktadır. Sağlık hizmetlerinin dijitalleştirilmesinin teknik zorlukları, geliştiricilerin görevleri yerine getirmek için yapay zekâ sistemleri geliştirmesi durumunda yeni sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Sunarti, 2021).

Yapay zeka sağlık maliyetlerini azaltma, kaynak tahsisini optimize etme ve hasta sonuçlarını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Yapay zeka, hasta sağlık sonuçlarını iyileştirmek ve daha düşük maliyetle sağlık hizmeti sunmak için tıbbi görüntüleme ve teşhis, sanal hasta bakımı, tıbbi araştırma ve ilaç keşfi, hasta katılımı ve uyumluluğu, rehabilitasyon ve diğer idari uygulamalar gibi sağlık hizmetlerinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Al Kuwaiti, 2023). Son zamanlarda, yapay zeka bilimi, kanser gibi hastalıkların tespitinde sağlık sisteminin daha etkili hale getirilmesine de katkıda bulunmuştur.

2. Eğitim

Yapay zeka destekli eğitimin, öğrenme gereksinimleri arttıkça daha önemli bir rol oynamaktadır. Akıllı eğitim sistemleri hem öğretmenler hem de öğrenciler için zamanında ve kişiselleştirilmiş eğitim ve geri bildirim sağlar.

Yapay zeka algoritmaları, kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimleri sunmak için öğrenci verilerini analiz edebilir ve ödevleri notlandırmak ve akıllı ders sistemleri oluşturmak için kullanılabilir. Yapay zeka ayrıca, öğrencilerin kontrollü bir ortamda uygulamalı deneyim kazanmalarını sağlayan sanal gerçeklik ve simülasyon deneyimleri oluşturmak için de kullanılabilir (Dave ve Patel, 2023). Özellikle istatistik modeli ve bilişsel öğrenme teorisiyle yakından ilişkili olan makine öğrenimiyle ilgili teknolojiler olmak üzere, birden fazla bilgi işlem teknolojisiyle öğrenme değerini ve verimliliğini artırmak üzere tasarlanmıştır.

Eğitim geliştikçe, araştırmacılar karmaşık sorunlarla başa çıkmak ve bireysel öğrencilere özel öğretim yöntemleri geliştirmek için derin öğrenme ve veri

madenciliği gibi gelişmiş yapay zeka tekniklerini uygulamaya çalışmaktadır (Chen, 2020).

Bilgisayar ve bilgi işleme tekniklerinin gelişmesiyle birlikte yapay zeka, akıllı ders sistemleri, öğretim robotları, öğrenme analitiği panoları, uyarlanabilir öğrenme sistemleri, insan-bilgisayar etkileşimleri vb. gibi eğitim uygulamalarında yaygın olarak uygulanmıştır (Ouyang ve Jiao, 2021).

3. Mühendislik

Çoğu mühendislik uygulamasındaki çok sayıda karmaşık problem nedeniyle, mühendisler büyük karmaşık hesaplamaları takip etmek yerine hesaplamalı zekanın yanı sıra yumuşak bilgi işlem analizine de güvenirler. Mühendislik problemlerinde, mühendislik problemlerini çözmek için çok daha karmaşık istatistiksel analiz ve matematiksel modelleme kullanılır.

Mühendislik ve malzemelerde "Büyük Veri" genellikle verinin kendisini ve veri depolarını ifade eder. Ancak daha can sıkıcı sorunlar, sayısız veri kaynağı ve malzeme verilerinin genellikle seyrek yapısıyla bağlantılıdır. Mevcut malzeme, süreç ve yapı mühendisliği uygulamalarında, veri ediniminin ölçeği ve hızı, verilerin doğruluğu ve hatta değişkenliği, uygulayıcılar için ek zorluklardır. Bunlar, malzeme, süreç ve yapı mühendisliği verilerinin geliştiriciler ve tasarımcılar için kararları destekleyecek pratik bir şekilde nasıl analiz edilip kullanılacağı sorusunu gündeme getirir. Yapay zeka teknolojileri, burada da uzun süredir devam eden veri yapısı sorununa yeni çözümler geliştirmek için muhtemelen dönüştürücü niteliktedir (Dimiduk vd., 2018).

Yapay sinir ağları, sinir sisteminin ve insan beyninin davranışlarını simüle etmeyi amaçlamaktadır. Sinir ağı modelleri, hayvan beyinlerini oluşturmaya çalışan biyolojik sinir ağından esinlenen matematiksel hesaplama sistemleridir. Yapay sinir ağları son zamanlarda jeoteknik mühendisliği alanında birçok araştırmacı tarafından genişletilmiş, sunulmuş ve uygulanmıştır. Literatürde, yapay sinir ağlarının istinat duvarlarının sapmasını, kazıyı, zemin davranışını, toprak istinat yapılarını, saha karakterizasyonunu, kazık taşıma kapasitesini (hem yüzey sürtünmesi hem de uç taşıma) tahminini, yapıların oturmasını, sıvılaşma değerlendirmesini, şev stabilitesini, heyelan duyarlılığı haritalamasını ve zeminlerin sınıflandırılmasını modellemede iyi bir şekilde yerleşmiş olduğunu ortaya koymaktadır (Lee vd., 2003; Moayedi vd., 2020).

Mühendislerin sağlık, sigorta, enerji, petrol ve gaz, eğitim, havacılık ve uzay, üretim ve ulaşım endüstrilerinde son teknoloji ekipman ve araçları tasarlama, teslim etme ve bakımını yapma becerisi, yapay zeka tekniklerinin yardımıyla son yıllarda önemli ölçüde iyileşti. Yapay zeka algoritmaları, farklı mühendislik alanlarındaki alan bazlı sorunlara çözüm bulunmasına yardımcı olmuştur. Genel

olarak, yapay zekanın üretim çevrim süresini ve hurda miktarını azaltmaya yardımcı olduğu ve bunun da üretimdeki belirli karmaşık sorunlarda kaynak kullanımını muazzam bir şekilde artırdığı kanıtlanmıştır (Nti vd., 2022).

4. Tarım

Dijitalleşme, üreticilere üretim sistemlerini kullanmaları ve optimize etmeleri için kesin bilgiler sağlar. Dahası, dijital teknolojiler, çeşitli tarım-gıda sistemi aktörlerini birbirine bağlayarak yeni ve yenilikçi üretim ve tüketim modelleri geliştirme olanakları sunar. Dijital teknolojilerdeki, özellikle yapay zeka alanındaki yenilikler, tarım sektörüne önemli faydalar vaat etmektedir. Tarımın, çevresel boyutları da göz önünde bulundurarak gıda güvenliği ve emniyetini sağlaması giderek daha fazla beklenmektedir (Ryan vd., 2023).

Hesaplama yeteneklerindeki ilerlemeler ve bulut kullanımının artmasıyla birlikte dünya ekonomisinin daha fazla alanı yapay zekanın faydalarını görmeye başladı. Tarım, yapay zekanın faydalarını görmeye başlayan alanlardan biri. İster yabancı ot kontrolü ister mahsul hasadı için en uygun zamanın hesaplanması, ister toprak ve mahsul sağlığının izlenmesi, isterse de verimi önceden tahmin etmek olsun.

Yapay zeka ve makine öğrenmesi son on yılda çeşitli endüstrilerde geliştirme araçları olarak test edildi. Ancak, yapay zekanın tarımsal karar alma süreçlerini iyileştirmek için kullanılabileceği ancak yakın zamanda anlaşıldı. Özellikle çiftçiler yapay zeka teknolojisi sayesinde daha iyi kararlar alabilir ve bu da tarım ve hayvancılık üretiminde verimliliğin artmasına yol açabilir. Çeşitli faktörler, tarım sektörünün daha iyi karar alma süreçleri için yapay zeka teknolojisini benimseme isteğine katkıda bulunmaktadır. Mevcut verilerdeki yadsınamaz artış ve bunlara erişimin kolaylığı ön plandadır (Javaid, 2023).

MATLAB

MATLAB, teknik hesaplamalar için yüksek performanslı bir dildir. Hesaplama, görselleştirme ve programlama ortamını entegre eder. Dahası, MATLAB modern bir programlama dili ortamıdır: gelişmiş veri yapılarına sahiptir, yerleşik düzenleme ve hata ayıklama araçları içerir ve nesne yönelimli programlamayı destekler. Bu faktörler, MATLAB'ı öğretim ve araştırma için mükemmel bir araç haline getirir.

MATLAB, teknik problemleri çözmek için geleneksel bilgisayar dillerine (örneğin C, FORTRAN) kıyasla birçok avantaja sahiptir. MATLAB, temel veri ögesi boyutlandırma gerektirmeyen bir dizi olan etkileşimli bir sistemdir (Houque, 2005).

MATLAB'ın modelleme ve simülasyondaki önemi, uyarlanabilirliğine ve zengin fonksiyon kütüphanesine bağlanabilir. Araştırmacılara, fizikteki fiziksel süreçlerden biyolojideki ekolojik dinamiklere, kimyadaki kimyasal reaksiyonlara ve farklı bilimsel alanlardaki diğer çeşitli karmaşık olgulara kadar gerçek dünya sistemlerini temsil eden matematiksel modeller oluşturma olanağı sağlar (Niazai vd., 2023).

Problemlerin ve çözümlerin matematiğe yakın bir biçimde ifade edildiği, kullanışlı bir ortamda hesaplama, görselleştirme ve programlamayı içerir. MATLAB, belirli bir problemin daha iyi optimal değerlerini elde etmek için hibrit bir algoritma oluşturmak üzere ayrıntılı bir örnek sunar. MATLAB'ın tipik kullanım alanları şunlardır: matematiksel hesaplamalar, algoritma oluşturma, modelleme, veri analizi, araştırma ve görselleştirme, bilimsel ve mühendislik grafikleri, uygulama geliştirme ve grafiksel ara yüz oluşturma. MATLAB, ana veri öğesinin bir dizi olduğu etkileşimli bir sistemdir. Bu, özellikle matris ve vektörlerin kullanıldığı teknik hesaplamalarla ilgili çeşitli problemleri, "C" veya Fortran gibi "skaler" programlama dilleri kullanılarak program yazmaya kıyasla kat kat daha hızlı çözmenizi sağlar. MATLAB, çeşitli kullanıcıları hedefleyerek birkaç yıl boyunca geliştirilmiştir. Üniversite ortamında, matematik, makine mühendisliği ve bilimin çeşitli alanlarında çalışmak için standart bir araçtır (Kurasov, 2020).

Matematik, yapay zeka gelişiminde kritik bir rol oynar. Yapay zekâ algoritmaları, verilerden öğrenmelerine ve tahminlerde bulunmalarına olanak tanıyan matematiksel modellere dayanır. Yapay zekanın temelini oluşturan matematiksel kavramlardan bazıları doğrusal cebir, kalkülüs ve olasılık teorisidir (Bousmaha, 2023).

MATLAB ile Zekâ Uygulamaları

Yapay zeka, bilgisayar bilimi, biyoloji, psikoloji, dilbilim, matematik ve mühendislik gibi disiplinlere dayanan ve birden fazla yaklaşıma sahip disiplinler arası bir bilimdir. Bu nedenle, sayısal hesaplamalar için güçlü bir araç olan MATLAB, yapay zeka geliştirme için sağlam özellikler sunarak farklı disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, fizik ve mühendislik araştırmalarında, karmaşık matematiksel ve hesaplamalı görevleri basitleştirmesi özellikle diferansiyel denklemler ve karmaşık cebirsel denklemler içeren sayısal simülasyonlar gerçekleştirmek ve karmaşık matematiksel problemleri çözmesi bakımından MATLAB'ın önemi görülmektedir (Niazai vd., 2023).

MATLAB, çevre araştırmacılarının araştırma gündemlerine dahil etmeyi düşünebilecekleri bir dizi makine öğrenimi tekniğini sergilemek için kullanılır. Bir araştırmacının bilgi işlem becerileri ne olursa olsun, makine öğrenimi büyük

veri kümelerini alıp modelleri nispeten hızlı ve kolay bir şekilde geri döndürme olanağı sağlar (Nadler, 2019).

Literatürde farklı alanlarda MATLAB kullanılarak yapay zekâ uygulamalarına dair çalışmalar bulunmaktadır.

Arias-Serrano ve ark.ları körlüğe yol açan geri döndürülemez retina hasarının önde gelen nedenlerinden Glokom ve diyabetik retinopatinin tespitinde MATLAB ile yeniden eğitilmiş bir AlexNet evrişimli sinir ağlarını kullandılar (Arias-Serrano vd., 2024).

Afrin ve Ali insan beyninin davranışını taklit eden yapay sinir ağları oluşturmayı hedefleyen derin öğrenme bağı olarak beynin esintili yapay zekasını anlamak amacıyla MATLAB'ı uyguladılar (Afrin ve Ali, 2015).

Zubair ve Akram genel Basıncılı Su Reaktörü simülatöründen türetilen hidrolik parametreleri kullanarak geçici olayları tahmin etme yeteneğine sahip makine öğrenimi modellerini eğitmek ve doğrulamak için MATLAB kullandılar (Zubair ve Akram, 2023).

Khademi ve ark.ları farklı karışımlarda elde ettikleri betonların günlük basınç dayanımını tahmin etmek için MATLAB programlama ortamında çoklu doğrusal regresyon modeli, yapay sinir ağı ve adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemiyle test ettiler (Khademi vd., 2017).

Joss ve Müller birinci sınıf fen ve mühendislik fakültesi öğrencilerine yönelik bir sınıf içi alıştırma, problem ifadeleri, alıştırmanın geliştirilmesine yönelik veri dosyaları ve çözümleri MATLAB ile analizini gerçekleştirdiler (Joss ve Müller, 2019).

Yapılan çalışmalardan anlaşılacağı üzere yapay zeka uygulamalarında MATLAB kullanımının yaygın olduğu görülmektedir. Özellikle de yapay zekanın kullanımının gittikçe artmaya başlaması MATLAB'ın da kullanımının artmasını sağlayacaktır. Özellikle de tek bir alanla sınırlı olmadığından farklı uygulamalarda da kolayca kullanılabilmesi de MATLAB'ın yapay zeka uygulamalarında kullanımını yaygınlaştıracaktır.

KAYNAKLAR

- Afrin, E., Ali, S. (2015). Implementation of Neuron Models Using MATLAB; an Introduction to Brain-Inspired Artificial Intelligence. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* 3(10): 2454-4698.
- Al Kuwaiti, A., Nazer, K., Al-Reedy, A., Al-Shehri, S., Al-Muhanna, A., Subbarayalu, A.V., Al Muhanna, D., Al-Muhanna, F.A. (2023). A Review of the Role of Artificial Intelligence in Healthcare. *Journal of Personalized Medicine* 13, 951.
- Arias-Serrano, I., Velásquez-López, P.A., Avila-Briones, L.N., Laurido-Mora, F.C., Villalba-Meneses, F., Tirado-Espin, A., Cruz-Varela, J., Almeida-Galárraga, D. (2024). Artificial intelligence based glaucoma and diabetic retinopathy detection using MATLAB- retrained AlexNet convolutional neural network. 3;12.
- Bousmaha, W.L. (2023). Exploring the Benefits of Artificial Intelligence (AI) in Developing Applications for Humans. 0 *United International Journal for Research & Technology*. 4(5), 122-125.
- Chen, L., Chen, P. and Lin, Z. (2020). Artificial Intelligence in Education: A Review," in *IEEE Access*, 8, 75264-75278.
- Dave, M., Patel, N. (2023). Artificial intelligence in healthcare and education. *Br Dent J* 234, 761–764.
- Dimiduk, D.M., Holm, E.A. & Niezgoda, S.R. (2018). Perspectives on the Impact of Machine Learning, Deep Learning, and Artificial Intelligence on Materials, Processes, and Structures Engineering. *Integr Mater Manuf Innov* 7, 157–172
- Houcque, D. (2005). INTRODUCTION TO MATLAB FOR ENGINEERING STUDENTS. Erişim tarihi: 12.07.2025 Erişim adresi: <https://www.mccormick.northwestern.edu/documents/students/undergraduate/introduction-to-matlab.pdf>
- Javaid, M., Haleem, A., Khan I. H., Suman, R. (2023). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector. *Advanced Agrochem* 2(1), 15-30.
- Jenis, J., Ondriga, J., Hrcek, S., Brumerick, F., Cuchor, M., Sadovsky, E. (2023). Engineering Applications of Artificial Intelligence in Mechanical Design and Optimization. *Machines*. 11, 577.
- Joss, L., Müller, EA. (2019). Machine Learning for Fluid Property Correlations: Classroom Examples with MATLAB. *Journal of Chemical Education* 96(4).

- Khademi, F., Akbari, M., Jamal, S.M. et al. (2017). Multiple linear regression, artificial neural network, and fuzzy logic prediction of 28 days compressive strength of concrete. *Front. Struct. Civ. Eng.* 11, 90–99.
- Khanzode, K.C.A., Sarode, R.D. (2020). Advantages And Disadvantages of Artificial Intelligence and Machine Learning: A Literature Review. *International Journal of Library & Information Science (IJLIS)* 9(1), 30-36.
- Kurasov, D. (2020). Mathematical modeling system MatLab. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1691 012123
- Lee, S.J., Lee, S.R., Kim, Y.S. (2003) An approach to estimate unsaturated shear strength using artificial neural network and hyperbolic formulation. *Comput Geotech* 30(6):489–503.
- Mijwil, M.M., Aggarwal, K., Sonia, S., Al-Mistarehi, A.H., Alomari, S., Gök, M., Zein Alaabdin, A.M., and Abdulrhman, S.H. (2022). Has the Future Started? The Current Growth of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning. *Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics:* 3(1), 115-123.
- Moayedi, H., Mosallanezhad, M., Rashid, A.S.A. et al. (2020). A systematic review and meta-analysis of artificial neural network application in geotechnical engineering: theory and applications. *Neural Comput & Applic* 32, 495–518.
- Mughal, F., Wahid, A., Khattak, M.K. (2022). Artificial Intelligence: Evolution, Benefits, and Challenges. In: Garg, S., Aujla, G.S., Kaur, K., Hassan Ahmed Shah, S. (eds) *Intelligent Cyber-Physical Systems for Autonomous Transportation. Internet of Things.* Springer, Cham.
- Nadler, D.W. (2019). Decision support: using machine learning through MATLAB to analyze environmental data. *J Environ Stud Sci* 9, 419–428.
- Niazai, S., Rahimzai, A.A., Atifnigar, H. (2023). Applications of MATLAB in Natural Sciences: A Comprehensive Review. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 1(5), 1006-1015.
- Nti, I.K., Adekoya, A.F., Weyori, B.A. et al. (2022). Applications of artificial intelligence in engineering and manufacturing: a systematic review. *J Intell Manuf* 33, 1581–1601
- Ouyang, F., and Jiao, P. (2021). Artificial intelligence in education: The three paradigms. *Computers and Education: Artificial Intelligence* 2, 100020.
- Panch, T., Szolovits, P., Atun, R. (2018). Artificial intelligence, machine learning and health systems. *Journal of Global Health.* 8(2):020303.

- Pannu, A. (2015). Artificial Intelligence and its Application in Different Areas. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* 4(10):79-84.
- Ryan, M., Isakhanyan, G., and Tekinerdogan, B. (2023). An interdisciplinary approach to artificial intelligence in agriculture. *NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences*, 95(1).
- Sohail, A. (2023). Genetic Algorithms in the Fields of Artificial Intelligence and Data Sciences. *Ann. Data. Sci.* 10, 1007–1018.
- Sunarti, S., Rahman, F.F., Naufal, M., Risky, M., Febriyanto, K., Masnina R. (2021). Artificial intelligence in healthcare: opportunities and risk for future. *Gaceta Sanitaria*. 35, Supplement 1, 67-70.
- Vinothkumar, J., Karunamurthy, A. (2023). Recent Advancements in Artificial Intelligence Technology: Trends and Implications. *Quing: International Journal of Multidisciplinary Scientific Research and Development*. 2(1), 01-11
- Yunxiang L., Luting, W., Xiaogang, G, Miaoran, C. (editors) (2023). *Artificial Intelligence Technology*. Huawei Technologies Co., Ltd. ISBN 978-981-19-2878-9
- Zhang, W., Li, H., Li, Y., Liu, H., Chen, Y., & Ding, X. (2021). Application of deep learning algorithms in geotechnical engineering: a short critical review. *Artificial Intelligence Review*, 54(8), 5633–5673.
- Zubair, M., Akram, Y. (2023) Utilizing MATLAB machine learning models to categorize transient events in a nuclear power plant using generic pressurized water reactor simulator. *Nuclear Engineering and Design*. 415, 112698.

8. Bölüm

Elektrikli Araçlarda Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Fatih OKTAY¹, Emin EL², Zeki ARGUNHAN³

Özet

Elektrikli araçların performans, güvenlik ve uzun ömür gereksinimlerini karşılayabilmesi için batarya termal yönetim sistemleri hayati bir öneme sahiptir. Bu çalışma, lityum-iyon bataryaların termal özelliklerini ve çeşitli Batarya Termal Yönetim Sistem (BTYS) teknolojilerini incelemektedir. Lityum-iyon bataryaların ideal çalışma sıcaklığı 15 °C ile 35 °C arasında olup, bu aralığın dışına çıkılması performans düşüşü, hücre ömründe azalma ve termal kaçak riskini artırmaktadır. BTYS çözümleri üç ana başlıkta sınıflandırılmıştır: aktif, pasif ve hibrit sistemler. Aktif sistemlerde hava ve sıvı soğutma yöntemleri değerlendirilmiş, sıvı soğutmanın yüksek ısı taşıma kapasitesi nedeniyle özellikle yüksek enerji yoğunluklu uygulamalarda daha etkili olduğu görülmüştür. Pasif sistemlerde ise faz değişim malzeme (FDM) ve ısı boruları kullanılarak enerji verimliliği artırılmaktadır. FDM'ler gizli ısı depolama kabiliyetleri sayesinde sıcaklık dalgalanmalarını kontrol altında tutarken, düşük ısı iletkenlikleri sebebiyle tek başlarına ısı iletiminde yetersiz kalmaktadır. Hibrit sistemler, farklı teknolojileri entegre ederek hem sıcaklık kontrolü hem de sistem kararlılığı açısından üstün performans sunmaktadır. FDM-sıvı, FDM-hava ve FDM-Isı borusu kombinasyonları, farklı uygulamalara göre çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu sistemler, bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını desteklemektedir. Sonuç olarak, BTYS' nin etkinliği uygun FDM seçimi, uzun vadeli malzeme kararlılığı, sistem entegrasyon kolaylığı ve üretim maliyetleri gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu alanlarda yapılacak araştırmalar, gelecekte BTYS teknolojilerinin elektrikli araçlar başta olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesinde yaygınlaşmasını sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Lityum iyon piller, Batarya termal yönetim sistemi.

¹ Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bitlis/Türkiye.

² Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bitlis/Türkiye.
<https://orcid.org/0000-0001-6596-9654>

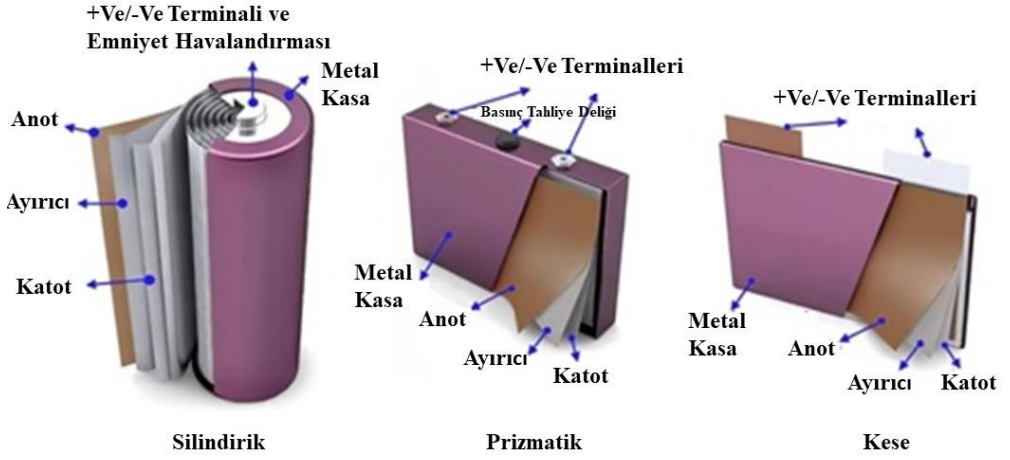
³ Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bitlis/Türkiye.

1. Giriş

Benzinli ve dizel yakıtla çalışan araçların yaygın kullanımı, sera gazı ve partikül madde emisyonlarını önemli ölçüde artırmakta, bu da otomotiv sektöründe çevresel etkileri azaltacak alternatif çözümlere duyulan ihtiyacı gün geçtikçe artırmaktadır. Bu bağlamda, sektör genelinde geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara sürdürülebilir bir alternatif olarak elektrikli araçlara yönelim hız kazanmıştır. Elektrikli araçların (EA' ların) hızla benimsenmesi ise yalnızca çevresel ve operasyonel avantajlarına değil, aynı zamanda yüksek verimliliğe sahip enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine doğrudan bağlıdır. EA' ların yaygınlaşmasıyla birlikte, enerjiyi güvenli ve etkin biçimde depolayabilen ileri düzey pil teknolojilerine olan ihtiyaç artmış; bu durum, enerji depolamanın elektrikli araçların uzun vadeli başarısında kritik bir unsur haline gelmesine yol açmıştır.

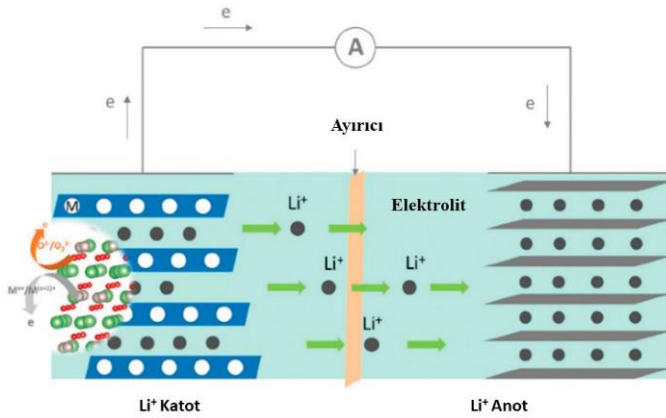
Enerji depolama sistemleri, elektrikli araçların geliştirilmesinde temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin EA' larla entegre şekilde kullanımı; daha uzun deşarj süreleri, daha düşük yaşam döngüsü maliyetleri ve artırılmış sistem güvenilirliği gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Günümüzde ticari olarak temin edilebilen başlıca batarya türleri arasında kurşun-asit [1,2], nikel-kadmiyum [3,4], nikel-metal hidrit [5,6], lityum polimer ve lityum iyon piller [7,8] bulunmaktadır. Bu seçenekler arasında, lityum iyon (Li-ion) piller; yüksek enerji yoğunlukları, artan özgül güçleri, düşük ağırlıkları, düşük iç dirençleri ve sürekli gelişen geri dönüştürülebilir özellikleri sayesinde, elektrikli araçlar için en uygun enerji depolama çözümü olarak kabul edilmektedir [9].

Lityum iyon pillerin (Li-ion) temel bileşenleri; pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), elektrolit, ayırıcı, terminaller ve koruyucu kasadan oluşmaktadır [10]. Bu piller, fiziksel yapılarına bağlı olarak silindirik, prizmatik ve kese tipi (pouch) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, söz konusu üç yapı tipi, günümüzde en yaygın kullanılan lityum iyon pil çeşitleri arasında yer almaktadır.



Şekil 1. Farklı lityum iyon pil türlerinin temsili görselleri: Silindirik hücre [11], prizmatik hücre [12] ve kese (pouch) tipi hücre [13].

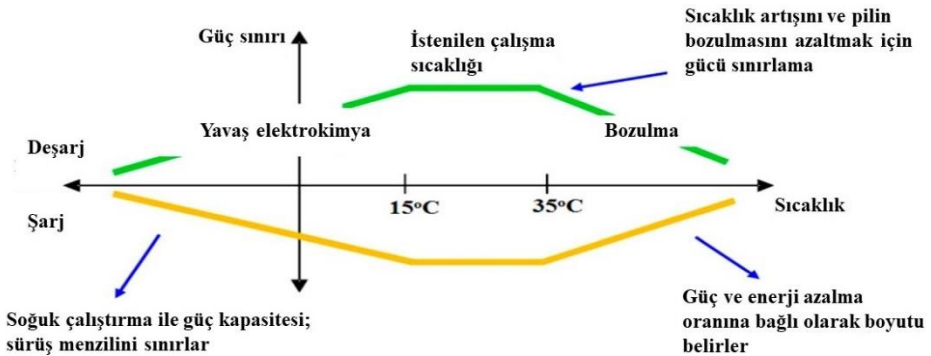
Şekil 2' de, bir Li-ion pilin çalışma prensibini grafiksel olarak sunmaktadır [14]. Katot ve anot, enerji depolama ve salınımı sırasında lityum iyonlarının hareketinden sorumlu temel yapılardır. Ayırıcı, Li^+ iyonlarının bu iki elektrot arasında geçişini mümkün kılarken, aynı zamanda elektrotları fiziksel olarak birbirinden ayırarak iç kısa devreleri önlemeye yönelik kritik bir güvenlik işlevi görür. Elektrolit ise başta Li^+ iyonları olmak üzere iyonların taşınmasından sorumlu ortamı sağlar. Bu dört bileşenden herhangi birinin bağımsız ya da birlikte arıza göstermesi, pilin genel performansını olumsuz yönde etkileyebileceği gibi, güvenliği de ciddi şekilde riske atabilir [15].



Şekil 2. Lityum-iyon pilin çalışma prensibi [16].

Bir pilin geniş sıcaklık aralıklarında etkin bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir. Özellikle düşük sıcaklık koşullarında, pilin şarj kapasitesi, güç çıkışı ve enerji verimliliği ciddi oranda azalma eğilimi gösterir. Bu durum, hücre performansının belirgin şekilde düşmesine neden olur. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda pillerde kendi kendine deşarj olgusu meydana gelebilir; bu da zamanla kapasite kaybına ve performansta kademeli bir bozulmaya yol açar [17]. Daha da önemlisi, pil sıcaklığı belirli bir eşiği aştığında termal kaçak olarak bilinen kritik bir durum ortaya çıkabilir. Termal kaçak, pilin aşırı ısınması sonucu ardışık ekzotermik reaksiyonların tetiklenmesiyle geri döndürülemez hasarların meydana gelmesine neden olur ve güvenlik açısından son derece tehlikelidir [18]. Bu durum özellikle yüksek deşarj oranlarında, yüksek ortam sıcaklıklarında ($>40^{\circ}\text{C}$) ya da aşırı ısı, elektronik veya mekanik stres altında çalıştırılan pillerde daha olasıdır. Örneğin aşırı şarj, aşırı deşarj veya fiziksel hasar gibi kötüye kullanım senaryoları, termal kaçak riskini ciddi ölçüde artırmaktadır.

Pillerde gözlemlenen sıcaklık etkilerinin büyük bir kısmı, hücreler içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ile kullanılan malzeme özelliklerine doğrudan bağlıdır [19]. Elektrikli araçlara entegre edilen pil sistemleri genellikle -40°C ila 60°C arasında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır [20]. Bununla birlikte, optimum performans ve uzun ömürlü kullanım için pil sistemlerinin tercih edilen çalışma sıcaklık aralığının 15°C ila 35°C arasında olması gerektiği genel kabul görmektedir [21]. Bu sınırların dışında kalan sıcaklık koşulları, pilin termal performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta ve özellikle kapasite kaybı ile hizmet ömrünün kısalmasına neden olmaktadır (Şekil 3). Nitekim, sıcaklıkta her bir derece artışın, pil ömrünü yaklaşık iki ay azalttığı tahmin edilmektedir [22]. Ayrıca, bir pil takımı içerisinde hücreler arasında oluşabilecek maksimum sıcaklık farkının 5°C 'yi geçmemesi önerilmektedir [23].



Şekil 3. Li-ion bataryalarının çalışma sıcaklık aralıkları ve etkileri [14]

Düşük sıcaklık koşulları da benzer şekilde performans üzerinde negatif etkiler oluşturur. Özellikle -20 °C gibi düşük sıcaklıklarda, hücre içi empedans belirgin şekilde artmakta ve bu durum kapasitede yaklaşık %60'a varan düşüşlere yol açabilmektedir [24,25]. Bu bağlamda, sıfırın altındaki sıcaklıklarda şarj ve deşarj işlemlerinin etkinliği, EA pil yönetiminde karşılaşılan temel zorluklardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Yüksek sıcaklıklar, elektrokimyasal reaksiyon hızlarını artırarak daha yüksek güç çıkışı ve gelişmiş kapasite elde edilmesini sağlar; ancak bu durum aynı zamanda daha fazla ısı üretimine ve dolayısıyla artan termal yüke de neden olur [26]. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkların bir diğer olumsuz etkisi, elektrolit bileşenlerinin ayrışması ve anot yüzeyinde oluşan pasifleştirme tabakasının homojenliğinin bozulması sonucunda kapasite kaybının meydana gelmesidir [14]. Eğer üretilen ısı, sistemden yeterince hızlı bir şekilde uzaklaştırılmazsa, sıcaklıklar kontrolsüz bir biçimde artabilir. Bu durum, hücre bileşenlerinin termal olarak bozulmasına [27] ve hatta lityum iyon pillerde sıklıkla karşılaşılan tehlikeli bir durum olan termal kaçışa (thermal runaway) yol açabilir [28]. Termal kaçış, hücre içinde ani sıcaklık artışı, gaz oluşumu ve hatta patlama gibi zincirleme reaksiyonlara neden olarak hem aracın yapısal bütünlüğünü hem de yolcu güvenliğini ciddi şekilde tehlikeye atar [29,30]

Tek bir hücre içerisindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı, hücrenin farklı bölgelerinde değişken elektrokimyasal reaksiyon hızlarına neden olarak enerji kullanımının verimsiz hâle gelmesine ve pil ömrünün kısalmasına yol açmaktadır. Yapılan çalışmalar, bir hücre içerisindeki sıcaklık farkının 5 °C'yi aşması durumunda termal yaşlanmada yaklaşık %25 oranında artış ve güç kapasitesinde %10'a varan azalma meydana geldiğini ortaya koymuştur [31–33]. Pil takımı düzeyinde ise hücreler arasında kapasite, gerilim ve iç direnç gibi parametrelerdeki farklılıkların oluşması yaygın ve doğal bir durumdur. Bu farklılıklar, hücreler arasında farklı termal tepkimelere neden olarak tüm pil takımı boyunca bir sıcaklık gradyanı oluşmasına yol açar. Örneğin, pil takımında 5 °C' lik bir sıcaklık farkı, toplam kapasitede (depolanan enerjide) %1,5 ile %2 oranında ve güç kapasitesinde (üretilen güç miktarında) %10'a varan azalmaya neden olabilir [34,35].

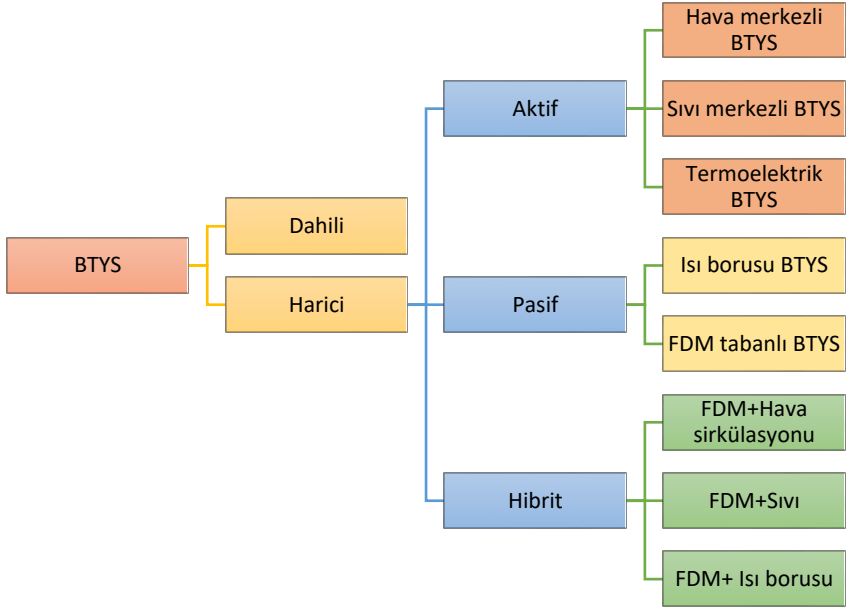
Bu nedenle, pil sıcaklıklarını istenen aralıkta tutmak ve pil modülleri arasındaki sıcaklık dengesizliğini en aza indirmek amacıyla, yüksek verimliliğe sahip BTYS tasarımı büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda, yeni nesil BTYS' lerin geliştirilmesi ve mevcut sistemlerin optimize edilmesi amacıyla yangın geciktirici katkı maddeleri de dahil olmak üzere kapsamlı araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Ayrıca, daha kısa şarj süreleri ve daha uzun menzil hedefleri doğrultusunda artan şarj oranları, BTYS' nin performansına yönelik

gereksinimlerin daha da artmasına neden olmakta ve bu sistemlerin tasarımında daha büyük bir özen gerektirmektedir.

2. Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Lityum iyon (Li-ion) piller, taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre edilen enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanında kullanılmakta olup, günümüz teknolojilerinin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir [36]. Ancak, yüksek enerji yoğunluğu ve kompakt yapıları nedeniyle Li-ion piller, özellikle termal yönetim eksikliklerinden kaynaklanan önemli güvenlik riskleri barındırmaktadır [37]. Bu bağlamda, özellikle yüksek güçlü ve yoğun uygulamalarda, Batarya Termal Yönetim Sistemleri güvenli, verimli ve uzun ömürlü pil çalışması için temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. BTYS, pil sıcaklığını optimum aralıkta tutarak termal kaçak riskini azaltmakta, hücreler arası sıcaklık farkını en aza indirerek genel performansı iyileştirmekte ve sistemin dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca, çevresel koşulların zorlayıcı olduğu senaryolarda bile sistemin kararlı ve güvenilir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, BTYS yalnızca pil güvenliği açısından değil, aynı zamanda pil teknolojisinin sürdürülebilir gelişimi ve uygulama çeşitliliğinin artırılması açısından da kritik bir rol üstlenmektedir [38].

BTYS etkinliğini artırmak amacıyla, sistemin pil paketleriyle entegre bir biçimde tasarlanması gerekmektedir. Bu entegrasyon, bataryaların ideal çalışma sıcaklık aralığında sürekli olarak çalışmasını sağlayarak, pilin bozulmasını, termal kaçak riskini ve soğuk iklim koşullarında meydana gelen deşarj kapasitesi kaybını önler. Uygulanan BTYS' nin yüksek performans göstermesi ve aynı zamanda hafif bir yapıya sahip olması, elektrikli araç uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir. Nitekim, sistemin konumuna bağlı olarak, BTYS genel olarak iç (dahili) ve dış (harici) iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Şekil 4). Bu iki yaklaşım, pil modülünün çalışma güvenliği ve performansını sağlamak için farklı tasarım ve entegrasyon stratejileri sunar [13].



Şekil 4. Bataryalar için termal yönetim sistemlerinin sınıflandırılması

Dahili (İç) BTYS, sistem performansını artırmak amacıyla pilin iç bileşenlerinde yapılan yapısal ve malzeme temelli değişikliklere dayanmaktadır. Malzeme bileşiminin ve elektrot katmanlarının optimize edilmesiyle, pil paketlerinin iç direnci azaltılabilmekte ve böylece termal yönetim performansı iyileştirilebilmektedir. Harici (Dış) BTYS, doğrudan pil hücresinin yapısında değişiklik yapmaksızın, dışsal soğutma yöntemleriyle termal kontrol sağlar. Bu sistemler üç ana kategoriye ayrılmaktadır: aktif, pasif ve hibrit sistemler.

Aktif harici BTYS zorlama konveksiyonuna dayalı olarak hava veya sıvı soğutma akışkanlarının sirkülasyonunu içerir; bu tür sistemlerde fanlar, pompalar veya üfleyiciler gibi mekanik bileşenlerden yararlanılır. Pasif harici BTYS ise FDM ve ısı boruları gibi elemanlar aracılığıyla enerji alışverişini doğal yollarla gerçekleştirir. Bu iki yöntemin avantajlarını bir araya getiren hibrit sistemler ise hem yüksek ısı giderme kapasitesi hem de enerji verimliliği sağlayarak, pil sıcaklık yönetiminde optimize edilmiş çözümler sunar [13].

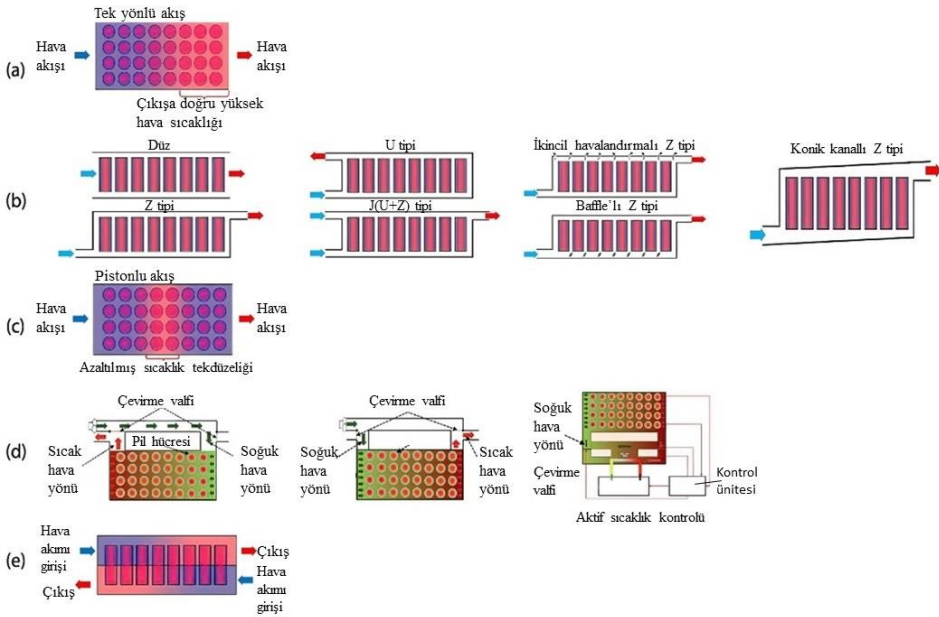
2.1. Aktif Soğutma Sistemleri

Aktif soğutma teknikleri; hava bazlı soğutma, sıvı bazlı soğutma ve termoelektrik soğutma gibi yöntemleri içermekte olup, ısı transfer sürecini optimize etmek amacıyla pompalar, kompresörler ve üfleyiciler yardımıyla soğutucu akışkanların zorlanmış sirkülasyonunu temel alır [39–42].

2.1.1. Hava Soğutmalı Sistemler

Hava, düşük sirkülasyon maliyetleri nedeniyle ekonomik bir soğutucu olarak öne çıkmakta ve zorlanmış hava konveksiyonuna dayalı sistemler, farklı pil konfigürasyonlarında başarıyla uygulanabilmektedir [43,44]. BTYS' lerde yaygın olarak tercih edilen hava soğutma yöntemi; basit uygulama, düşük maliyet ve yüksek elektriksel güvenlik gibi avantajlara sahiptir. Aktif hava soğutmalı sistemlerde ise hava sirkülasyonunu sağlamak için özel olarak tasarlanmış kanallar ve fanlar kullanılmaktadır (Şekil 5).

Şekil 5, aktif hava soğutmalı BTYS'lerde kullanılan çeşitli hava akışı düzenlemelerini, hava akışı yönü ve modül yapısının sistem performansı üzerindeki etkilerine odaklanarak göstermektedir. Bu yapılandırmalar, pil hücreleri arasında daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Böylece, termal dengesizlik kaynaklı performans kayıpları en aza indirgenmekte ve sistemin genel güvenilirliği artırılmaktadır [46,47].

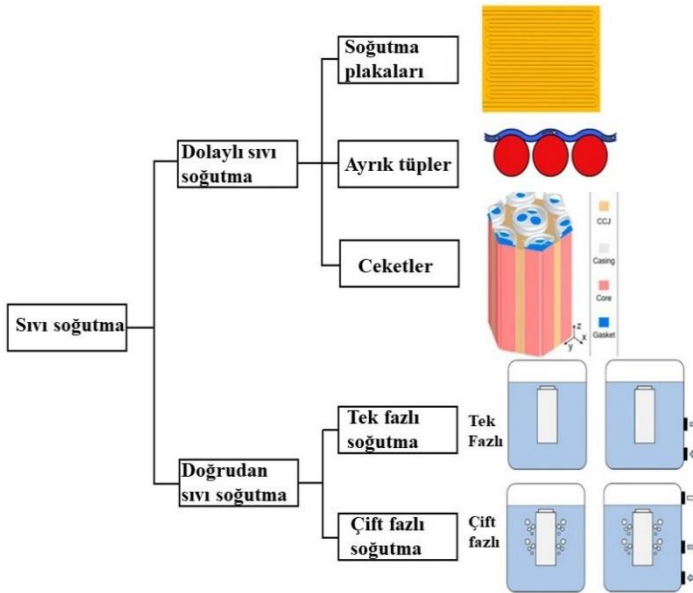


Şekil 5. Diyagram, aktif hava soğutmalı BTYS' de kullanılan çeşitli hava akışı yapılandırmalarını göstermektedir. Bu yapılandırmalar şunları içerir: (a) tek yönlü akış, (b) tek yönlü akış farklı akış düzenlemeleri, (c) karşılıklı akış, (d) aktif kontrole sahip karşılıklı akış ve (e) Ters katmanlı hava akışı [45].

Hava soğutma sistemlerinin verimliliği, büyük ölçüde pil hücrelerinin düzenlenme biçimine bağlıdır ve uygun yapılandırmalarla performans artırılabilir. Ancak, havanın düşük termal iletkenliği nedeniyle, bu sistemler yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya paketlerinde yeterli verim sağlayamamakta ve daha etkin olan sıvı bazlı soğutma sistemlerine kıyasla sınırlı bir performans göstermektedir. Ayrıca, hava soğutmanın görece düşük etkinliği, hücreler arasında homojen sıcaklık dağılımı sağlanmasını zorlaştırmakta ve bu durum, termal yönetim açısından istenmeyen sıcaklık farklılıklarına yol açmaktadır. Sistem performansını artırmak için yapılacak yapısal veya işlevsel müdahaleler ise, sistemin basitliğini zedeleyebileceği gibi, batarya paketinin genel enerji yoğunluğunu da olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, hava soğutma sistemlerinin tasarımında performans ile yapısal sadelik arasında dikkatli bir denge kurulması gerekmektedir.

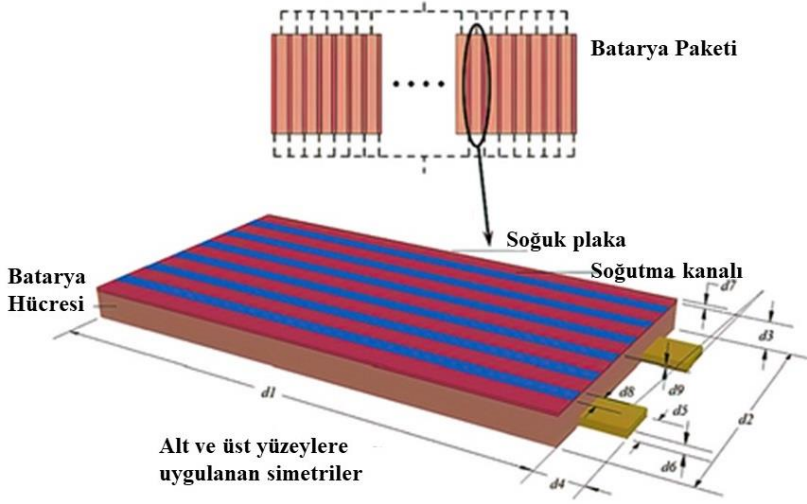
2.1.2. Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Sıvı soğutma sistemleri, yüksek ısı iletkenlikleri ve etkin termal kontrol kapasiteleri sayesinde, hava soğutmaya kıyasla daha verimli bir ısı yönetimi sunmakta ve pompalama işlemleri için daha düşük elektrik enerjisi gerektirmektedir [48]. Batarya termal yönetiminde sıvı soğutma uygulamaları genellikle iki temel kategori altında sınıflandırılmaktadır (Şekil 6).



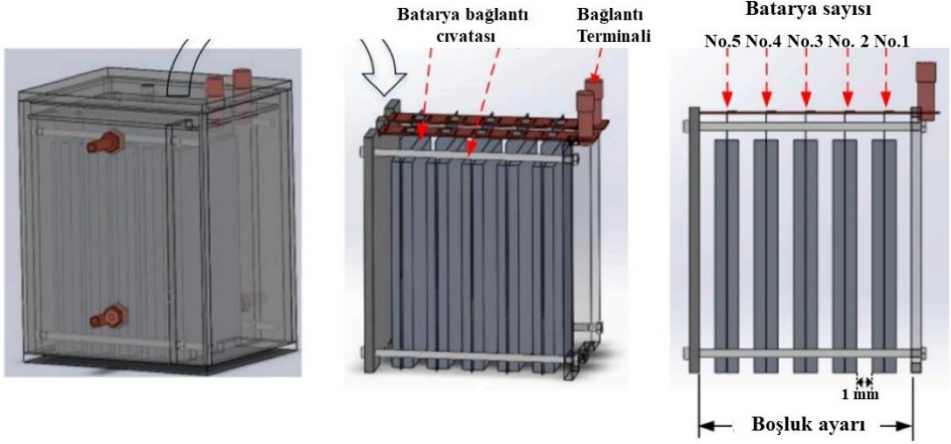
Şekil 6. Sıvı Soğutmalı BTYS sınıflandırmasını ve uygulama örnekleri [49–52].

Dolaylı soğutma her bir pil hücresinin yakınına yerleştirilen şartlandırma plakaları, kılıflar veya borular gibi ara elemanlar aracılığıyla ısının transfer edildiği sistemlerdir (Şekil 7). Bu sistemlerde, termal temas direncini minimize etmek amacıyla, yüksek yüzey hassasiyetine sahip metal soğutma plakalarının kullanılması ve arayüzde yüksek ısı iletkenliğine sahip termal gres veya epoksi bazlı bağlayıcıların uygulanması gerekmektedir [53–55].



Şekil 7. Dolaylı sıvı soğutma sistemi [56]

Doğrudan sıvı soğutma yöntemi, pil yüzeyinin ısı transfer sıvısı ile doğrudan temas etmesi esasına dayanmakta olup, bu sayede hızlı ve etkili bir ısı değişimi sağlanmaktadır (Şekil 8). Bu yöntemde, soğutucu ile batarya arasındaki doğrudan temas, ısı transfer sürecini optimize ederken sistemin yapısal karmaşıklığını azaltmakta ve temas yüzeyindeki termal direnci önemli ölçüde düşürmektedir. Doğrudan temas gerektiren bu sistemlerde kullanılan soğutucuların iyi yalıtılmış, yanıcı olmayan ve çevre dostu niteliklere sahip olması büyük önem taşımaktadır. Uygulamada yaygın olarak tercih edilen soğutucu sıvılar arasında silikon yağı, trafo yağı ve hidrofloroeter türevleri yer almaktadır. Dolaylı sıvı soğutma sistemleriyle karşılaştırıldığında, doğrudan sıvı soğutma sistemleri daha az yer kaplayarak sistem hacminde ve maliyetlerde tasarruf sağlayabilmekte, aynı zamanda batarya paketinin toplam ağırlığını azaltabilmektedir. Ancak, kullanılan soğutucu sıvıların yüksek viskozitesi nedeniyle bu sistemler, dolaşım için daha fazla pompalama enerjisi gerektirmekte ve enerji tüketimi açısından dezavantaj oluşturmaktadır [57].



Şekil 8. Doğrudan sıvı soğutma sistemi [58]

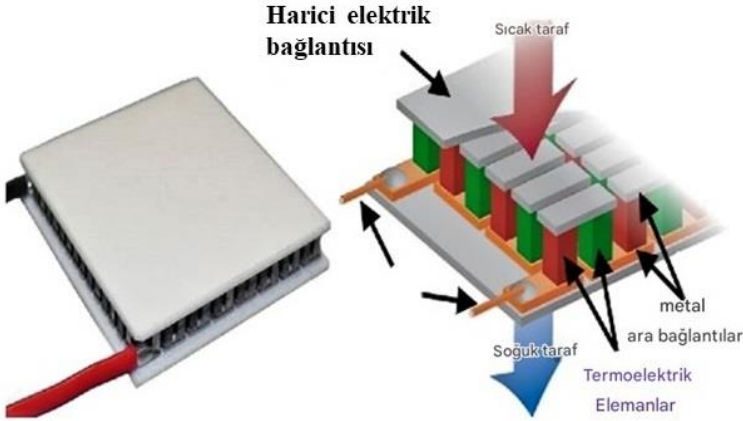
Sıvı soğutma sistemleri, özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluklu uygulamalarda, yüksek ısıl iletkenlikleri ve etkin termal kontrol kapasiteleri sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Günümüzde birçok elektrikli ve hibrit elektrikli araçta, soğuk plaka temelli sıvı soğutma sistemleri başarıyla uygulanmaktadır. Bu sistemler, yüksek ısı yüklerinin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayarak pil güvenliğini artırmakta ve pil ömrünü uzatmaktadır. Dolayısıyla sıvı soğutma sistemleri hem güvenlik hem de uzun ömürlü kullanım açısından gelişmiş batarya yönetimi sunarak, zorlu çalışma koşullarında öne çıkan bir çözüm haline gelmiştir [38].

2.1.3. Termoelektrik Elemanlı Batarya Soğutma Sistemleri

Termoelektrik modüller, sıcaklık farklarını elektrik enerjisine dönüştürebilme veya ters yönde çalışarak elektrik enerjisiyle ısı transferi sağlayabilme yetenekleri sayesinde, çeşitli ısıtma ve soğutma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında termoelektrik jeneratörler (TEJ) ve termoelektrik soğutucular (TES) yer almaktadır. TEJ' ler, Seebeck etkisini kullanarak ısıyı elektrik enerjisine dönüştürürken; TES' ler, Peltier etkisi aracılığıyla elektrik enerjisiyle aktif soğutma ve ısıtma işlevlerini yerine getirmektedir [59].

Tipik bir TES ünitesi, P tipi ve N tipi yarı iletken elemanlardan oluşan termoelektrik (TE) bacakların elektrikselsel olarak seri, termal olarak paralel şekilde bağlanmasıyla yapılandırılır. Bir gerilim uygulandığında, N tipi elemandan P tipe doğru yönlendirilen elektrik akımı modülün bir yüzeyinde soğutma, diğer yüzeyinde ise ısıtma etkisi oluşturur. Bu süreçte ortaya çıkan ısıнын etkin şekilde yönetilebilmesi amacıyla sistemde hava soğutmalı ortamlar ve ısı emiciler

kullanılmaktadır [60]. Şekil 9, termoelektrik cihazların soğutma sistemine entegrasyonunu ve yapılandırmasını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 9. Termoelektrik cihazların soğutma sistemine entegrasyonunu ve yapılandırması[61]

Termoelektrik soğutma sistemleri, bazı önemli avantajlar ve potansiyel uygulama alanlarına sahip olmakla birlikte, belirli sınırlamalar ve teknik zorluklar da içermektedir. Bu sistemler, çalışma sıvısı ve hareketli bileşenler içermemesi nedeniyle son derece güvenilir olup, ısıtma ve soğutma işlemleri arasında kolay geçiş imkânı sunar. Ayrıca kompakt ve hafif yapıları sayesinde farklı uygulamalarda kullanım için uygundur. Ancak, termoelektrik soğutmanın dönüşüm verimliliği nispeten düşüktür ve kullanılan malzemelerin yüksek maliyeti ekonomik açıdan bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu sistemlerin pil soğutma uygulamalarında daha verimli hale getirilebilmesi için, TES'lerin diğer soğutma sistemleriyle entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, N-tipi ve P-tipi termoelektrik elemanlarda yüksek performans sağlanabilmesi için daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Akım akışının uygun şekilde yönetilememesi, sistemde istenmeyen ısı oluşumuna yol açabilir. Termoelektrik soğutmanın termal verimliliği ise hâlen geleneksel soğutucu tabanlı sistemlerin gerisindedir ve bu nedenle daha yüksek performanslı sistemler geliştirmek için ileri düzeyde malzeme araştırmaları ve tasarım iyileştirmeleri gerekmektedir.

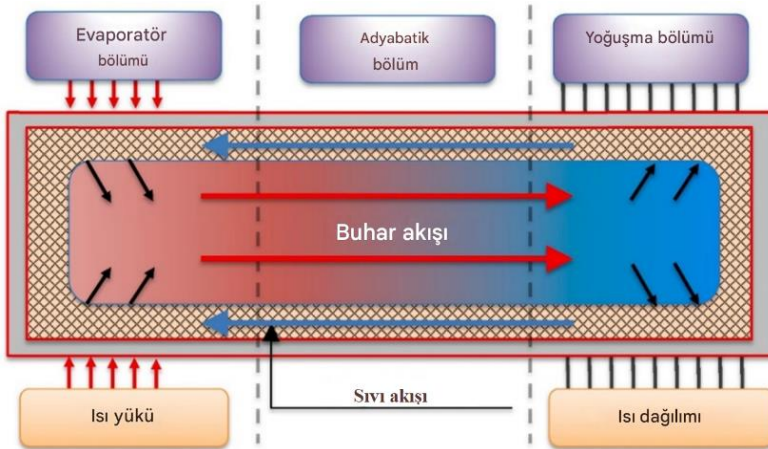
2.2. Pasif Soğutma Sistemleri

BTYS'lerde, harici güç kaynaklarına ihtiyaç duymadan çevresel koşullar, malzeme özellikleri ve geometrik modifikasyonlar aracılığıyla ısının dağıtılmasını sağlayan pasif soğutma stratejileri kullanılmaktadır. Pasif BTYS'

lerde, ısının dış ortama doğal yollarla aktarılması, bu yaklaşımı hem enerji açısından verimli hem de oldukça etkili bir çözüm haline getirmektedir. Kompakt tasarım, düşük maliyet, kolay kurulum ve uzun vadeli dayanıklılık gibi avantajlar sunan bu yöntemler, özellikle enerji tüketiminin minimize edilmesi gereken uygulamalar için uygundur. Pasif soğutma stratejileri arasında, ısı boruları ve FDM' ler yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemler arasında yer almaktadır [62,63].

2.2.1. Isı borularını kullanan Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Isı borusu, çalışma sıvısının faz geçişi prensiplerine dayalı olarak ısıyı etkin şekilde taşıyan ve dağıtan, yüksek termal iletkenliğe sahip basit bir ısı değiştirici elemandır. Kompakt yapısı ve harici enerji gereksinimi olmadan pasif şekilde çalışabilmesi, onu çeşitli termal yönetim uygulamalarında tercih edilen bir çözüm haline getirmektedir. Günümüzde ısı boruları; elektrik motorları, HVAC sistemleri, atık ısı geri kazanımı ve güneş termal sistemleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle elektrikli araç bataryalarının termal yönetim sistemlerine entegre edildiğinde, önemli avantajlar sunmaktadır. Bu uygulamalarda, ısı borusunun buharlaştırıcı bölümü bataryanın ürettiği ısıyı emer ve bu enerji, çalışma sıvısını buharlaştırarak gaz fazına geçirir. Oluşan sıcak gaz, kondansör bölgesine hareket ederek çevreye gizli ısı salınımı ile yoğunlaşır. Yoğuşan sıvı, kılcal fitil yapısı sayesinde buharlaştırıcı bölgeye geri döner ve bu döngü sürekli şekilde devam eder. Şekil 10, bu yapının genel konfigürasyonunu ve çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir [64].



Şekil 10. Isı borusu konfigürasyonu ve çalışma prensibi [64].

Son yıllarda bu sisteme dayalı pasif termal yönetim yaklaşımları, pil paketlerinin sıcaklık kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı boruları, yüksek ısı iletim kapasiteleri sayesinde, bataryanın istenen sıcaklık aralığında kalmasını sağlarken, hücreler arasındaki sıcaklık gradyanını da azaltarak homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmesine olanak tanımaktadır [64].

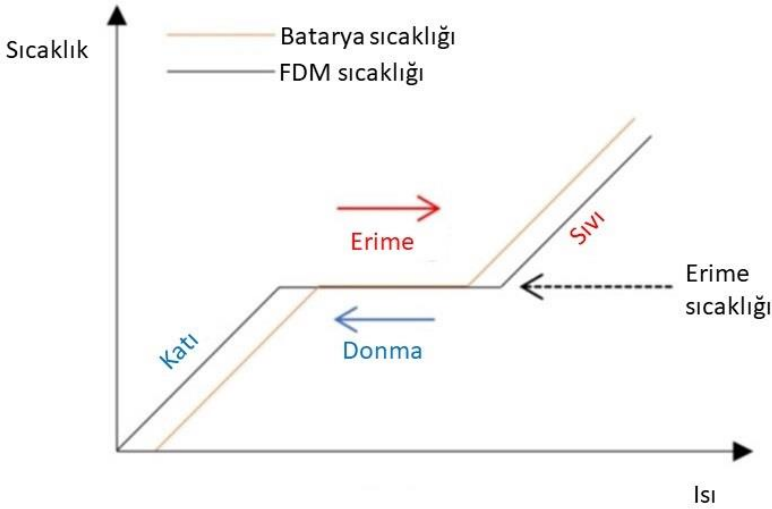
2.2.2. Faz Değişim Malzemesi Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Batarya termal yönetiminde öne çıkan yöntemlerden biri olan FDM tabanlı BTYS' ler, basit yapıları, sessiz çalışmaları ve harici enerjiye ihtiyaç duymadan ısıyı yönetebilmeleri sayesinde son yıllarda büyük ilgi görmektedir. FDM' ler, katı ve sıvı fazları arasında geçiş yaparak ısıyı depolamak veya serbest bırakmak amacıyla kullanılan gizli ısı depolama malzemeleridir. Bu özellikleri sayesinde FDM' ler yalnızca batarya sistemlerinde değil; fotovoltaiik modüller, suyu tuzdan arındırma sistemleri, elektronik ekipmanlar, termal depolama sistemleri ve binalarda ısıtma-soğutma uygulamaları gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrikli araçların bataryalarında ise FDM' ler, termal enerji depolama aracı olarak görev yaparak aşırı ısınmayı önlemeye katkı sağlar [65–67].

Pil sıcaklığı, FDM' nin erime noktasını aştığında, FDM faz değiştirerek ortamdaki ısıyı absorbe eder. Bu faz geçişi sırasında sıcaklık sabit kaldığından, hücreler arası sıcaklık farklarının azaltılması ve termal homojenliğin sağlanması açısından önemli bir avantaj sunar. Böylece, yüksek şarj/deşarj oranlarında bile pil sıcaklığının etkin biçimde kontrol edilmesi mümkün olur [68].

Batarya termal yönetiminde kullanılan sistemler incelendiğinde, geleneksel hava soğutmalı sistemler düşük maliyetli ve yapısal olarak basit olmalarına rağmen, havanın düşük ısı iletkenliği nedeniyle yüksek ısı üretiminin söz konusu olduğu uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu durum hem sistem güvenliğini riske atmakta hem de performans kaybına yol açabilmektedir. Sıvı soğutmalı sistemler, daha yüksek ısı transfer katsayılarına sahip olmaları sayesinde daha etkili bir soğutma sağlayabilse de yapısal olarak daha karmaşık ve ağırdır. TES sistemleri, pil sıcaklığını hassas şekilde kontrol edebilme potansiyeline sahip olsalar da yüksek enerji tüketimi nedeniyle verimlilik açısından sınırlamalara sahiptir. Isıl boru tabanlı soğutma sistemlerinde ise, kullanılan hücre geometrisine uyum sağlama kabiliyeti önemli bir tasarım kısıtı olarak öne çıkmaktadır. Tüm bu yöntemlerle karşılaştırıldığında, FDM tabanlı sistemler, özellikle enerji tüketimi, yapısal sadelik ve termal dengeleme kabiliyetleriyle batarya termal yönetimi için dikkat çekici ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. FDM tabanlı BTYS'nin çalışma prensibi Şekil 11' de gösterilmiştir. Bu sistem, sırasıyla duyulur ısı transferi, gizli ısı emilimi ve yeniden duyulur ısı transferinden oluşan üç temel aşamada çalışmaktadır. İlk aşamada, batarya sıcaklığı düşük seviyelerdeyken, FDM sıcaklığı bataryadaki ısı

artışına paralel olarak yükselir ve bu süreçte ısı, FDM içerisinde duyulur ısı biçiminde depolanır. İkinci aşamada, FDM erime sıcaklığına ulaştığında, bataryadan yayılan ısı, faz değişimi yoluyla gizli ısı olarak emilir; bu sayede hem FDM' in hem de bataryanın sıcaklığı, faz geçiş sıcaklığı etrafında sabitlenir. Son aşamada ise, gizli ısının tamamen emilmesinden sonra batarya ve FDM sıcaklığı tekrar artar ve sistem yeniden duyulur ısı birikimi sürecine girer [69,70].

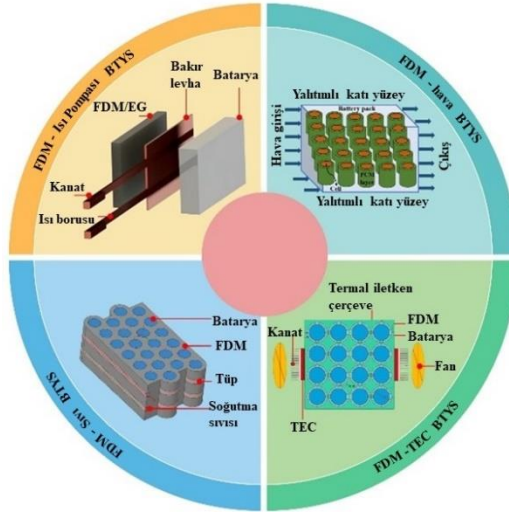


Şekil 11. FDM tabanlı BTYS mekanizması

Her bir FDM, sahip olduğu ısı özellikler, çalışma sıcaklığı aralığı ve kimyasal kararlılık düzeyine bağlı olarak belirli uygulama senaryolarına uygun şekilde seçilmelidir. Etkili bir batarya termal yönetimi için tercih edilecek FDM' nin, pilin çalışma sıcaklığı aralığıyla uyumlu bir faz değişim sıcaklığına sahip olması önemlidir. Ayrıca, yüksek gizli ısı kapasitesi sayesinde faz değişimi sırasında fazla miktarda ısıyı absorbe edebilmesi, büyük bir termal kapasite sunarak ısı enerjisiyi etkin şekilde depolayabilmesi ve yüksek termal iletkenlik özelliğiyle ısıyı hızlıca transfer edebilmesi beklenir. Bunun yanı sıra, seçilecek FDM' nin uzun vadede kimyasal kararlılığını koruyabilmesi ve tekrarlanan erime-donma döngülerine karşı dayanıklılık göstermesi, sistemin termal güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Tüm bu özellikler, FDM' nin pil sıcaklığını dengeleyerek performansın korunmasına ve güvenliğin artırılmasına katkı sağlamasını mümkün kılar.

2.2.3. Hibrit tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemi

BTYS' lerde yalnızca tek bir FDM kullanılması durumunda, FDM içinde biriken ısıнын zamanla etkili bir şekilde dağıtılamaması nedeniyle termal doyumluk meydana gelebilir. Bu durum, FDM' nin ısıyı emme kapasitesinin azalmasına ve sistemin soğutma performansının sınırlandırılmasına yol açar. Bu nedenle, FDM' nin Sıcaklık homojenliği sağlama avantajı, başka soğutma teknolojileriyle birleştirilerek sistemin genel verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. Bu tür hibrit yapılandırmalarda, FDM ile birlikte sıvı soğutma, hava soğutma veya ısı boruları gibi aktif ya da pasif soğutma yöntemlerinin entegrasyonu sayesinde hem yüksek soğutma kapasitesi hem de sıcaklık düzgünlüğü elde edilebilir. Yaygın olarak kullanılan FDM tabanlı hibrit BTYS örnekleri Şekil 12' de sunulmuştur [70].



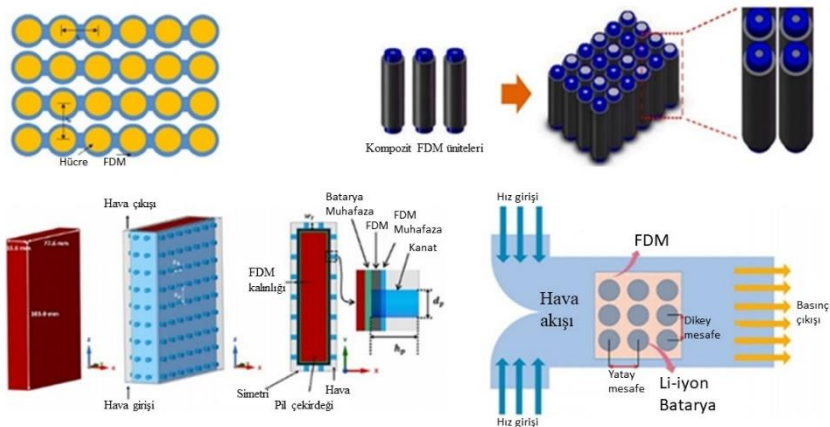
Şekil 12. FDM' ye dayalı Hibrit BTYS [70]

2.2.3.1. FDM/hava soğutma sistemi

Hava soğutma sistemi, basit yapısı, kolay bakım imkânı ve düşük maliyeti sayesinde batarya termal yönetiminde sıkça tercih edilmektedir. Ancak, havanın düşük ısı iletkenliği ile birlikte soğutma havasının akış alanında oluşan dengesizlikler, pil paketleri arasında belirgin sıcaklık farklarına neden olabilmektedir. Bu durum, pil paketlerinin verimliliğini ve hizmet ömrünü olumsuz etkileyerek, özellikle yüksek güç gerektiren çalışma koşulları veya zorlu çevresel ortamlarda hava soğutma sistemlerinin performansını sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda, FDM ile hava soğutma sisteminin birleştirilmesi, sıcaklık farklarını azaltarak daha homojen bir termal dağılım elde

edilmesine olanak tanımaktadır. Aktif hava soğutması, FDM' nin gizli ısını daha hızlı bir şekilde serbest bırakmasına yardımcı olarak, yüksek hızlı çalışma koşullarında FDM' nin ısı depolama kapasitesinin tükenmesi ve sıcaklık kontrol yeteneğinin azalması gibi riskleri azaltır.

Eşleştirilmiş FDM ve hava soğutma sistemlerinin optimizasyon çalışmaları, temel olarak sistem parametreleri ve yapısal tasarıma odaklanmaktadır. Yapısal açıdan değerlendirildiğinde, dikdörtgen modüller kullanıldığında modülün kenarına yakın konumlanan hücreler çevredeki ortamla daha kolay ısı alışverişini yapabilirken, modülün merkezindeki hücreler ısı birikimine daha yatkın hale gelmektedir. Bu bağlamda, Ravindra ve arkadaşları, Şekil 13(a)' da gösterildiği üzere, merkezdeki pil hücrelerinin çevre ortamla etkin ısı transferi gerçekleştirebilmesi için hücre yerleşimini optimize etmiş ve pil çevresinde kullanılan FDM kalınlığının 4 mm olması durumunda hem ısı dağılımının hem de yapısal hafifliğin dengeli bir şekilde sağlanabileceğini ileri sürmüştür. Buna ek olarak, Wu ve arkadaşları, silindirik pil hücrelerini boru şeklinde bir FDM katmanı ile sararak bir pil modülü tasarlamış ve bu yapıyı Şekil 13(b)' de sunmuştur. Bu yapılandırma, FDM ile çevredeki hava arasında daha geniş bir ısı transfer yüzeyi oluşturarak hava akışı için etkili bir kanal sağlamış, aynı zamanda kullanılan FDM miktarını %54 oranında azaltarak sistemin hem termal performansını hem de malzeme verimliliğini iyileştirmiştir. Bu örnekler, eşleştirilmiş FDM-hava soğutma sistemlerinde yapısal düzenlemelerin, ısı dağılımını homojenleştirme ve sistem ağırlığını azaltma açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir [70].

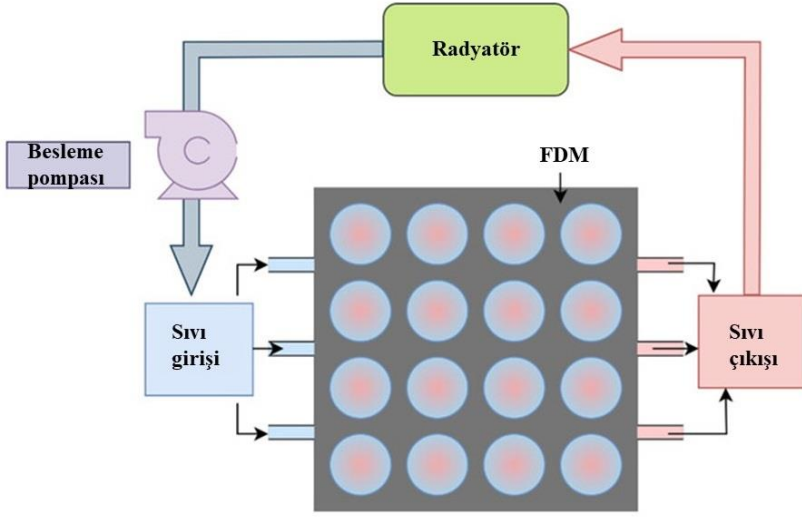


Şekil 13. (a) Değiştirilmiş FDM soğutmalı doğal havalandırmalı BTYS. (b) Tüp-Kompozit FDM modülü şematik diyagramı. (c) FDM-kanat-hava BTYS şematik diyagramları. (d) Hava kanalındaki pil ve FDM şeması.

Shakeel Ahmad ve arkadaşları, Şekil 13(c)' de gösterilen kanat-FDM-hava soğutmalı bir BTYS tasarlamış ve bu sistemde hem kanat sayısını hem de FDM kalınlığını optimize etmişlerdir. Araştırmalarında, FDM kalınlığının 1 mm olduğu durumda 3 mm çapında 162 dairesel kanat kullanmanın soğutma performansı ile enerji tüketimi arasında optimum denge sağladığını ortaya koymuşlardır. Parametre optimizasyonu kapsamında yapılan çalışmalar, hava akış hızı, giriş sıcaklığı, pil hücreleri arasındaki yatay ve dikey mesafe gibi etkenleri içermektedir. Zhang ve arkadaşları, Şekil 13(d)' deki hava geçiş yapısını kullanarak, pil dizilimindeki yatay ve dikey aralıkların soğutma etkinliğine etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, yatay ve dikey mesafenin artırılmasının, yüksek sıcaklıklarda FDM' nin faz geçiş oranını olumlu etkilediği; ancak dikey mesafenin fazla olması durumunda FDM ile hava arasındaki ısı transfer etkinliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular hem FDM geometrisinin hem de sistem parametrelerinin dikkatle tasarlanmasının, BTYS performansını iyileştirme açısından kritik rol oynadığını göstermektedir [70].

2.2.3.2. FDM/sıvı soğutma sistemi

FDM'ler, BTYS' de sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyici etkileri ve yüksek gizli ısı kapasiteleri nedeniyle hibrit soğutma stratejilerinde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu kapsamda, FDM' ler sıvı soğutma sistemleriyle entegre edilerek hem etkin ısı emilimi hem de ısının sistemden uzaklaştırılmasını mümkün kılan çift aşamalı bir soğutma yaklaşımı geliştirilmektedir. Bu hibrit sistemlerde FDM' ler, yüksek ısı üretiminin gerçekleştiği anlarda fazla ısıyı absorbe ederek termal bir tampon görevi görürken, sıvı soğutma sistemi ise bu ısıyı taşıyıcı akışkan aracılığıyla dış ortama ileterek dağıtır. Söz konusu ısı transferi, soğutucunun FDM ile entegre edilmiş ısı değiştiricilerden geçirilmesiyle sağlanmakta ve böylece sistem genelinde sıcaklık istikrarı korunmaktadır. Sıvı soğutma ile entegre edilmiş FDM sistemlerinin yapısı, Şekil 14' te şematik olarak sunulmaktadır [71].



Şekil 14. Sıvı soğutma ile entegre edilmiş FDM sistemi

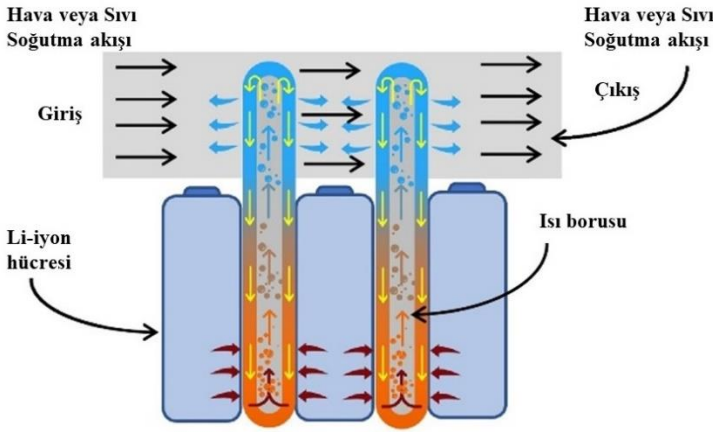
Bu tür hibrit sistemlerin yapısal entegrasyonu iki temel tasarım üzerinden gerçekleştirilmektedir. İlk yöntemde, FDM bloğunun çevresine sıvı soğutma plakaları yerleştirilir; bu sayede faz değişimi sırasında FDM tarafından absorbe edilen ısı, plakalar aracılığıyla dolaşan soğutucu sıvıya aktarılır ve sistemden uzaklaştırılır. İkinci yöntemde ise, sıvı soğutma boruları doğrudan FDM içerisine yerleştirilir. Bu yapı sayesinde borular içindeki soğutucu akışkan FDM içerisinde meydana gelen sıcaklık artışını doğrudan kontrol eder ve ısının daha hızlı taşınmasını mümkün kılar. Her iki tasarım da FDM' nin termal doygunluğa ulaşmasını geciktirerek sistemin soğutma performansını ve uzun süreli etkinliğini artırmaktadır.

Sıvı soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan su, etilen glikol ve aseton gibi soğutucular, havaya kıyasla daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir ve bu sayede daha etkili bir ısı uzaklaştırma performansı sergiler. Bu sistemler doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Doğrudan soğutma yöntemi, soğutucu sıvının doğrudan pil yüzeyiyle temas etmesini esas alırken, yüksek ısı transferine olanak tanısa da kısa devre riski ve elektrokimyasal korozyon gibi güvenlik tehditlerini de beraberinde getirir. Buna karşılık, dolaylı soğutma yöntemleri, bu tür riskleri minimize ederek FDM' lerle entegrasyon açısından daha güvenli bir yapı sunmaktadır [71].

2.2.3.3. FDM/Isı borusu Tabanlı Soğutma Sistemi

Isı borusu tabanlı hibrit BTYS' ler yüksek verimliliğe sahip bir termal kontrol çözümü olarak son yıllarda dikkat çekmektedir. Bu sistemler, şarj ve deşarj süreçlerinde ortaya çıkan ısıнын etkin şekilde yönetilmesi amacıyla, yüksek ısı iletim kabiliyetine sahip ısı borularının avantajlarını, çeşitli hibrit soğutma stratejileriyle birleştirmektedir.

Isı borularının sunduğu üstün termal iletkenlik ve hızlı ısı transferi özellikleri sayesinde, hibrit BTYS' ler pil modüllerinde optimal sıcaklık aralıklarını koruyarak hem termal kararlılığı artırmakta hem de sistemin genel performansını iyileştirmektedir. Bu sistemler, ısı borularının hava, sıvı ve FDM temelli geleneksel soğutma yöntemleriyle entegre edilmesiyle yapılandırılmaktadır. Konvansiyonel BTYS' lerle karşılaştırıldığında, ısı borusu tabanlı hibrit sistemler, pilin maksimum sıcaklığını önemli ölçüde azaltmakta ve sıcaklık dağılımındaki homojenliği artırmaktadır. Sıvı-FDM hibrit yapısına sahip bir BTYS' nin temel şematik gösterimi Şekil 15' te sunulmuştur [72].



Şekil 15. Isı borusu tabanlı hibrit BTYS' nin temel düzeni

Bu tür FDM/Isı Borusu hibrit soğutma sistemleri, özellikle yüksek enerji yoğunluklu batarya uygulamalarında sıcaklık kontrolü ve güvenlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

3. Gelecek Perspektifi ve Araştırma Yönelimleri

FDM'ler, BTYS'lerinde oldukça umut verici bir çözüm sunmakla birlikte, potansiyellerinin tam anlamıyla gerçekleştirilmesi için bazı teknik zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu zorlukların başında, pilin ideal çalışma sıcaklığıyla uyumlu bir faz geçiş sıcaklığına sahip uygun bir FDM tipi seçimi gelmektedir. Bu seçim, kullanılan pil kimyasının özellikleri, deşarj oranları ve oluşan sıcaklık profilleri hakkında derinlemesine bir bilgi birikimi gerektirir. Ayrıca, FDM'lerin sürekli sıcaklık döngülerine maruz kalması, zamanla malzemenin yapısal bozulmasına yol açabilir. Bu durum hem termal performansı hem de sistemin ömrünü olumsuz etkileyebilir ve bu bağlamda FDM'lerin kararlılığı ile uzun vadeli dayanıklılığı üzerine daha fazla araştırma yapılması gereklidir. Bununla birlikte, FDM ile pil hücrelerinde kullanılan malzemelerin kimyasal uyumluluğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrot malzemeleriyle olası kimyasal etkileşimlerin pil performansını ve güvenliğini tehlikeye atma riski nedeniyle, bu etkileşimlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi kritik öneme sahiptir. Geleceğe dönük olarak, FDM tabanlı BTYS'lerin elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi enerji depolama gereksinimi yüksek uygulamalarda yaygınlaşması beklenmektedir. Artan enerji talebi ve termal yönetimin güvenlik, verimlilik ve ürün ömrü üzerindeki belirleyici rolü göz önünde bulundurulduğunda, FDM teknolojilerinin daha da geliştirilmesi ve sistem entegrasyonunun iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Elektrikli araçlarda batarya termal yönetimi, sistem güvenliği, enerji verimliliği ve pil ömrünün korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, farklı soğutma sistemleri ve özellikle FDM tabanlı çözümler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar ve öneriler ortaya konmuştur:

- Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve düşük iç direnç gibi avantajlara sahip olmakla birlikte, termal dengesizliklere karşı oldukça hassastır. Hem yüksek hem de düşük sıcaklık koşulları, pil performansını ve güvenliğini olumsuz etkileyerek termal kaçak gibi riskleri artırmaktadır.
- Lityum-iyon bataryaların güvenli ve yüksek performanslı çalışması için, 15 °C ile 35 °C arasındaki sıcaklık aralığında tutulmaları gerekmektedir. Bu sınırların dışında kalan sıcaklık koşulları, batarya performansında düşüşe ve hücre ömründe kısalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, pil modülü içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanması kritik öneme sahiptir. Maksimum sıcaklık farkının 5 °C'yi aşmaması, termal dengesizlik

kaynaklı kapasite kayıplarının önlenmesi açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

- Termal yönetim ihtiyacı, yalnızca sıcaklık kontrolü sağlamakla sınırlı olmayıp; aynı zamanda hücreler arasında sıcaklık farklarının azaltılması, termal yaşlanmanın geciktirilmesi ve sistemin genel verimliliğinin artırılması açısından da kritik önemdedir.
- Aktif soğutma sistemleri (hava ve sıvı tabanlı), yüksek ısı transfer kapasitesi sunmakta; özellikle sıvı soğutma, homojen sıcaklık dağılımı ve yüksek enerji yoğunluklu uygulamalarda üstün performans sağlamaktadır. Ancak, yapısal karmaşıklık ve pompalama enerjisi ihtiyacı gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır.
- Hava ve sıvı soğutmalı sistemlerin karşılaştırılması sonucunda, sıvı bazlı soğutma sistemlerinin daha yüksek ısı transfer katsayılarına ve daha homojen sıcaklık dağılımına sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle yüksek enerji yoğunluklu uygulamalarda, sıvı soğutma pil sıcaklığını istenilen aralıkta tutmak açısından daha etkili bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır.
- Hava soğutmalı sistemler, düşük maliyet ve yapısal basitlik gibi avantajlara sahip olmakla birlikte, düşük ısıl iletkenlik nedeniyle yüksek sıcaklık gradyanlarına ve termal dengesizliklere yol açabilmektedir.
- Pasif soğutma sistemleri, düşük enerji tüketimi ve sade tasarımı sayesinde avantaj sağlarken, özellikle ısı boruları ve FDM ile bataryalarda sıcaklık dalgalanmalarını başarılı bir şekilde dengeleyebilmektedir. Ancak FDM'lerin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle tek başlarına yeterli performans gösterememesi önemli bir sınırlamadır.
- FDM'ler, gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde ani sıcaklık artışlarını absorbe ederek sıcaklık homojenliğinin sağlanmasında etkili olurken, düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle tek başlarına kullanıldıklarında uzun süreli soğutma performansı açısından yetersiz kalabilmektedir.
- Hibrit BTYS çözümleri, farklı soğutma teknolojilerinin sinerjik şekilde entegrasyonu ile geliştirilen sistemlerdir. FDM ile birlikte hava, sıvı veya ısı borusu destekli sistemler kullanılarak hem yüksek ısı emme hem de etkin ısı tahliye kabiliyeti elde edilmektedir. Bu yapılar, özellikle yüksek şarj/deşarj hızlarının ve dar sıcaklık toleranslarının olduğu uygulamalarda öne çıkmaktadır.
- FDM tabanlı hibrit BTYS, farklı soğutma teknolojilerinin avantajlarını birleştirerek hem sıcaklık sabitliği hem de yüksek ısı giderme kapasitesi açısından optimize çözümler sunmaktadır.

- FDM ve ısı boruları gibi pasif soğutma yöntemlerinin, harici enerji kaynağı gerektirmeden çalışabilmeleri ve yapısal sadelikleri nedeniyle enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağladığı gözlemlenmiştir.
- FDM-sıvı, FDM-hava, FDM-Isı borusu ve FDM-TES sistemleri, uygulama senaryolarına göre çeşitli yapısal ve termal avantajlar sağlamaktadır. Örneğin, FDM-sıvı sistemleri termal doygunluğu geciktirerek uzun süreli çalışma koşullarında kararlı sıcaklık dağılımı sunarken, FDM-TES sistemleri hassas sıcaklık kontrolü sağlamaktadır.
- Pil hücreleri arasında oluşan sıcaklık farklarının 5°C 'yi aşması halinde hem termal yaşlanma oranında artış hem de güç kapasitesinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu nedenle, sıcaklık homojenliğinin sağlanması yalnızca verimlilik açısından değil, aynı zamanda pil ömrü ve güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir.

Bu bulgular ışığında, uygun FDM seçiminin yapılmasında çalışma sıcaklığı aralığı, termal iletkenlik, kimyasal kararlılık ve sisteme entegrasyon kolaylığı gibi kriterlerin bir arada değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. FDM tabanlı BTYS' nin gelecekte elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi çeşitli alanlarda daha yaygın bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Ancak, bu sistemlerin uzun vadeli kimyasal ve yapısal kararlılıkları, malzeme uyumluluğu, tekrarlı döngü dayanımı ile üretim maliyeti gibi önemli konuların da detaylı biçimde araştırılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] P. Vanýsek, P. Bača, J. Zimáková, S. Vaculík, M. Bouška, In-situ AFM observations of the effect of addition of glass fibers and lignosulfonates on performance of the negative active mass of a lead-acid storage battery, *J. Energy Storage* 29 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101318>.
- [2] Y. Yang, S. Xu, Y. He, Lithium recycling and cathode material regeneration from acid leach liquor of spent lithium-ion battery via facile co-extraction and co-precipitation processes, *Waste Manag.* 64 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.018>.
- [3] Y. Zhang, H. Wu, S. Wang, H. Liao, C. Dai, Electrothermal Coupling Modeling and Electrothermal Dynamic Characteristics of Nickel-Cadmium Battery, in: *J. Phys. Conf. Ser.*, 2024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2706/1/012010>.
- [4] M. Meng, Y. He, Y. Zhang, H. Liao, C. Dai, State-of-Charge Estimation of Nickel-Cadmium Batteries Based on Dynamic Modeling of Electrical Characteristics and Adaptive Untrace Kalman Filtering, *Energies* 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16217291>.
- [5] V.T.R.P. Kumar M, S.D.D. V Ramana, U.B. Mulugu, V. Jyothi, P. NagaMani, P. Mounika, Evaluating Lithium-Ion and Nickel-Metal Hydride Batteries in EVs: A Data-Driven Machine Learning Approach, in: *2025 5th Int. Conf. Trends Mater. Sci. Inven. Mater., IEEE*, 2025: pp. 65–69. <https://doi.org/10.1109/ICTMIM65579.2025.10988363>.
- [6] K.S. Nivedhitha, N.R. Banapurmath, V.S. Yaliwal, M.A. Umarfarooq, A.M. Sajjan, R. Venkatesh, R.S. Hosmath, T. Beena, T.M. Yunus Khan, M.A. Kalam, M.E.M. Soudagar, Ü. Ağbulut, From nickel–metal hydride batteries to advanced engines: A comprehensive review of hydrogen’s role in the future energy landscape, *Int. J. Hydrogen Energy* 82 (2024) 1015–1038. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.271>.
- [7] X. Zhang, Z. Li, L. Luo, Y. Fan, Z. Du, A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles, *Energy* 238 (2022) 121652. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121652>.
- [8] F. Baronti, W. Zamboni, N. Femia, H. Rahimi-Eichi, R. Roncella, S. Rosi, R. Saletti, M.-Y. Chow, Parameter identification of Li-Po batteries in electric vehicles: A comparative study, in: *2013 IEEE Int. Symp. Ind. Electron., IEEE*, 2013: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2013.6563887>.
- [9] M. Jhariya, A.K. Dewangan, S.Q. Moinuddin, S. Kumar, A. Ahmad, A.K. Yadav, Research progress on efficient battery thermal management system (BTMs) for electric vehicles using composite phase change materials with liquid cooling and nanoadditives, *J. Therm. Anal. Calorim.* 149 (2024) 13653–13680. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13752-x>.
- [10] I. Dincer, H. S. Hamut, J. Nader, Thermal management of electric vehicle battery systems., John Wiley & Sons., 2016.
- [11] H. Budde-Meiwes, J. Drillkens, B. Lunz, J. Muennix, S. Rothgang, J. Kowal, D.U. Sauer, A review of current automotive battery technology and future prospects,

- Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 227 (2013) 761–776. <https://doi.org/10.1177/0954407013485567>.
- [12] Y. Song, B. Lu, X. Ji, J. Zhang, Diffusion Induced Stresses in Cylindrical Lithium-Ion Batteries: Analytical Solutions and Design Insights, *J. Electrochem. Soc.* 159 (2012) A2060–A2068. <https://doi.org/10.1149/2.079212jes>.
- [13] S. Kharabati, S. Saedodin, A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries, *J. Energy Storage* 75 (2024) 109586. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109586>.
- [14] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, Y. Yan, A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64 (2016) 106–128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.033>.
- [15] Y. Chen, Y. Kang, Y. Zhao, L. Wang, J. Liu, Y. Li, Z. Liang, X. He, X. Li, N. Tavajohi, B. Li, A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards, *J. Energy Chem.* 59 (2021) 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>.
- [16] J. Liu, H. Chen, S. Huang, Y. Jiao, M. Chen, Recent Progress and Prospects in Liquid Cooling Thermal Management System for Lithium-Ion Batteries, *Batteries* 9 (2023) 400. <https://doi.org/10.3390/batteries9080400>.
- [17] A.G. Olabi, H.M. Maghrabie, O.H.K. Adhari, E.T. Sayed, B.A.A. Yousef, T. Salameh, M. Kamil, M.A. Abdelkareem, Battery thermal management systems: Recent progress and challenges, *Int. J. Thermofluids* 15 (2022) 100171. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100171>.
- [18] K. Shah, D. Chalise, A. Jain, Experimental and theoretical analysis of a method to predict thermal runaway in Li-ion cells, *J. Power Sources* 330 (2016) 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.133>.
- [19] S. Ma, M. Jiang, P. Tao, C. Song, J. Wu, J. Wang, T. Deng, W. Shang, Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review, *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 28 (2018) 653–666. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>.
- [20] S. Goutam, J.-M. Timmermans, N. Omar, P. Bossche, J. Van Mierlo, Comparative Study of Surface Temperature Behavior of Commercial Li-Ion Pouch Cells of Different Chemistries and Capacities by Infrared Thermography, *Energies* 8 (2015) 8175–8192. <https://doi.org/10.3390/en8088175>.
- [21] T.I.C. Buidin, F. Mariasiu, Battery Thermal Management Systems: Current Status and Design Approach of Cooling Technologies, *Energies* 14 (2021) 4879. <https://doi.org/10.3390/en14164879>.
- [22] R. Zhao, J. Gu, J. Liu, An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries, *J. Power Sources* 273 (2015) 1089–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.007>.
- [23] A.A. Pesaran, Battery thermal models for hybrid vehicle simulations, *J. Power Sources* 110 (2002) 377–382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8).
- [24] J. Jaguemont, L. Boulon, Y. Dube, F. Martel, Thermal Management of a Hybrid

- Electric Vehicle in Cold Weather, *IEEE Trans. Energy Convers.* 31 (2016) 1110–1120. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2553700>.
- [25] X. Peng, S. Chen, A. Garg, N. Bao, B. Panda, A review of the estimation and heating methods for lithium-ion batteries pack at the cold environment, *Energy Sci. Eng.* 7 (2019) 645–662. <https://doi.org/10.1002/ese3.279>.
- [26] J. Jaguemont, N. Omar, M. Abdel-Monem, P. Van den Bossche, J. Van Mierlo, Fast-charging investigation on high-power and high-energy density pouch cells with 3D-thermal model development, *Appl. Therm. Eng.* 128 (2018) 1282–1296. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.068>.
- [27] J. Jaguemont, L. Boulon, Y. Dubé, A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures, *Appl. Energy* 164 (2016) 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>.
- [28] J. De Hoog, J. Jaguemont, M. Abdel-Monem, P. Van Den Bossche, J. Van Mierlo, N. Omar, Combining an Electrothermal and Impedance Aging Model to Investigate Thermal Degradation Caused by Fast Charging, *Energies* 11 (2018) 804. <https://doi.org/10.3390/en11040804>.
- [29] J. Kim, J. Oh, H. Lee, Review on battery thermal management system for electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 149 (2019) 192–212. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>.
- [30] A. Hammami, N. Raymond, M. Armand, Runaway risk of forming toxic compounds, *Nature* 424 (2003). <https://doi.org/10.1038/424635b>.
- [31] X. Han, L. Lu, Y. Zheng, X. Feng, Z. Li, J. Li, M. Ouyang, A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle, *ETransportation* 1 (2019) 100005. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>.
- [32] F. Larsson, B.-E. Mellander, Abuse by External Heating, Overcharge and Short Circuiting of Commercial Lithium-Ion Battery Cells, *J. Electrochem. Soc.* 161 (2014) A1611–A1617. <https://doi.org/10.1149/2.0311410jes>.
- [33] X. Feng, S. Zheng, D. Ren, X. He, L. Wang, H. Cui, X. Liu, C. Jin, F. Zhang, C. Xu, H. Hsu, S. Gao, T. Chen, Y. Li, T. Wang, H. Wang, M. Li, M. Ouyang, Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database, *Appl. Energy* 246 (2019) 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.009>.
- [34] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, *J. Power Sources* 226 (2013) 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>.
- [35] X. Feng, C. Xu, X. He, L. Wang, G. Zhang, M. Ouyang, Mechanisms for the evolution of cell variations within a LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂/graphite lithium-ion battery pack caused by temperature non-uniformity, *J. Clean. Prod.* 205 (2018) 447–462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.003>.
- [36] G.G. Njema, R.B.O. Ouma, J.K. Kibet, A Review on the Recent Advances in Battery Development and Energy Storage Technologies, *J. Renew. Energy* 2024 (2024) 1–35. <https://doi.org/10.1155/2024/2329261>.
- [37] X. Hu, F. Gao, Y. Xiao, D. Wang, Z. Gao, Z. Huang, S. Ren, N. Jiang, S. Wu,

Advancements in the safety of Lithium-Ion Battery: The Trigger, consequence and mitigation method of thermal runaway, *Chem. Eng. J.* 481 (2024) 148450. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148450>.

- [38] A. Rahmani, M. Dibaj, M. Akrami, Design and simulation of battery thermal management systems for electric vehicles using MATLAB Simulink, *J. Energy Storage* 111 (2025) 115398. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115398>.
- [39] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, H. Zhang, A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles, *J. Power Sources* 501 (2021) 230001. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230001>.
- [40] M. Muddasar, Optimization, Modelling and Analysis of Air-Cooled Battery Thermal Management System for Electric Vehicles, (2022). <https://doi.org/10.20944/preprints202201.0051.v1>.
- [41] G. Murali, G.S.N. Sravya, J. Jaya, V. Naga Vamsi, A review on hybrid thermal management of battery packs and it's cooling performance by enhanced PCM, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 150 (2021) 111513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111513>.
- [42] D.S. Jang, S. Yun, S.H. Hong, W. Cho, Y. Kim, Performance characteristics of a novel heat pipe-assisted liquid cooling system for the thermal management of lithium-ion batteries, *Energy Convers. Manag.* 251 (2022) 115001. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115001>.
- [43] F. He, H. Wang, L. Ma, Experimental demonstration of active thermal control of a battery module consisting of multiple Li-ion cells, *Int. J. Heat Mass Transf.* 91 (2015) 630–639. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.069>.
- [44] K. Chen, M. Song, W. Wei, S. Wang, Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement, *Energy* 145 (2018) 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.110>.
- [45] D.K. Sharma, A. Prabhakar, A review on air cooled and air centric hybrid thermal management techniques for Li-ion battery packs in electric vehicles, *J. Energy Storage* 41 (2021) 102885. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102885>.
- [46] R. Mahamud, C. Park, Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity, *J. Power Sources* 196 (2011) 5685–5696. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076>.
- [47] F. He, L. Ma, Thermal management of batteries employing active temperature control and reciprocating cooling flow, *Int. J. Heat Mass Transf.* 83 (2015) 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.079>.
- [48] S. Park, D. Jung, Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle, *J. Power Sources* 227 (2013) 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.039>.
- [49] G. Xia, L. Cao, G. Bi, A review on battery thermal management in electric vehicle application, *J. Power Sources* 367 (2017) 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046>.

- [50] J. E. S. Xu, Y. Deng, H. Zhu, W. Zuo, H. Wang, J. Chen, Q. Peng, Z. Zhang, Investigation on thermal performance and pressure loss of the fluid cold-plate used in thermal management system of the battery pack, *Appl. Therm. Eng.* 145 (2018) 552–568. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.048>.
- [51] L. Sheng, H. Zhang, L. Su, Z. Zhang, H. Zhang, K. Li, Y. Fang, W. Ye, Effect analysis on thermal profile management of a cylindrical lithium-ion battery utilizing a cellular liquid cooling jacket, *Energy* 220 (2021) 119725. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119725>.
- [52] C. Roe, X. Feng, G. White, R. Li, H. Wang, X. Rui, C. Li, F. Zhang, V. Null, M. Parkes, Y. Patel, Y. Wang, H. Wang, M. Ouyang, G. Offer, B. Wu, Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review, *J. Power Sources* 525 (2022) 231094. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094>.
- [53] M. Suresh Patil, J.-H. Seo, M.-Y. Lee, A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management, *Energy Convers. Manag.* 229 (2021) 113715. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113715>.
- [54] P. Dubey, G. Pulugundla, A.K. Srouji, Direct Comparison of Immersion and Cold-Plate Based Cooling for Automotive Li-Ion Battery Modules, *Energies* 14 (2021) 1259. <https://doi.org/10.3390/en14051259>.
- [55] Q. Ke, X. Li, J. Guo, W. Cao, Y. Wang, F. Jiang, The retarding effect of liquid-cooling thermal management on thermal runaway propagation in lithium-ion batteries, *J. Energy Storage* 48 (2022) 104063. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104063>.
- [56] Y. Huo, Z. Rao, X. Liu, J. Zhao, Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate, *Energy Convers. Manag.* 89 (2015) 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.015>.
- [57] H. Liu, Z. Wei, W. He, J. Zhao, Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review, *Energy Convers. Manag.* 150 (2017) 304–330. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016>.
- [58] H. Wang, T. Tao, J. Xu, H. Shi, X. Mei, P. Gou, Thermal performance of a liquid-immersed battery thermal management system for lithium-ion pouch batteries, *J. Energy Storage* 46 (2022) 103835. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103835>.
- [59] A. Kumar Thakur, R. Sathyamurthy, R. Velraj, R. Saidur, A.K. Pandey, Z. Ma, P. Singh, S.K. Hazra, S. Wafa Sharshir, R. Prabakaran, S.C. Kim, S. Panchal, H.M. Ali, A state-of-the art review on advancing battery thermal management systems for fast-charging, *Appl. Therm. Eng.* 226 (2023) 120303. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120303>.
- [60] J. Jaguemont, J. Van Mierlo, A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles, *J. Energy Storage* 31 (2020) 101551. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101551>.
- [61] S. Arora, Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies, *J. Power Sources* 400 (2018) 621–640. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020>.
- [62] S. Yang, C. Ling, Y. Fan, Y. Yang, X. Tan, H. Dong, A Review of Lithium-Ion

- Battery Thermal Management System Strategies and the Evaluate Criteria, *Int. J. Electrochem. Sci.* 14 (2019) 6077–6107. <https://doi.org/10.20964/2019.07.06>.
- [63] M. Khan, M. Swierczynski, S. Kær, Towards an Ultimate Battery Thermal Management System: A Review, *Batteries* 3 (2017) 9. <https://doi.org/10.3390/batteries3010009>.
- [64] A.M. Fathoni, N. Putra, T.M.I. Mahlia, A systematic review of battery thermal management systems based on heat pipes, *J. Energy Storage* 73 (2023) 109081. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109081>.
- [65] A.H. Alami, H.M. Maghrabie, M.A. Abdelkareem, E.T. Sayed, Z. Yasser, T. Salameh, S.M.A. Rahman, H. Rezk, A.G. Olabi, Potential applications of phase change materials for batteries' thermal management systems in electric vehicles, *J. Energy Storage* 54 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105204>.
- [66] S. Kılıçkap, E. El, C. Yıldız, Investigation of the effect on the efficiency of phase change material placed in solar collector tank, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 5 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.10.016>.
- [67] S. Kılıçkap Işık, E. El, Experimental investigation of distilled water production performance of conventional solar stills using $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ phase change material reinforced with $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and graphene-based nanoparticles, *Case Stud. Therm. Eng.* 62 (2024) 105184. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105184>.
- [68] M.M. El Idi, M. Karkri, M. Abdou Tankari, A passive thermal management system of Li-ion batteries using PCM composites: Experimental and numerical investigations, *Int. J. Heat Mass Transf.* 169 (2021) 120894. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120894>.
- [69] J. Li, Modeling and Simulation of Lithium-ion Power Battery Thermal Management, Springer Nature Singapore, Singapore, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-0844-6>.
- [70] S. Cai, X. Zhang, J. Ji, Recent advances in phase change materials-based battery thermal management systems for electric vehicles, *J. Energy Storage* 72 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108750>.
- [71] S. Rallabandi, R.V. Issac Selvaraj, Advancements in Battery Cooling Techniques for Enhanced Performance and Safety in Electric Vehicles: A Comprehensive Review, *Energy Technol.* 12 (2024). <https://doi.org/10.1002/ente.202301404>.
- [72] S. Vikram, S. Vashisht, D. Rakshit, M.P. Wan, Recent advancements and performance implications of hybrid battery thermal management systems for Electric Vehicles, *J. Energy Storage* 90 (2024) 111814. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111814>.
- [73] L. Jiang, H. Zhang, J. Li, P. Xia, Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling, *Energy* 188 (2019) 116048. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116048>.
- [74] G. Liao, K. Jiang, F. Zhang, J. E, L. Liu, J. Chen, E. Leng, Thermal performance of battery thermal management system coupled with phase change material and thermoelectric elements, *J. Energy Storage* 43 (2021) 103217. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103217>.

9. Bölüm

Betonarme Yapı Sistemlerinde Betonun Malzeme Özelliklerinin Yapısal Performansa Katkısının Değerlendirilmesi

Muhammed ÖZTEMEL¹

1.Giriş

Yapı mühendisliğinde depreme dayanıklılık, yalnızca taşıyıcı sistem geometrisinin veya donatı düzeninin değil, aynı zamanda kullanılan yapı malzemelerinin performansının da doğrudan bir fonksiyonudur. Bu noktada betonarme sistemlerin güvenliği, büyük oranda betonun mekanik özelliklerine ve malzeme davranışına bağlıdır. Zira beton, yapıların yük taşıma kapasitesini, süneklik özelliklerini ve enerji sönümleme yeteneğini belirleyen temel bileşendir. Günümüzde meydana gelen yıkıcı depremler, yapı hasarlarının çoğunlukla beton kalitesine ve bu malzemenin zorlanma altındaki davranışına bağlı olarak geliştiğini açıkça ortaya koymuştur (Sümer ve diğ., 2003; Koç, 2016). Bu gerçek, betonun sadece taşıyıcı bir unsur olarak değil, aynı zamanda bir performans belirleyici olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Betonun mekanik özellikleri, yalnızca statik yükler altında değil, tekrarlı ve dinamik etkiler altındaki davranışı bakımından da hayati önemdedir. Özellikle ani yüklemelerde, betonun çatlama eğilimi, süneklik kapasitesi ve dayanım-sönümleme dengesi, yapıların yıkıcı etkiler karşısındaki direnç seviyesini belirlemektedir. Oysa günümüzde sürdürülebilir ve performansa dayalı yapı tasarımı anlayışı, bu parametrelerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Yapı tasarımında performans odaklı yaklaşımın benimsenmesiyle birlikte, betonun sadece ilk yükleme altındaki dayanımı değil, uzun vadeli davranışı ve dayanımın nasıl tüketildiği de önem kazanmıştır. Betonun elastisite modülü, kırılma tokluğu, çekme davranışı ve sargı etkisi altındaki deformasyon kabiliyeti, taşıyıcı sistemlerin toplam rijitlik ve süneklik dengesini doğrudan belirlemektedir. Özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ya da kritik kesitlerde meydana gelen ani kırılmalar, çoğu zaman malzeme kaynaklı zayıflıkların sonucudur (Koç, 2016; Yüksel, 2008). Bu tür zayıflıkların önlenmesi için, betonun davranışına dair mühendislik düzeyinde doğru

¹ Öğr.Gör.; Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, muhammed.oztemel@giresun.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6530-0739

varsayımlar yapmak ve tasarıma bu gerçeklikleri dâhil etmek hayati önemdedir. Betonarme yapıların sismik performansı üzerine yapılan deneysel ve analitik çalışmalar da göstermektedir ki, malzeme parametreleri tasarım sürecinde ihmal edilemeyecek kadar etkilidir. Özellikle düşük dayanımlı veya üretim kalitesi yetersiz betonlar, deprem anında plastik mafsallıkların oluşumlarının kontrolsüz şekilde gelişmesine ve göçme mekanizmalarının hızla aktive olmasına neden olmaktadır (Maltaş, 2007). Bu durum, yapı güvenliğinin yalnızca geometri veya donatı miktarına değil, betonun gerçek davranışına da bağlı olduğunu net bir şekilde göstermektedir. Dolayısıyla yapı sistemlerinin güvenilirliğini sağlamak adına, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin detaylı biçimde anlaşılması ve yapı analizlerine entegre edilmesi gerekmektedir. Yüksek dayanımlı ve lif katkılı betonların, taşıyıcı sistemlerin kesme ve eğilme performansını geliştirmede önemli katkılar sağladığı da güncel araştırmalarda ortaya konmuştur. Zhang ve diğ. (2024), ultra yüksek dayanımlı betonla güçlendirilmiş sistemlerin yatay taşıma gücünde ve enerji tüketiminde ciddi artış sağladığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Ahmed ve diğ. (2024) ile Gerges ve diğ. (2023), UHPC ve HPFRC gibi yüksek performanslı betonlarla güçlendirilmiş kirişlerin süneklik ve yük taşıma kapasitelerinde anlamlı artışlar elde edildiğini ortaya koymuşlardır.

Bu kitap bölümü, yukarıda bahsedilen teknik ve bilimsel temeller çerçevesinde, betonarme yapı sistemlerinde betonun mekanik özelliklerinin ve malzeme davranışının yapısal performansa etkisini kapsamlı biçimde irdelemeyi amaçlamaktadır. Konu, yalnızca teorik değil; aynı zamanda deneysel bulgular, saha gözlemleri ve güncel mühendislik uygulamaları ışığında bütüncül bir yaklaşımla ele alınacaktır.

2. Betonun Mekanik Özellikleri

Beton, karmaşık iç yapısı ve çok fazlı bileşenleri nedeniyle, mekanik davranışı oldukça değişken olan bir yapı malzemesidir. Betonun taşıyıcı sistemlerde etkin bir şekilde kullanılabilmesi, onun mekanik özelliklerinin doğru anlaşılmasına ve tasarıma uygun şekilde değerlendirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda betonun en belirgin mekanik özellikleri arasında basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, süneklik ve çatlak kontrol kapasitesi yer almaktadır.

Basınç Dayanımı:

Betonun en yaygın bilinen ve kullanılan mekanik özelliği basınç dayanımıdır. Bu özellik, betonun yük taşıma kapasitesinin ilk göstergesi olup, tasarımda sınıf tayininde temel ölçüt olarak kullanılır. TS EN 206 standardına göre beton sınıfları genellikle 28 günlük silindirik veya küp basınç dayanımına göre belirlenir. Ancak

yüksek basınç dayanımı tek başına yeterli değildir; çünkü gevrek kırılma eğilimi gösteren betonlarda süneklik sınırlıdır (Zhang ve diğ., 2024).

Çekme Dayanımı ve Çatlak Davranışı:

Betonun çekme dayanımı, genellikle basınç dayanımının yaklaşık %10–15'i civarındadır. Bu düşük oran, çatlak oluşumuna karşı direncin sınırlı olduğunu göstermektedir. Çekme gerilmelerine karşı gösterdiği zayıf direnç nedeniyle betonarme sistemlerde donatı kullanımı zorunlu hale gelmiştir (Ahmed ve diğ. 2024). Ayrıca mikro çatlakların ilerlemesi, karbonatlaşma ve klor iyonu penetrasyonu gibi çevresel etkilerle birleştiğinde, betonun uzun vadeli dayanımında düşüş meydana gelebilir (Li, 2024).

Elastisite Modülü:

Betonun elastisite modülü, onun rijitliğini ve deformasyona karşı gösterdiği direnci ifade eder. Yüksek elastisite modülü, yapının daha rijit davranmasını sağlarken; düşük elastisite modülü, yapı üzerinde daha fazla deplasman oluşmasına neden olur. Bu parametre, hem servis yükleri hem de deprem yükleri altında taşıyıcı sistemin şekil değiştirme karakteristiğini doğrudan etkiler (Malas, 2007).

Süneklik:

Beton, doğal olarak gevrek bir malzeme olduğundan süneklik özelliği düşüktür. Ancak sargı donatısı, lif katkısı ve yüksek performanslı bağlayıcılar ile bu özellik geliştirilebilir. Özellikle yüksek süneklığe sahip betonlar, enerji sönümleme kapasitesi yüksek yapılar için tercih edilmektedir. Süneklik, deprem güvenliği açısından kritik bir parametredir; çünkü plastik mafsalları geciktirir ve ani göçmeleri önler (Gerges et al., 2023).

Enerji Sönümleme ve Tokluk:

Tokluk, betonun kırılmadan önce absorbe edebileceği enerji miktarını ifade eder. Yüksek tok değerine sahip betonlar, darbe ve deprem gibi ani yüklemelerde daha dayanıklı performans sergiler. Bu bağlamda UHPC ve HPFRC gibi özel beton türleri, klasik betona göre daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahiptir (Ahmed ve diğ., 2024).

Sonuç olarak, betonun yapısal sistem içerisindeki davranışını belirleyen mekanik parametreler, yapı güvenliğini ve servis performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle tasarım sürecinde yalnızca basınç dayanımı değil, betonun tüm mekanik özellikleri dikkate alınmalıdır.

3. Betonun Yapısal Performansa Etkisi Üzerine Yapılmış Araştırmalar

Betonun mekanik ve fiziksel özellikleri, betonarme yapı sistemlerinin genel performansını belirleyen en kritik etkenlerden biridir. Son yıllarda yürütülen çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma, özellikle deprem etkisi altındaki davranışlarda betonun rijitlik, süneklik, çatlak kontrolü ve enerji tüketme kapasitesi üzerindeki rolünü detaylı biçimde ortaya koymuştur. Zhang ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmada, çelikle takviye edilmiş ultra yüksek dayanımlı beton (SRUHSC) ile oluşturulan taşıyıcı sistemlerin deprem performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu sistemlerin yatay taşıma kapasitesi ve rijitlik bakımından yüksek performans sunduğunu, ancak süneklik açısından bazı sınırlamaların devam ettiğini göstermiştir. Gerges ve diğ. (2023), yüksek performanslı fiber takviyeli beton (HPFRC) ile güçlendirilmiş betonarme kirişler üzerinde yaptığı deneysel çalışmalarda, kesme dayanımında %50'ye kadar artış sağlandığını ortaya koymuştur. Ayrıca çatlak yayılımı daha kontrollü şekilde gelişmiş, yapının enerji tüketme kapasitesi artmıştır. Ahmed ve diğ. (2024), ultra yüksek performanslı beton (UHPC) katkısı kullanılarak güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasitesinde %120, kesme kapasitesinde ise %80'e kadar artış gözlemlendiğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra çatlak açılma momentinde de belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Koç ve diğ. (2016), Türkiye'de deprem sonrası ağır hasar gören betonarme binalarda yaptığı incelemelerde, düşük kaliteli betonun özellikle birleşim bölgelerinde ani göçmelere yol açtığını rapor etmiştir. Bu durum, beton kalitesinin yapısal güvenlikteki kritik rolünü vurgulamaktadır. Yüksel ve diğ. (2008), deprem sonrasında hasar görmüş yapılar üzerinde gerçekleştirdiği saha çalışmasında, düşük beton dayanımı nedeniyle meydana gelen gevrek kırılma davranışlarının yapısal bütünlüğü zayıflatıldığını belirtmiştir. Özellikle kolon uçlarında ve düğüm noktalarında ani hasarların yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Maltaş ve diğ. (2007), sayısal analiz yöntemiyle gerçekleştirdiği tez çalışmasında, düşük dayanımlı beton ve sargı donatısı eksikliğinin plastik mafsallı oluşumunu hızlandırdığını, bunun da yapı sünekliğini ve enerji tüketimini olumsuz etkilediğini göstermiştir. Sarıbyık ve diğ. (2003), Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra hasar gören binalarda yaptıkları saha incelemelerinde, beton dayanımının çoğunlukla C10 seviyesinin altında olduğunu tespit etmiştir. Bu durum, yetersiz beton kalitesinin hasarın şiddetini artıran temel bir unsur olduğunu ortaya koymuştur.

Depremler sonrasında ortaya çıkan hasarların önemli bir kısmı, betonun basınç dayanımı ve malzeme kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Işık ve diğ. (2024) tarafından 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapılan saha gözlemleri, yıkılan veya ağır hasar gören betonarme binaların çoğunda beton dayanımının yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle düşük kaliteli beton kullanımı, yetersiz malzeme denetimi ve işçilik hataları, taşıyıcı sistemlerin beklenen süneklik

kapasitesine ulaşmasını engellemiş, gevrek kırılmaların meydana gelmesine neden olmuştur. Zemin katlarda gözlenen zayıf kat göçmeleri, kısa kolon kırılmaları, büyük ölçüde betonun düşük basınç dayanımından kaynaklanmıştır. Donatı korozyonu ve yetersiz pas payı da beton–donatı aderansını zayıflatarak taşıma kapasitesinin azalmasına yol açmıştır. Ayrıca, perde duvar ve kolon uçlarında gözlenen kesme çatlakları, betonun gevrek davranışının bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, betonun dayanımının yalnızca basit bir malzeme parametresi olmadığını; aynı zamanda yapıların genel deprem performansını belirleyen en kritik faktörlerden biri olduğunu göstermektedir. Yetersiz dayanımlı betonun kullanıldığı yapılarda enerji yutma kapasitesi azalmakta, ani göçme riski artmakta ve yapısal bütünlük korunamamaktadır. Dolayısıyla, deprem bölgelerinde inşa edilecek betonarme yapılarda yüksek kaliteli beton kullanımı, dayanım sınıfının artırılması ve malzeme denetimlerinin titizlikle yapılması sürdürülebilir kentsel dayanıklılığın temel koşulları arasında yer almaktadır. Atar ve diğ. (2024) tarafından 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya ilinde yapılan saha çalışmaları, beton kalitesinin yapıların deprem performansında belirleyici rol oynadığını açıkça ortaya koymuştur. Türkiye’deki deprem yönetmeliklerinde yıllara göre asgari beton sınıfları artırılarak C25 seviyesine kadar çıkarılmış olmasına rağmen, bölgedeki birçok yapıda bu gerekliliklere uyulmadığı ve C16–C20’nin altında dayanım gösteren betonların yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Düşük dayanımın temel sebepleri arasında uygun olmayan agrega seçimi, imalat sırasında segregasyon oluşması, yetersiz pas payı bırakılması ve kür sürecinde denetim eksiklikleri yer almaktadır. Bu kusurlar, betonun basınç dayanımını düşürmüş, sünek davranış göstermesini engellemiş ve deprem sırasında gevrek kırılmalara, kesme çatlaklarına, kısa kolon etkisine ve yumuşak kat göçmelerine yol açmıştır. Sonuç olarak, Malatya’daki saha gözlemleri beton kalitesinin yalnızca malzeme dayanımı açısından değil, aynı zamanda yapısal bütünlüğün korunması ve enerji yutma kapasitesinin sağlanması açısından da kritik bir parametre olduğunu göstermiştir. Saha çalışmaları gösteriyor ki, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya ilinde ağır hasar gören betonarme yapıların büyük bir bölümünde temel sorun, kullanılan betonun düşük kalitesi ve yetersiz dayanımıdır. Deprem yönetmeliklerinin yıllar içerisinde beton sınıfı için getirdiği asgari koşullar C25 seviyesine kadar yükseltilmiş olmasına rağmen, bölgede yapılan incelemeler birçok yapının bu standartların altında kalan betonlarla inşa edildiğini ortaya koymuştur. Uygunsuz agrega kullanımı, imalat sırasında görülen segregasyon, pas payının yetersiz bırakılması ve kür sürecindeki denetim eksiklikleri, betonun dayanımını önemli ölçüde düşürmüş ve yapısal elemanların süneklik kapasitesini azaltmıştır. Bu durum, deprem sırasında kolon ve kirişlerde gevrek kırılmaların, kısa kolon etkisinin ve yumuşak kat göçmelerinin sıkça görülmesine neden olmuştur. Elde edilen

bulgular, beton kalitesinin yalnızca malzeme parametresi olarak değil, aynı zamanda deprem güvenliği ve yapısal bütünlük açısından kritik bir unsur olduğunu açıkça göstermektedir. Bu anlamda betonun dayanımı üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde yer alan bu araştırmalar, betonun basınç dayanımını etkileyen faktörlerin yalnızca karışım oranlarıyla sınırlı olmadığını; agrega özellikleri, su/çimento oranı, kür koşulları ve kullanılan katkı malzemelerinin de betonun performansında belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Özellikle mineral katkılar (uçucu kül, silis dumanı, cüruf) ve kimyasal katkılar aracılığıyla betonun mikro yapısının iyileştirilmesi, hem dayanımı hem de durabiliteyi artıran stratejiler olarak öne çıkmaktadır. Deprem mühendisliği açısından bakıldığında ise, betonun yalnızca yüksek dayanım göstermesi yeterli olmayıp aynı zamanda süneklik ve enerji yutma kapasitesinin de tatmin edici düzeyde olması gerekmektedir. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar, yüksek dayanımlı betonların yanı sıra lif katkılı veya modifiye edilmiş beton türleri üzerinde yoğunlaşmakta ve bu malzemelerin deprem yükleri altındaki davranışları ayrıntılı olarak incelenmektedir.

4.Sonuçlar

Betonarme yapıların güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü olması, doğrudan kullanılan betonun mekanik özelliklerine ve malzeme davranışına bağlıdır. Betonun basınç dayanımı, tasarım ve uygulama açısından en temel kriterlerden biri olsa da, tek başına yapısal performansı açıklamak için yeterli değildir. Araştırmalar betonun aynı zamanda çatlama direnci, elastisite modülü, süneklik kapasitesi ve enerji sönümleme özellikleri gibi parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu özellikler, deprem yükleri altındaki taşıyıcı elemanların hem rijitliğini hem de deformasyon kapasitesini belirlemekte, yapının ani göçmelere karşı direncini doğrudan etkilemektedir.

Son yıllarda yüksek performanslı beton türleri, özellikle Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC) ve Yüksek Performanslı Lifli Beton (HPFRC), mühendislik uygulamalarında daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerle yapılan deneysel çalışmalar, taşıyıcı elemanların rijitlik ve dayanımını önemli ölçüde artırmakta, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini sınırlandırmakta, dolayısıyla sismik performansa olumlu katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu tür malzemelerin bazı durumlarda süneklik kapasitesini sınırlayabileceği, yani yüksek dayanım ile süneklik arasında bir denge kurulması gerektiği vurgulanmaktadır. Yapısal tasarımda yalnızca dayanımı artırmak değil, aynı zamanda enerji yutma kapasitesini geliştirmek de esas alınmalıdır.

Deprem sonrası saha çalışmaları ise betonun kalitesi ve dayanımının gerçek davranış üzerindeki etkilerini doğrudan göstermektedir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapılan incelemeler, düşük dayanımlı ve

5.Kaynaklar

- Ahmed, F. B., Biswas, R. K., Sen, D., & Tasnim, S. (2024). Flexural and shear strengthening of reinforced-concrete beams with ultra-high-performance concrete (UHPC). *Construction Materials*, 4(2), 468–492. <https://doi.org/10.3390/constrmater4020025>
- Atar, M., İnce, O., Taş, Ö. F., Özmen, A., & Sayın, E. (2024). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Malatya İlinde Bulunan Betonarme Binaların ve Çelik Yapıların Hasar Durumlarının İncelenmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 6(1), 60–80. <https://doi.org/10.46464/tdad.1394039>
- Gerges, N., Issa, C. A., Sleiman, E., Najjar, M., & Kattouf, A. (2023). Experimental study of the shear behavior of RC beams strengthened with high-performance fiber-reinforced concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00582-8>
- Işık, E., Avcil, F., Hadzima-Nyarko, M., İzol, R., Büyüksaraç, A., Arkan, E., Radu, D., & Özcan, Z. (2024). Seismic performance and failure mechanisms of reinforced concrete structures subject to the earthquakes in Türkiye. *Sustainability*, 16(15), 6473. <https://doi.org/10.3390/su16156473>
- Koç, V. (2016). Deprem sonrası ağır hasarlı bina hasarlarının sınıflandırılması. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2(1), 46–65. <https://doi.org/10.21324/dacd.25533-157458>
- Maltaş, P. (2007). Mevcut betonarme binalarda beton karakteristik dayanımı ve sargı donatısının deprem performansına etkisi üzerine sayısal bir inceleme (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sümer, M., Sarıbıyık, M., Fırat, S., & Aydın, F. (2003). Depremde hasar görmüş yapıların beton kalitesinin incelenmesi. *Kocaeli Semineri Bildirisi*.
- Yüksel, İ. (2008). Betonarme binaların deprem sonrası acil hasar değerlendirmeleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1–2), 260–276.
- Zhang, J., Jiang, X., Jia, Z., Cao, M., & Jia, J. (2024). Seismic behavior of steel reinforced ultra-high strength concrete composite frame: Experimental and numerical study. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(43). <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00685-w>

10. Bölüm

Depreme Dayanıklı Betonarme Yapıların Tasarımında Perde Duvarların Taşıyıcı Sistem Davranışına Etkisi

Muhammed ÖZTEMEL¹

1.Giriş

Deprem etkilerine karşı yapıların güvenliğini sağlamak, mühendislik disiplini açısından hayati bir sorumluluktur. Özellikle Türkiye gibi aktif sismik bölgelerde, yapı tasarımının temel önceliği, depreme dayanıklı sistemlerin oluşturulmasıdır. Bu bağlamda, betonarme yapılarda taşıyıcı sistemin bir parçası olarak kullanılan perde duvarlar, yapının sismik performansını doğrudan etkileyen önemli elemanlardır. Perde duvarlar, yüksek kesme ve eğilme rijitliğine sahip olmaları sayesinde yatay yüklerin büyük bir kısmını taşıyarak yapıların yatay yer değiştirmelerini sınırlar ve burulma düzensizliklerini azaltır (Tozlu ve Gürsoy, 2024; Lam, 2024). Depreme dayanıklı yapı tasarımında yapının sünek davranış gösterebilmesi kadar, belirli düzeyde rijitliğe sahip olması da gereklidir. Yalnızca çerçeve sistemler üzerine kurulu yapılarda bu denge sağlanamayabilir; çünkü bu tür sistemler yeterli sünekliği sağlasa da yatay ötelenmelerin kontrolünde yetersiz kalabilir. Bu noktada, çerçeve sistemlere entegre edilen perde duvarlar sayesinde hem süneklik hem de rijitlik artırılarak yapıların performansı optimize edilebilir (Doğan ve diğ., 2022). Yapının burulma momentlerine maruz kalmaması için rijitlik merkezinin kütle merkeziyle çakışması hedeflenir ve bu da perde duvarların simetrik ve dengeli yerleşimi ile mümkün olur (Yaman ve diğ., 2019). Yüksek binalarda, yapı periyodu ile rijitlik arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Yapı yüksekliği arttıkça periyodun da artması, deprem sırasında rezonans etkisinin oluşma riskini artırır. Perde duvarlar, yapının doğal titreşim periyodunu düşürerek rezonans etkisinin önüne geçilmesine katkı sağlar (Tunç ve Al-Ageedi, 2020). Ancak perde oranının gereğinden fazla artırılması durumunda, sistem rijitliğinin aşırı artması sebebiyle yapıya etkileyen deprem kuvvetlerinde artış yaşanabilir. Bu nedenle perde kullanımında optimum oranların belirlenmesi, mühendislik tasarımında hem yapısal hem de ekonomik açıdan önemlidir (Sakcalı, 2019). Betonarme yapılarda perde oranı yalnızca yapının davranışına değil, aynı zamanda kullanım amacı ve kat yüksekliğine göre de farklılık göstermelidir. Örneğin okul, konut veya ofis tipi yapılarda kullanılacak perde

¹ Öğr.Gör.; Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, muhammed.oztemel@giresun.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6530-0739

oranlarının belirlenmesi, performansa dayalı tasarım yaklaşımıyla birlikte değerlendirilmelidir (Agrawal ve diğ., 2019; Efe ve Bedirhanoglu, 2024). Ayrıca, perde duvarların doğrusal olmayan davranışı dikkate alındığında, yerleşim şekli ve etkileşimde bulunduğu çerçeve sistemiyle uyumu da yapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir (Deepna ve diğ., 2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), perde kullanımına ilişkin sınır oranlar tanımlamakta ve özellikle yüksek binalarda perde kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bu durum, mühendislik uygulamalarında perde oranı, yerleşimi ve boyutlandırılması gibi konuların yalnızca yapısal değil, aynı zamanda yönetmeliksel düzeyde de optimize edilmesi gerekliliğini doğurur (Doğan ve diğ., 2022). Özetle, depreme dayanıklı yapı tasarımında perde duvarların yapısal performansa olan katkısı çok boyutludur. Yalnızca yük taşıyıcı olarak değil, sistemin genel davranışını belirleyen yönlendirici bir bileşen olarak değerlendirilmelidir. Bu kitap bölümünde, perde duvarların taşıyıcı sistem davranışına olan etkisi, bilimsel literatür ışığında sistematik olarak ele alınacak; optimum oran, yerleşim düzeni ve yapısal performans ilişkisi bütüncül bir yaklaşımla tartışılacaktır.

2. Perde Duvarların Yapısal Özellikleri ve Yatay Yüklere Karşı Davranışları

Perde duvarlar, yatay yüklerin etkin biçimde taşınması amacıyla betonarme yapılarda kullanılan, yüksek kesme dayanımı ve rijitliğe sahip düşey taşıyıcı elemanlardır.

Özellikle depreme maruz kalan yapılarda, yatay yüklerin önemli bir kısmının emilmesi ve yapının sünek davranış göstermesi bakımından kritik rol oynarlar. Çerçeve sistemlere kıyasla çok daha fazla yatay yük taşıyabilen perde duvarlar, hem kesme kuvvetlerinin hem de eğilme momentlerinin karşılanmasında yapısal güvenliğe katkı sağlar (Deepna ve diğ., 2018). Bu özellikleri sayesinde, özellikle yüksek katlı ve karmaşık geometrilere sahip yapılarda stabiliteyi artırmak için tercih edilirler. Perde duvarların yapısal etkinliği, büyük ölçüde geometrik oranlarına ve konumlandırılma stratejilerine bağlıdır. Özellikle yükseklik/genişlik oranı büyük olan ince perdelerde burkulma eğilimleri daha fazla olurken, daha kompakt kesitli perdeler rijitliği daha etkili bir şekilde sağlayabilir (Teddy ve Tumbelaka, 2025). Ayrıca, perde duvarların simetrik olarak yerleştirilmesi durumunda yapının burulma düzensizliği minimize edilir. Perdelerin yatay yüklere karşı davranışı, sadece kendi taşıma kapasiteleriyle sınırlı olmayıp, çerçeve sistemlerle olan etkileşimleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle perde-çerçeve etkileşimli sistemlerde yatay yüklerin yapı geneline dengeli dağıtılması sağlanmakta ve bu durum hem yapı sünekliğini hem de enerji sönmeme kapasitesini artırmaktadır (Garip ve diğ., 2017). Yapılan sayısal modelleme çalışmaları, perde duvarların eklendiği yapılarda kat öteleme miktarlarının ciddi oranda azaldığını ve göreceli kat ötelemelerinin %40'a

kadar düştüğünü ortaya koymaktadır (Elgohary ve diğ., 2025). Ayrıca perde duvarların yüksekliği, binanın toplam yüksekliğine oranla arttıkça sistemin genel periyodu düşmekte, bu da yapının dinamik davranışına olumlu yönde etki etmektedir. Yapı periyodunun azalması, rezonans riskini azaltırken, aynı zamanda daha kısa sürede salınım yapmasını sağlayarak yatay yükler altında daha kontrollü bir deformasyon profili sunar. Elgohary ve diğ. (2025) tarafından yapılan çalışmada, bağlı perde sistemlerinin yalnızca rijitlik değil aynı zamanda doğal frekans üzerindeki etkisinin de kritik olduğu vurgulanmıştır. Betonarme perde sistemlerinin yanı sıra son yıllarda çelik levha perdeler, kompozit sistemler ve çift perdeli sistemler de yatay yüklere karşı etkili çözümler olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler, geleneksel betonarme perde sistemlerine göre daha karmaşık hesap ve detaylandırma gerektirdiği için mühendislik uygulamalarında dikkatli analizler gerektirir (Deepna ve diğ., 2018). Tüm bu veriler ışığında perde duvarların, yatay yük taşıma kapasitesi, yapı rijitliği, burulma kontrolü ve enerji sönümleme gibi yönleriyle yapı performansını doğrudan etkileyen elemanlar olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle perde duvarların yapısal özelliklerinin doğru analiz edilmesi ve yapının tüm taşıyıcı sistemi ile bütünleşik olarak değerlendirilmesi, depreme dayanıklı yapı tasarımı temel bir gereklilik haline gelmiştir.

3. Perde Duvarların Sismik Performansa Etkisi: Deneysel ve Sayısal Bulgular Işığında Değerlendirme

Deprem etkisi altında yapıların performansı, taşıyıcı sistemin geometri, rijitlik ve süneklik gibi özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda perde duvarlar, özellikle betonarme yapıların yatay yük taşıma kapasitesini artıran ve sismik davranışını iyileştiren temel taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Perde duvarlar, yüksek rijitlikleri sayesinde yatay yer değiştirmeleri sınırlamakta, enerji sönümleme kapasitesini artırmakta ve sistemin sünekliğini koruyarak yapısal göçme riskini azaltmaktadır (Tozlu ve Gürsoy, 2024; Yaman ve diğ., 2019). Yapılan deneysel çalışmalar, perde duvarların çerçeve sistemlerle birlikte kullanıldığında, yatay yüklerin etkisi altındaki davranışı anlamlı düzeyde değiştirdiğini göstermektedir. Özellikle düşük rijitlikli çerçeve sistemlerde, perde duvarın eklenmesiyle birlikte maksimum yatay deplasman değerlerinde %30-50 arası azalma elde edildiği rapor edilmiştir (Elgohary ve diğ., 2025). Bu sonuçlar, perde duvarın sistem içerisindeki yerleşiminin de önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Burulma etkisinin azaltılması ve simetrik davranışın sağlanması açısından perdelerin merkezi veya köşelere simetrik yerleştirilmesi önerilmektedir (Lam, 2024; Agrawal ve diğ., 2019). Sayısal modelleme çalışmaları da bu bulguları desteklemektedir. Tunç ve Al-Ageedi (2020), orta ve yüksek katlı binalar üzerinde gerçekleştirdikleri parametrik çalışmalarda, perde alan oranının %1.5 ile %2.5 arasında tutulmasının optimum sonuçlar verdiğini

ve yapıların doğal periyotlarının önemli ölçüde düştüğünü tespit etmiştir. Benzer şekilde, Sakcalı (2019) tarafından yapılan analizlerde, perde duvar miktarının artırılmasının görece kat ötelemelerini azalttığı ve bina rijitliğini artırarak taşıyıcı sistemin sismik güvenliğini yükselttiği gösterilmiştir. Perde duvarların katkısı yalnızca rijitlik değil, aynı zamanda enerji sönümleme ve plastik mafsallı bölgelerinin kontrolü açısından da belirleyicidir. Özellikle bağ kırışlı perde sistemlerinin yüksek süneklik performansı sergilediği ve plastik şekil değiştirme kapasitelerinin çerçeve sistemlere göre daha dengeli dağıldığı belirlenmiştir (Elgohary ve diğ., 2025). Garip ve diğ. (2017) tarafından yapılan deneysel çalışma, perde bulunmayan sistemlerde meydana gelen yumuşak kat düzensizliğinin, perde eklenmesiyle ortadan kalktığını ve kritik kolon kesitlerinde zorlamaların azaldığını ortaya koymuştur. TBDY 2018 kapsamında, performansa dayalı tasarım yaklaşımı çerçevesinde perde duvarların önemi daha da artmıştır. Bu yönetmelik, sistemin yatay yük kapasitesinin artırılması, burulma etkisinin kontrol altına alınması ve süneklik seviyesinin yükseltilmesi için perde sistemlerinin minimum oranını ve geometrik koşullarını tanımlamaktadır (Yaman ve diğ., 2019; Ulutaş ve diğ., 2019). Özellikle okul gibi kullanım sonrası güvenliği kritik yapılarda, perde oranlarının %2'nin altına düşmemesi önerilmektedir (Ulutaş ve diğ., 2019). Literatürde yapılan çok sayıda çalışma, perde duvar sistemlerinin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde yapının performans parametrelerini olumlu etkilediğini göstermektedir. Tozlu ve Gürsoy (2024), doğrusal olmayan analizlerle perde sistemlerinin yapısal bütünlüğe katkı sağladığını ve kritik bölgelerde enerji yığılmalarını sınırladığını tespit etmiştir. Ayrıca, Lam (2024), perde yerleşiminin moment ve kesme kuvvetlerinin dağılımı üzerinde belirleyici olduğunu ve uygun yerleşimlerin taşıyıcı elemanları daha az zorladığını rapor etmiştir. Sonuç olarak, gerek deneysel gerekse sayısal bulgular ışığında, perde duvarların sismik performansa olan katkısı çok yönlüdür. Doğru oranda ve uygun konumda yerleştirilen perde duvarlar, yapının genel rijitliğini artırmakta, görece kat ötelemelerini azaltmakta, süneklik seviyesini yükseltmekte ve enerji yutma kapasitesini maksimize ederek sistemin hedeflenen performans düzeylerine ulaşmasını sağlamaktadır. Bu bulgular, perde duvarların sadece tamamlayıcı değil; yapının sismik güvenliği açısından vazgeçilmez bir taşıyıcı sistem unsuru olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4. TBDY 2018 Kapsamında Perde Duvar Kullanımına Yönelik Tasarım Esasları ve Uygulama Kriterleri

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018), deprem etkisi altında yapı güvenliğini artırmak amacıyla perde duvarların kullanımını hem taşıyıcı sistemin rijitliği hem de sünekliği bakımından detaylı biçimde tanımlamaktadır. Yönetmelik, özellikle yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde, yapıların deprem

performansını iyileştirmek için perde duvarların geometrik oranları, donatı düzenlemeleri ve konumlandırılmasına ilişkin teknik gereklilikler getirmiştir (TBDY, 2018).

4.1. Perde Tanımı ve Geometrik Gereklilikler

TBDY 2018’de perde elemanlar, düşey taşıyıcı sistemin bir parçası olarak tanımlanmakta olup, bu elemanların uzun kenarının kalınlığına oranı en az 6 olmak zorundadır. Bu oran, önceki yönetmeliklerde 7 olarak tanımlanmışken, 2018 yönetmeliğinde 6’ya düşürülerek daha esnek bir tanım yapılmıştır. Bununla birlikte, perdelerin kalınlığı, kat yüksekliğinin en fazla 1/16’sı olacak şekilde sınırlandırılmış ve minimum kalınlık 250 mm olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı sistemi yalnızca perde duvarlardan oluşan yapılarda ise bu sınır kat yüksekliğinin 1/20’si ve minimum 200 mm olarak tanımlanmıştır (TBDY, 2018).

4.2. Donatı Düzenlemeleri ve Detaylandırma Koşulları

Yönetmelikte, perde duvarların gövdesine yerleştirilecek donatılar için asgari donatı oranı %0.25 ($\rho = 0.0025$) olarak belirlenmiştir. Bu oran, bazı koşullarda %0.20’ye ($\rho = 0.002$) kadar indirilebilmektedir (TBDY, 2018). Ayrıca, perdelerin her iki yüzünde yer alacak donatı ağlarının, en az dört adet çirozla birbirine bağlanması zorunludur. Çiroz çapı, yatay donatı çapına eşit veya daha büyük olmalıdır ve bu bağlantılar her 500 mm’de bir yapılmalıdır (TBDY, 2018). Bu şartlar, deprem anında gövde donatılarının stabilitesini sağlayarak burkulma riskini azaltmayı hedeflemektedir.

4.3. Perde Duvar Miktarı ve Yerleşimi

Yönetmelik, perde duvarların yapının genel rijitliği ve burulma düzensizliğinin önlenmesindeki kritik rolüne vurgu yapmaktadır. Özellikle simetrik olmayan planlarda, perdelerin yapının kütle merkezine göre dengeli biçimde yerleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. TBDY 2018, perde kullanım oranlarına dair doğrudan bir minimum değer belirtmese de, mevcut literatürde önerilen %1.5–2.0 arası perde alanı oranları, yönetmeliğin performans hedeflerine ulaşmada etkili kabul edilmektedir (Tunç ve Al-Ageedi, 2020; Tozlu ve Gürsoy, 2024).

4.4. Performansa Dayalı Tasarım Yaklaşımı ile Uyum

TBDY 2018, performansa dayalı tasarımı teşvik eden bir yaklaşımla, perde duvarların sistemdeki etkisinin hem doğrusal hem doğrusal olmayan analizlerle değerlendirilmesini öngörmektedir. Bu kapsamda, yapıların ilk üç doğal titreşim modunun toplam kütle katılım oranının %90’ı aşması gerektiği belirtilmiş ve

burulma düzensizliğini azaltacak perde konfigürasyonlarının tercih edilmesi önerilmiştir (TBDY, 2018).

4.5. Uygulama Esasları ve Yapı Güvenliğine Katkı

Yönetmelikte ayrıca, perde duvarların temel bağlantıları, uç bölge detaylandırmaları ve bağ kirişli perde sistemleri ile ilgili özel koşullar da tanımlanmıştır. Özellikle bağ kirişli perdelerde, bağ kirişi boy/derinlik oranı ve donatı düzenlemeleri yapı sünekliğini doğrudan etkilemektedir.

5.Sonuçlar

Depreme dayanıklı yapı tasarımında perde duvarların rolü, günümüzde hem kuramsal hem de uygulamalı mühendislik çalışmalarında yapısal güvenliğin temel belirleyicilerinden biri olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen deneysel, sayısal ve yönetmelik tabanlı literatür verileri, perde duvarların betonarme yapılarda yatay yüklere karşı gösterdiği etkin performansı açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle, perde duvarların rijitlik, dayanım, enerji sönmüleme ve süneklik gibi parametreler üzerindeki olumlu etkisi, deprem anında yapı bütünlüğünün korunmasında kritik bir rol oynamaktadır. Sayısal analizler, farklı perde oranı, konumlandırma ve kesit detaylandırmalarının yapı performansı üzerindeki etkisini sistematik biçimde ortaya koymuş; optimum yerleşim senaryolarının simetrik ve merkezi perde dağılımlarıyla elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde, deneysel çalışmalar da gövde donatısı, bağ kirişi detayları ve uç bölge düzenlemelerinin, perdenin enerji sönmüleme kapasitesine olan katkısını doğrulamıştır. Literatürde yer alan çok sayıda parametrik analiz, %1.5–2.0 düzeyinde perde oranlarının orta ve yüksek katlı betonarme yapılarda performans hedeflerine ulaşmada yeterli olduğunu göstermektedir. TBDY 2018 kapsamında getirilen tanımlar, oranlar ve donatı koşulları ise uygulama yönünden önemli bir rehber sunmaktadır. Yönetmelik, perde duvarların yalnızca taşıyıcı eleman değil; aynı zamanda burulma düzensizliğini azaltıcı, yanal deplasmanları sınırlayıcı ve sünek davranışı destekleyici bir unsur olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu çerçevede, plandaki yerleşimden kesit detaylarına kadar tüm perde özelliklerinin yönetmeliğe uygun biçimde ele alınması, sismik güvenlik açısından zorunluluk arz etmektedir. Sonuç olarak, perde duvarların betonarme yapı tasarımındaki yeri; yalnızca mühendislik hesaplarının değil, aynı zamanda yapısal stratejilerin de merkezinde yer almaktadır. Bu çalışmada ulaşılan bulgular, uygun oran, konum, donatı ve detaylandırma ile tasarlanmış perdelerin, yapıların deprem performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

6.Kaynaklar

- Agrawal, V. V., Patel, J. R., & Patel, S. M. (2019). Optimum location of shear wall in RC building. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 6(4), 123–128.
- Deepna, U., Menon, A. S., & Balamurugan, S. (2018). A comparative study on shear wall concept in accordance to its seismic behavior. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.5), 182–187.
- Doğan, O., Genç, Y., & Odacıoğlu, O. G. (2022). Betonarme taşıyıcı sistemlerin depreme dayanıklı tasarımında uyumlu perde çerçeve davranışı için minimum perde oranının belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1561–1573. <https://doi.org/10.2339/politeknik.871889>
- Efe, Y., & Bedirhanoğlu, İ. (2024). Betonarme perde duvarların eğilme ve kesme etkilerine karşı güçlendirilmesi üzerine literatür değerlendirmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 15(3), 663–675. <https://doi.org/10.24012/dumf.1420105>
- Elgohary, H. A., Bazuhair, R. W., & Alhunami, H. (2025). Evaluation of the dynamic characteristics of coupled shear wall system under seismic loads. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(3), 22262–22268. <https://doi.org/10.48084/etasr.10411>
- Garip, Z. Ş., Eren, E., Erdem, F., & Bozdoğan, M. N. (2017). Deprem etkisindeki betonarme binalarda yumuşak kat düzensizliğine perde duvar etkisi. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES)*, 550–557.
- Lam, T.-Q.-K. (2024). The influence of the layout of shear walls on internal forces and horizontal displacements in an 18-story building. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8(3), 259–278. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i3.963>
- Sakcalı, G. B. (2019). Examination of shear wall ratio according to different parameters in RC buildings. In *Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ICEES)* (pp. 185–191). Ankara.
- Tozlu, T., & Gürsoy, Ö. (2024). Betonarme binalarda perde yerleşim konfigürasyonunun deprem performansına etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(1), 123–135. <https://doi.org/10.24012/dumf.1420105>
- Tunç, G., & Al-Ageedi, M. K. (2020). A parametric study of the optimum shear wall area for mid-to high-rise RC buildings. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 601–617. <https://doi.org/10.36306/konjes.666748>

- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018). (2018). Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Retrieved from <https://deprem.afad.gov.tr>
- Teddy, L., & Tumbelaka, H. H. (2025). A shear wall design study in an 8-story building. *Journal of Architectural Design and Urbanism*, 7(2), 61–69.
- Ulutaş, H., Dilmaç, H., Tekeli, H., & Demir, F. (2019). Okul binalarında bulunması gereken perde duvar oranı üzerine bir çalışma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen ve Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.29048/makufebed.500974>
- Yaman, S., Tekeli, H., & Demir, F. (2019). Betonarme binalarda perde yeri değişiminin bina performansına etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 194–204. <https://doi.org/10.31590/ejosat.528665>

11. Bölüm

Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Yaklaşımı (SUMP) Perspektifinden Kent İçi Yol Güvenliğine Dair Bir Analiz: İstanbul

Ebru ARIKAN ÖZTÜRK ¹, Nuray MARUL²

Giriş

Kentleşmenin hız kazandığı günümüz dünyasında, artan nüfus ve motorlu araç yoğunluğu, kentsel ulaşım sistemlerini ciddi biçimde zorlamakta; trafik sıkışıklığı, hava kirliliği, gürültü, karbon salınımı ve trafik kazaları gibi çok boyutlu sorunları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, geleneksel ulaşım politikalarının yerini çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan bütüncül ve entegre yaklaşımlara bırakması kaçınılmaz hale gelmiştir. Avrupa Komisyonu'nun stratejik yönlendirmesiyle gelişen Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı (SUMP) yaklaşımı, kent içi hareketliliği yalnızca teknik bir konu olarak değil; çevresel sürdürülebilirlik, toplumsal kapsayıcılık, ekonomik verimlilik ve yaşam kalitesi ekseninde ele alan stratejik bir çerçeve sunmaktadır.

SUMP yaklaşımının temel bileşenlerinden biri olan yol güvenliği, hem bireysel refah hem de toplumsal sağlık açısından kritik bir göstergedir. Yayalar, bisikletliler ve diğer kırılgan yol kullanıcılarının korunması, SUMP içinde ulaşım modlarının entegrasyonu, alan yönetimi, hız kontrolü ve altyapı düzenlemeleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, sürdürülebilir ulaşım politikalarının başarı düzeyi, yalnızca ulaşımın çevresel etkilerini azaltma kapasitesiyle değil, aynı zamanda yol kullanıcılarının can güvenliğini sağlama becerisiyle de ölçülmelidir. SUMP yaklaşımı, ulaşım politikalarını insan odaklı hale getirerek, yürünebilirlik, bisiklet kullanımı, toplu taşıma entegrasyonu ve erişilebilirliği teşvik ederken, yol güvenliğini de bu dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak ele alır. Özellikle kent içi yollarda meydana gelen trafik kazaları, hem can kaybına hem de ekonomik kayıplara yol açmakta; bu durum, sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli bir engel oluşturmaktadır.

¹ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, Elektrik Enerji Bölümü
ID:0000-0002-4971-2442

² Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Kazaların Çevresel Ve Teknik Araştırması Ana Bilim Dalı Tezli Yüksek Lisans
ID:0009-0007-7539-9158

Bu çalışma ile Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Yaklaşımı perspektifinden İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Ulaşım Planı'nın (SKUP) yol güvenliği açısından incelenmesi amaçlanmaktadır.

1. Metodoloji

Bu çalışmada, İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Ulaşım Planı (SKUP) çerçevesinde yol ve trafik güvenliğine ilişkin ortaya konulan yaklaşım ve stratejiler incelenmiştir. Bu bağlamda, kentin mevcut SUMP belgesinde yol güvenliğine nasıl yer verildiği, hedef ve alt hedef düzeyinde bu temaya nasıl yaklaşıldığı, öngörülen strateji ve uygulamaların kapsamı ve sürdürülebilir ulaşım vizyonu ile yol güvenliği arasındaki bütünleşme düzeyi analiz edilmiştir.

Çalışmada ayrıca yol güvenliğini etkileyen yapısal ve yönetsel bileşenler; özellikle kırılğan yol kullanıcılarının korunması, altyapı güvenliği, hız yönetimi, politika hedeflerinin varlığı, izleme ve değerlendirme sistematığı ile katılımcı süreçlerin düzeyi gibi kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde yalnızca plan belgeleri değil, aynı zamanda kentin mevcut ulaşım sistemleri, kentsel yapısı ve toplumsal bağlamı da dikkate alınmıştır.

Çalışmada, İstanbul SKUP kapsamında yer alan ve yol güvenliğine doğrudan ya da dolaylı katkı sunduğu değerlendirilen projelerin etki düzeylerinin belirlenmesinde, alanında uzman beş kişinin görüşüne başvurulmuştur. Değerlendirme süreci, her bir projenin SKUP'un ilgili stratejik amaçlarıyla ne ölçüde örtüştüğünü analiz etmeye yönelik olarak yapılandırılmıştır. Bu kapsamda, projelerin amaçlarla olan ilişkisi “düşük katkı”, “orta katkı” ve “yüksek katkı” olmak üzere üç düzeyde niteliksel olarak ölçeklendirilmiştir. Projelerin toplumsal kapsayıcılık ve eşitlik boyutları ise, İstanbul SKUP'un CETKap (Cinsiyet Eşitliği ve Toplumsal Kapsayıcılık) çerçevesi doğrultusunda “düşük”, “orta” ve “yüksek” düzeylerde nitel olarak değerlendirilmiştir. Öte yandan projelerin Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile uyum düzeyi, SKA göstergeleri doğrultusunda “orta”, “yüksek” ve “çok yüksek” olarak sınıflandırılmıştır. İstanbul SKUP'un genel performansı ve etki potansiyeli Çok Ölçütlü Analiz (ÇÖA) yöntemiyle sayısallaştırılarak 0 ile 100 arasında derecelendirilmiştir.

Çalışmada, İstanbul SKUP kapsamındaki üç farklı analiz aracı, projelerin etkilerini çok boyutlu olarak değerlendirmek amacıyla, her biri kendi içeriksel yapısı ve değerlendirme amacı doğrultusunda farklı ölçekleme sistemleriyle yapılandırılmıştır. Ölçeklerin belirlenmesinde, her göstergenin doğası, veri temeli ve yorumlama biçimi dikkate alınarak tercihler yapılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde hem sayısal karşılaştırmalara imkân tanınmakta, hem de projelerin sosyal etkileri daha bağlamsal, nitel ve derinlikli biçimde yansıtılabilmektedir.

2. İstanbul'da Hareketliliğin Mevcut Durumu

İstanbul, 5.712 km 'lik yüz ölçümüne sahip olmasının yanı sıra 2023 yılında 15,4 milyonluk nüfusu ile nüfus yoğunluğu bakımından Avrupa'nın birinci, dünyanın on üçüncü en kalabalık şehri durumundadır. İstanbul'da arazi kullanımı genellikle konut, ticaret ve ofis gibi işlevlerin iç içe geçtiği karma bir yapıdadır ve kentin genelinde parçalı bir arazi kullanım deseni söz konusudur. İstanbul'da yol ağı, kentleşmenin doğu-batı yönünde gelişmesi nedeniyle doğrusal bir yapı sergilemektedir. Doğru-batı aksında uzanan TEM Otoyolu ve D100 Karayolu, kentin iki ana ulaşım koridorunu oluşturur. Tarihi Kent Merkezi ve Merkezi İş Alanı (MİA) çevresinde ise yaklaşık 3–5 km aralıklarla yer alan yarım ring yollar bulunur. Radyal yollar; TEM ve D100'ün uzantıları ile Eski Edirne Yolu, Piyale Paşa Bulvarı, Büyükdere Caddesi ve Şile Yolu gibi arterleri içerir. Yüksek kapasiteli TEM ve D100, katlı kavşaklarla diğer yollarla bağlanan, çok şeritli ekspres yollardır (İUAP raporu 2011).

Üç boğaz köprüsü ve deniz tabanı altına inşa edilen Avrasya Tüneli ile iki kıtayı birbirine bağlamaktadır. Avrupa ve Asya yakalarına konumlanmış iki hava limanı, 28 gemi, 43 iskele, 21 deniz hattı ve 233 km raylı sistem ulaşımına sahip İstanbul gelişmiş ve çeşitli bir ulaşım alt yapısına sahiptir [1].

İstanbul'da toplu taşıma sistemleri; hafif raylı sistemler, metro, Marmaray, metrobüs, deniz ulaşımı, otobüs, minibüs taksi ve taksi dolmuşları oluşmaktadır. Hafif raylı sistemler; tramvay, nostaljik tramvay, föniküler, tarihi tüneller ve teleferik seçenekleri ile İstanbul'da ulaşım hizmeti sunmaktadır. Raylı sistemlerden metro sınıfına giren Marmaray hattı, iki kıtayı birbirine bağlayan tek raylı sistem olması özelliği ile Marmaray hattı raylı sistemler sınıfında özel bir yere sahiptir (İBB, 2022).

İstanbul genelinde 380,70 km. uzunluğunda kent içi raylı sistem işletmesi bulunmakta olup sistem içerisinde toplam 241,35 km. uzunluğundaki 18 hat ile her gün 3 milyonun üzerinde yolcuya hizmet verilmektedir [2].

Otobüs yolculukları idare bazlı olarak İETT, Özel Halk Otobüsü ve Otobüs A.Ş. olmak üzere ayrılmaktadır. İstanbul'da 2.704 otobüs ile 151 milyon km yol, 5.6 milyon sefer ve 357 milyon yolculuk yapılmaktadır. Metrobüs, kendine ayrılmış D100 karayolu üzerindeki yolu ile lastik tekerlekli sistemler arasında ön plana çıkmakta olup 702 adet metrobüs yılda 78 milyon km yol kat etmekte, 1.9 milyon sefer ile 287 milyon adet yolculuk gerçekleştirmektedir [3].

Deniz ulaşımında kullanılan araçlar ise deniz otobüsü, vapur ve deniz motoru olarak sıralanmaktadır (İBB, 2022).

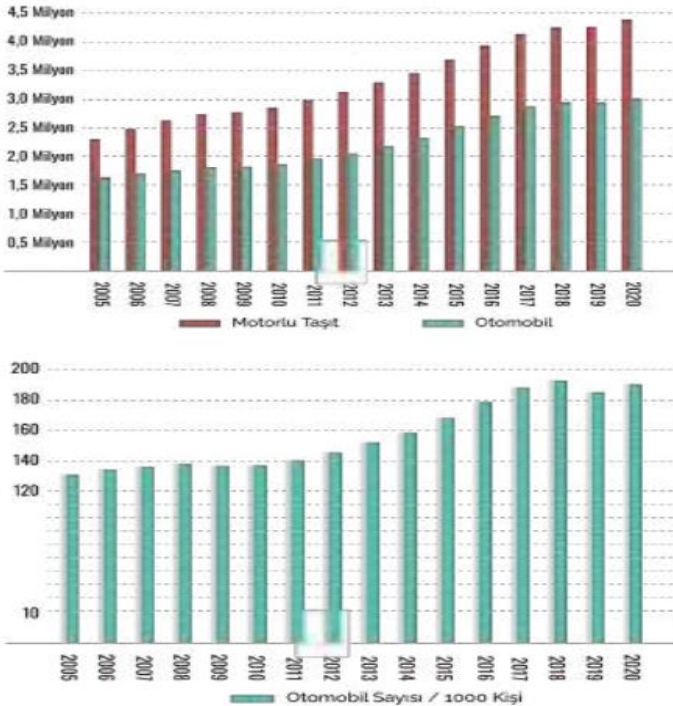
İstanbul'da kentsel hareketliliğin mevcut durumu göz önüne alındığından toplu taşımanın hâkimiyetini koruduğu görülürken, özel araç kullanımının azaltılmasında henüz ihtiyaç duyulan seviyelerin çok uzağında olduğu görülmektedir.

Sürdürülebilir hareketlilik açısından bisiklet, yaya ve mikromobilité araçlarının kent hayatı içerisindeki paylarının artırılması gerekliliği açıktır.

Şekil 2.1’de İstanbul’da toplam motorlu taşıt sayısı ile otomobil sayısının yıllara göre artış eğilimi görülmektedir. Grafik, her iki kategori için de belirgin ve düzenli bir artış trendi ortaya koymakta olup 2005 yılında motorlu taşıt sayısı yaklaşık 2 milyon civarındayken, 2020 yılına gelindiğinde bu sayının 4 milyonun üzerine çıktığı anlaşılmaktadır. Benzer şekilde otomobil sayısı da aynı dönemde yaklaşık 1.3 milyon seviyesinden 3 milyon seviyesine yaklaşmıştır. Bu durum, İstanbul’da motorlu taşıt parkının son 15 yılda iki katından fazla arttığını ve bu artışın özellikle otomobil kaynaklı olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.1’de yer alan ikinci grafikte ise 2005–2020 yılları arasında 1000 kişi başına düşen otomobil sayısı gösterilmektedir. Bu oran 2005’te 125 civarındayken, 2020’de 180’i aşmıştır. Bu da kişi başına düşen otomobil sahipliğinin yaklaşık %45 oranında arttığını göstermektedir. Bu artış, İstanbul’da yalnızca araç sayısının değil, otomobil erişiminin de toplum genelinde yaygınlaştığını da ortaya koymaktadır. Diğer bir ifadeyle, otomobilin hem bireysel hem de kültürel anlamda daha merkezî bir ulaşım aracı haline geldiği söylenebilir.

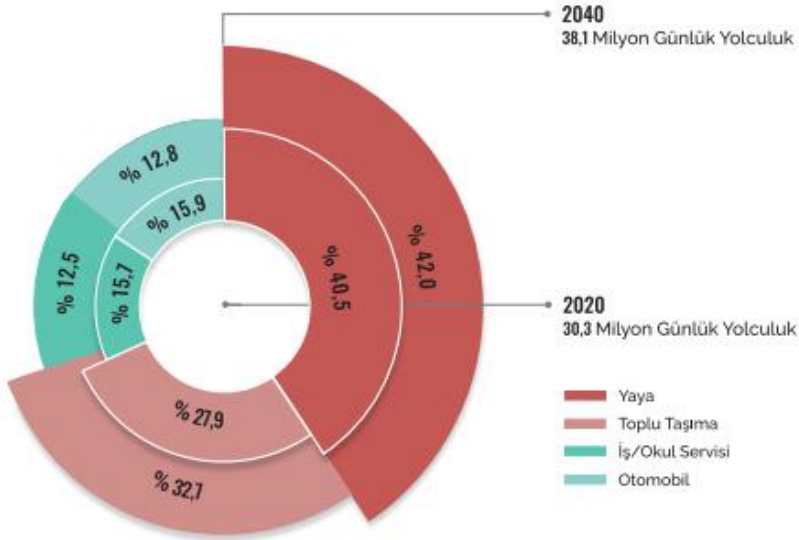
Şekil 2.1: İstanbul’da 1000 Kişi Başına Otomobil Sahipliği
2005-2020 (ARUP, 2022)



2.1. İstanbul'da Hareketliliğin Türel Dağılımı

İstanbul SKUP çalışmaları kapsamında geleceğe ilişkin yolculuk taleplerinin öngörülebilmesi amacıyla genellikle makro düzeyde değerlendirme olanağı tanıyan stratejik seviyede bir model olan İstanbul Ulaşım Modeli (İUM) tercih edilmiştir. İUM'un temelde İstanbul SKUP kapsamında önerilen ve 2040 yılına kadar tamamlanması planlanan raylı sistem projelerinin değerlendirilmesi için gerekli çıktıları sağlamış olduğu görülse de düşük salım bölgesi, tıkanıklık fiyatlandırması, otobüs şeritleri ve otopark politika düzenlemeleri gibi projelerin etkilerini değerlendirmede uygun bulunmamış, daha ayrıntılı mikro modelleme araçlarına ihtiyaç duyulacağı anlaşılmıştır. İUM'a dayalı öngörüler, 2020 yılında 30,3 milyon olan günlük yolculuk sayısının 2040 yılında 38 milyonu aşacağını, böylelikle İstanbul'da gün içinde 7,7 milyon daha fazla yolculuk yapılacağını ortaya koymaktadır (İstanbul SKHP, ARUP, 2022).

Şekil 2.2: İstanbul'da Günlük Yolculukların Türel Dağılım Oranları 2020-2040, (İstanbul SKHP, ARUP, 2022)



2.2. Aktif Ulaşım Türleri ve Mikro Hareketlilik

Kentsel hareketliliğe yeni bir yaklaşım sunan paylaşımlı hareketlilik sistemleri ise kent içi trafiğin rahatlatılmasında alternatif çözümler olmasının yanı sıra Kentsel Hareketliliğe de yeni bir soluk getirmişlerdir. Saatlik hızı 45 km'yi aşmayan bisiklet, kayak, elektrikli skuter gibi mini araçlardan oluşan mikromobilité çözümleri kısa mesafe seyahatlerinde tercih edilerek özel araç

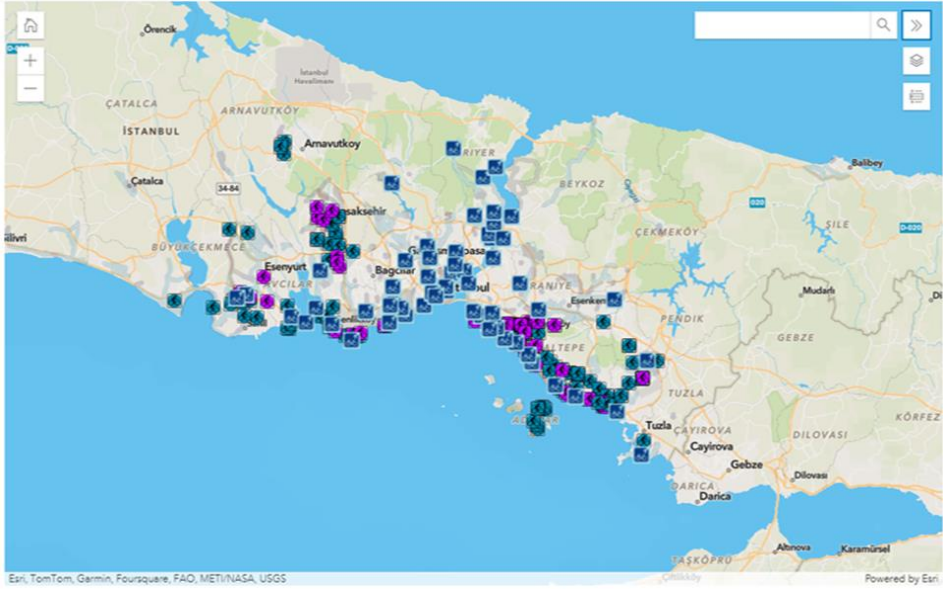
kullanımını azaltmakta, karbon salınımının azalmasına katkıda bulunmakta ve sürdürülebilir ulaşım türlerine geçişi kolaylaştırmaktadır (Karahan, Kurtuluş ve Garagon, 2023).

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Ulaşım Koordinasyon Merkezi (UKOME) tarafından 2024 yılında yapılan açıklamaya göre kent sınırları içinde elektrikli skuter işletmeciliği yapmak isteyen firmalara 34 bin 783 elektrikli skuter için izin verilmiştir [4]. Aktif ulaşım türlerine yönelik düzenlemelere atfedilen önemin gün geçtikçe artması, İBB Ulaşım Planlama Şube Müdürlüğü bünyesinde yaya ve bisiklet ulaşımına yönelik politika ve projelerden sorumlu Yaya ve Bisiklet Şeflikleri 'nin kurulmasının önünü açmıştır.

İstanbul'un topoğrafik zorluklarına rağmen, yoğun ve karma arazi kullanımı ile kısa sokak uzunlukları gibi faktörler yürüme olanaklarını desteklemektedir. Ancak, düşük altyapı standartları, sokak kalabalığı ve kaldırımların işgali gibi sorunların yürümeyi güvenli ve keyifli olmaktan çıkardığı görülmektedir. İstanbul'da yürüyerek yapılan yolculukların oranı yüksek (%40), ancak kenti, yayalara sunduğu olanaklar bakımından yürünebilir bir şehir olarak değerlendirmek güçtür. İstanbul'da yaya yolculuklarını teşvik etmek ve yaya dostu bir kent yaratmak için sistematik ve kapsamlı bir yaklaşıma ihtiyaç duyulduğu gerçektir. Bu doğrultuda, İBB Ulaşım Planlama Şube Müdürlüğü tarafından bir Yaya Ulaşım Ana Planı geliştirilmiştir.

İstanbul'da bisiklet daha çok spor ve rekreasyon amaçlı kullanılmakta olup, ulaşım aracı olarak yaygın konumda değildir. 2021 yılı itibarıyla 374 km bisiklet yoluna (Resim 1.1) sahip olan kentte bisikletin, toplu taşıma ile entegre edilmesi ilk ve son kilometre yolculuklarında daha fazla rol oynamasına olanak tanıyacaktır. İstanbul'da bütüncül ve güvenli bir bisiklet ağı ile yeterli bisiklet park alanları gibi temel eksiklikler mevcut olup elektrikli bisiklet ve skuter gibi mikro hareketlilik araçları giderek yaygınlaşmakta ve şehir içi ulaşımında önemli bir yer edinmektedir (İstanbul SKHP, ARUP, 2022).

Resim 1.1: Ayrılmış Bisiklet Yolları
(<https://bisiklet.ibb.istanbul/haritalar/istanbul-bisiklet-haritasi>)



3. İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Ulaşım Planı (SKUP)

Kentlerin Sanayi Devriminden bu yana hızlı bir şekilde büyümesi, gelişmesi ve ekonomik faaliyetlerinin odağında yer almaları nedeniyle kontrolsüz gelişme, genişleme ve nüfus artışının doğurduğu yeni toplumsal ve yönetsel sorunları beraberinde getirmiştir.

Türkiye’de kentleşme daha çok kırdan kente insan hareketliliği ile ilerlemiş olup 50’li yıllarla beraber sanayi kentlerinde ivmelendiği görülmüş, göçle ortaya çıkan ekonomik gelişmeler, kentlerde yeni iş alanları oluşturmuş ve bu faktörlerle cazibesi artan kentler kırsal nüfusun çözülmesini hızlandırmıştır. Göçlerle artan nüfus baskısı, kentleşmenin çarpıklaşmasını ve gecekondulaşmayı beraberinde getirmiştir. Göç ile şekillenen yeni yaşam alanlarının eğitim, sağlık, ulaşım ve altyapı imkânlarından yoksunluğu bağlantılı olarak birçok sorunu gündeme getirmiştir (Ayaz, 2023).

Ortadoğu ile Avrupa’nın coğrafi kesişim noktasında yer alan İstanbul, belediye sınırları içerisindeki yaklaşık 16 milyonluk nüfusuyla Avrupa’nın en kalabalık kentidir. 5.500 km² yüz ölçümü ile İstanbul, dünyanın en hızlı büyüyen mega kentlerinden biri olup bu hızlı büyümenin sonuçlarından biri olarak karşılanması gereken günlük yaklaşık 30 milyon yolculuk talebi ile yüz yüze gelmektedir. Bu talep ve kent ölçeğinin büyüklüğü, hareketlilik altyapısı üzerinde ciddi bir baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle, ulaşım ağı uzunluğu son yıllarda

önemli ölçüde artmış ve 25.000 km'ye ulaşmıştır (UMAM Roadmap Report, 2020).

1950'li yıllarla birlikte tarımda makineleşmenin giderek yaygınlaşması kırsal kesimlerde işsizliği arttırırken, İstanbul'da sanayileşmenin hız kazanmasıyla Anadolu ve Trakya kırsalından büyük miktarda göç almasına neden olmuştur. Bu göçlerle birlikte başlayan gecekondulaşma süreci İstanbul'da yerleşim alanlarında kontrolsüz bir yayılmaya sebep olmuştur (Doğan, K ve Doğan M, 2020). İstanbul'daki kontrolsüz kentleşme trafik yoğunluğunu arttırmış, yol güvenliğini olumsuz etkilemiş ve ulaşım sistemlerini zorlamıştır. Çözüme yönelik olarak geleneksel planlama yaklaşımlarından insanı ve çevreyi merkeze alan sürdürülebilir planlama yaklaşımlarına yönelim, toplu taşıma yatırımları ve akıllı trafik yönetim sistemlerinin inşası ve kullanımı elzem hale gelmiştir.

2018 yılında Birleşmiş Milletler (BM) Habitat ve Birleşik Krallık Hükümeti FCDO (Dışişleri ve Kalkınma Ofisi) ile İstanbul, Ankara ve Bursa Büyükşehir Belediyelerinin katılım sağladığı bir dizi çalıştay düzenlenmiştir. Çalıştaylarda Birleşik Krallık Hükümeti'nin "Küresel Geleceğin Şehirleri Programı" kapsamında sağlayacağı potansiyel maddi kaynak imkânlarının görüşülmesiyle gündeme gelen İstanbul için bir Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı (SUMP) hazırlanması konusu tarafların mutabık kalmasının ardından, Eylül 2019'da eyleme geçmiştir (İstanbul SHKP, ARUP, 2022). Geniş bir paydaş grubu ile kentin gelecekte karşılaşılabileceği çeşitli belirsizlikler de göz önünde bulundurularak ortaya konmuş olan vizyon ile: "Sürdürülebilir ve dayanıklı bir gelecek için İstanbul'un eşsiz coğrafyası ve tarihi değerleriyle uyumlu, güvenli, entegre, erişilebilir ve ödenebilir hareketlilik seçeneklerinden oluşan karma bir yapı sunan, insan ve çevre odaklı, yenilikçi ve kapsayıcı bir ulaşım sistemi." vurgusu öne çıkmaktadır.

Ulaştırma Bakanlığı tarafından 18.08.2022 tarihli resmi yazı ile Avrupa Birliği tarafından "Sustainable Urban Mobility Plan" olarak ifade edilen ve "SUMP" olarak kısaltılan; ülkemizde ise farklı kurumlarca farklı çevirilerinin ve kısaltmalarının kullanıldığı, yönetiminden ve izlenmesinden sorumlu oldukları Ulaştırma Sektörel Operasyonel Programı (USOP) kapsamında da birçok Büyükşehir'de uygulanması için finansman sağlanan mezkur planların Türkiye Belediyeler Birliği'nce de önerildiği şekilde "Sürdürülebilir Kentsel Ulaşım Planı" olarak adlandırılması ve "SKUP" kısaltmasının kullanılması uygun bulunmuş, bahse konu kısaltmanın tüm AB finansmanlı projelerde kullanılmasının terminolojide yeknesaklık sağlanması bakımından önem arz ettiği belirtilmiştir. Bu kapsamda çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yerel örneklerle ilişkin başlık ve içeriklerde "SKUP" kısaltması kullanılacaktır.

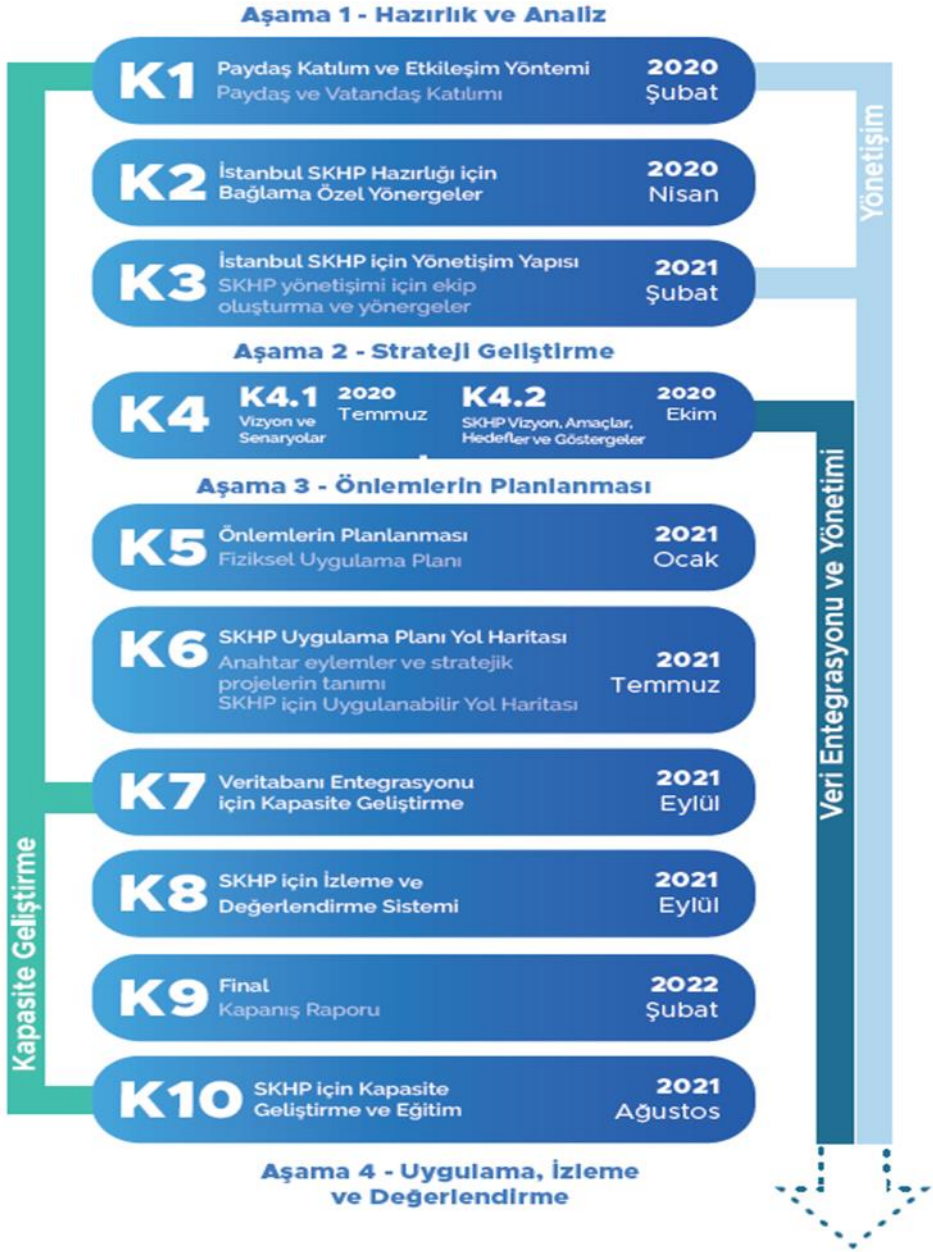
Nüfus bakımından Avrupa'da birinci, dünyada ise on üçüncü en kalabalık şehir olan İstanbul, Türkiye’de uygulamaya alınan ilk SUMP’a sahip olmasının yanı sıra dünya çapında yüksek nüfus yoğunluklu bir megakent için yürütülen ilk sürdürülebilir kentsel hareketlilik planına da sahip olmuştur. Planlama ve uygulama süreçlerine vatandaş ve paydaşların etkin katılımlarını sağlayan, yetersiz temsil edilen grupları incelemek suretiyle tüm kesimlerin hareketlilik gereksinimlerini dikkate almasının yanı sıra; otomobil bağımlılığı, karbon salımı, hava ve gürültü kirliliği ve trafik kazaları gibi değişkenlerin olumsuz etkilerini azaltmayı hedefleyen ulaşım politikaları merkeze alınmaktadır. İstanbul’un 2050 yılına kadar karbon nötr ve iklim dirençli bir şehir olmasını desteklemeyi amaçlamayan planın temel hedefleri şunlardır:

1. Erişilebilir, ödenebilir, entegre ve kapsayıcı bir ulaşım sistemine sahip olmak.
2. Çevresel olarak sürdürülebilir bir ulaşım sistemine sahip olmak.
3. Ekonomik olarak sürdürülebilir ve dayanıklı bir ulaşım sistemine sahip olmak.
4. Ulaşım ve yolculukların emniyetini ve güvenliğini artırmak.
5. Trafik hacimlerini, sıklık ve otomobil bağımlılığını azaltmak.
6. Toplu taşımaya geçişi teşvik etmek.
7. Aktif türlere geçişi teşvik etmek (yürüyüş ve bisiklet).
8. Kompakt ve çok merkezli gelişmeyi destekleyen bir ulaşım sistemine sahip olmak.
9. En az düzeyde olumsuz etkiye sahip verimli bir kentsel lojistik sistemine sahip olmak

(İstanbul SHKP, ARUP, 2022).

3.1. İstanbul SKUP Planlama ve Uygulama Döngüsü

İstanbul SKUP Planlama ve Uygulama Döngüsü aşamaları şu başlıklar altında ele alınmıştır (Resim 1.2).



Resim 1.2. SKUP İstanbul uygulama döngüsü (İstanbul SKHP, ARUP, 2022)

Hazırlık ve Analiz

Hazırlık ve analiz aşamasında kurumsal kaynakların yanısıra yerel planlamaya ilişkin koşullar değerlendirilmiş, SKUP'a yönelik yürütücü bir organın tesisi ve disiplinler arası işbirliğini teşvik amacıyla, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) bünyesinde bir SKUP ekibi oluşturulmuştur. İstanbul'da mevcut hareketliliğin analizi engeller, farklılıklar, sorunlar ve fırsatlar olmak üzere kapsamlı bir paydaş katılımı ve iletişim stratejisi ile ele alınmıştır. Yetersiz temsil edilen grupların belirlenmesi ve bu grupların kentsel hayata katılımlarını sınırlayan İstanbul'un ulaşım sisteminden kaynaklı etmenleri tespit etmek ve anlamak için ayrıca bir sosyal kapsayıcılık analizi yapılmıştır (İstanbul SKHP, ARUP, 2022).

Strateji Geliştirme

Strateji geliştirme aşamasında öncelikle belirlenmiş olan stratejilerin coğrafi alana uygunluğu gözetilmiş ve yalnızca kentsel idari sınırlarla daraltılmaması için, İstanbul SKUP'un fonksiyonel alanının belirlenmesine odaklanılmıştır.

Paydaş katılımına ilişkin süreçte, İstanbul'da “Küresel Geleceğin Şehirleri Programı” tarafından belirlenen yetersiz temsil edilen grupların (kadınlar, yaşlılar, çocuklar/gençler, düşük gelirli gruplar/işsiz nüfus, engelliler, etnik azınlıklar, mülteciler ve yabancılar/turistler) tamamının temsil edilmesi sağlanmıştır. Strateji geliştirilmesini takiben Sivil Toplum Kuruluşları (STK), ticari işletmeler, meslek odaları, uzmanlar ve İBB Ekibi'nin sunduğu katkılarla SKUP'un vizyon ve amaçlarının geliştirilmesine odaklanılmıştır. İstanbul'da kentsel büyüme ve gelişmenin getirebileceği mevcut ve potansiyel zorluklar ve sorunlara ilişkin beş farklı senaryonun yanısıra SKUP amaçlarının değerlendirilmesinde başvurulmak üzere göstergeler tanımlanmıştır (İstanbul SKHP, ARUP, 2022).

Önlemlerin Planlanması

Bu safhada, İstanbul SKUP'un hedeflerini gerçekleştirmeye odaklanan politika önlemleri ortaya konulurken proje alanlarının ve ana projelerin belirlenmesine imkân tanınmıştır. Politika önlemleri belirlenirken toplumsal kapsayıcılık ve cinsiyet eşitliği odağında iyileştirmeler gözden geçirilerek bir kısa liste ve önlem paketi oluşturulmuştur. Kısa listede yer alan önlemlerden İstanbul SKUP'un projeleri belirlenerek bu projelere yönelik izleme ve değerlendirme çerçevesi geliştirilmiştir.

Uygulama, İzleme ve Değerlendirme

İstanbul SKUP'un uygulamaya konmasıyla işlerlik kazanacak süreçte SUMP Yönetişim Planı kapsamında tanımlanan sorumlulukların, İBB'nin ilgili birimlerince üstlenilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. İzleme süreciyle, SKUP'a ilişkin uygulama ve performansın düzenli olarak takibi, uygulama döneminde plana etki edebilecek fırsat ve zorlukların ön görülmesine imkân yaratılması planlanmıştır. Yine bu aşamada yürürlüğe konulan SKUP'un toplumsal kapsayıcılık ve cinsiyet eşitliği gibi etmenleri yaklaşım olarak ne derece dikkate alındığının değerlendirilmesi ve güncelleme gereksinimi olup olmadığının incelenmesine yüksek önem atfedilmiştir (İstanbul SKHP, ARUP, 2022).

SKUP uygulama ve hazırlama rehberine sadık kalınarak yürütülen çalışmalarda Covid-19 pandemi kısıtlamaları nedeniyle *“açık ve ölçülebilir amaç ve hedefler, uzun vadeli vizyon ve net bir uygulama planı, mevcut ve gelecekteki performansın değerlendirilmesi”* aşamalarından oluşan ilk üç adımda değişikliğe gidilmek durumunda kalınmıştır.

3.2. İstanbul SKUP'ta Cinsiyet Eşitliği ve Toplumsal Kapsayıcılık Yaklaşımı

İstanbul SKUP ile ulaşım planlamasında sosyal adalet ve eşitlik ilkelerini merkeze alan öncü bir uygulama örneği sunulmakta olup plan kapsamında geliştirilen Cinsiyet Eşitliği ve Toplumsal Kapsayıcılık (CETKap) yaklaşımı ile sadece teknik düzenlemelerle sınırlı kalınmayıp, İstanbul'da yaşayan kırılgan grupların hareketlilik deneyimleri de doğrudan dikkate alınmaktadır.

SKUP sürecinde temsiliyeti yetersiz gruplar genişletilerek 17 farklı toplumsal grup planlama sürecine dahil edilmiştir. Planın her aşamasında bu grupların hareketlilik ihtiyaçları dikkate alınmış; katılımcı bir anlayışla tüm süreçlerle temsilde adaletin sağlanmasına odaklanılmıştır. SKUP kapsamında, projelerin sosyal, çevresel, ekonomik ve yönetişimsel etkilerini ölçmeye yönelik bir CETKap değerlendirme çerçevesi geliştirilmiş ve 26 ana projenin bu çerçevede çok ölçütlü analizi yapılmıştır.

İstanbul SKUP, cinsiyet eşitliği ve toplumsal kapsayıcılığı teknik planlama süreçlerinin ötesine taşıyarak, hareketlilik sisteminde yapısal adaletin tesisinde bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. İstanbul SKUP, bu yönüyle yerel ve uluslararası düzeyde örnek alınabilecek bir model ortaya koymaktadır (İstanbul SKHP, ARUP, 2022).

4. İstanbul SKUP Perspektifinden Yol Güvenliği

Türkiye'nin uygulamaya konulan ilk sürdürülebilir kentsel hareketlilik planı olan ve 16 milyonluk bir şehir için dünya çapında uygulanan ilk örneklerden biri olan İstanbul SKUP kapsamında "yol güvenliği" ve ilişkili konulara teorik anlamda doğrudan değinilmemekte olup daha çok trafik kazalarının azaltılması ve yol güvenliğinin artırılmasına yönelik çeşitli projeler ve politikalara yer verildiği görülmektedir.

Kentteki hareketliliğin mevcut durumunun 2040 yılına kadar bir öngörü ile ortaya konduğu planda yol güvenliğinin ciddi bir sorun olduğu belirtilirken karayollarında seyreden ağır taşıtların yoğunluğu, karbon salınımları ve hava kirliliğinin yanında, ciddi yol güvenliği sorunlarına neden olduklarının altı çizilmektedir. Özellikle, inşaat malzemelerinin kent içindeki dolaşımından kaynaklı sorunlara ilişkin olarak; güvenli, çevre dostu, düşük maliyetli ve akıllı çözümlerin üretilmesi zorunluluğuna vurgu yapılmaktadır. Yol güvenliğini genel olarak iklim değişikliği ve hava kirliliği kavramlarıyla birlikte ele alan plan yol güvenliği özelinde son yıllarda yapılan tüm iyileştirme çalışmalarına rağmen, İstanbul'da kaza sayılarının yüksekliğine işaret etmekte, TÜİK verileri ışığında İstanbul'un Türkiye'de en çok ölümlü/yaralanmalı karayolu trafik kazası gerçekleşen kent olduğunu ortaya koymaktadır.

Plan 'da İstanbul genelinde karbon salınımını artıran, hava kalitesini düşüren ve yol güvenliğini riske eden önemli faktörlerden birinin de kamyon trafiği olduğu belirtilmektedir. İnşaata yönelik faaliyetlerin sektörel ağırlığı ve İstanbul'da farklı ölçeklerde, büyük kentsel dönüşüm projeleri ve inşaatların sürdürülmekte oluşu, İstanbul'daki inşaat tedarik zinciri ve malzeme nakliye lojistiğine ilişkin konularda güvenli, çevreci ve maliyet etkin, akıllı çözümlere ihtiyaç duyulduğunun altı çizilmektedir.

SKUP İstanbul vizyonunu gerçekleştirmek ve hedeflere ulaşmak için ayrıntılı bir eylem planı ortaya konmuş, çalıştaylar ve katılımcılığa ilişkin faaliyetlerden faydalanılarak 59 politika önlemi ve 8 önlem paketi, 26 ana proje 3 ortak tema belirlenmiştir. İstanbul'un ulaşım ağlarını çevre dostu bir yapıya dönüştürmeyi ve sürdürülebilir, aktif ve sağlıklı yaşam tarzlarını teşvik etmeyi hedefleyen “Tema 1: Düşük Karbona Geçiş”, esasen düşük karbon salımına yönelik dönüşüm politikaları ile aktif hareketliliği destekleyen önlemler temel alınarak oluşturulmuştur. “Tema 2: Kesintisiz Aktarma ve Entegrasyon” başlığı altında ise, herkes için erişilebilir, entegre, kapsayıcı, güvenli ve konforlu bir ulaşım sistemine geçişi teşvik etmeye yönelik politikalar yer almakta; bu tema, özellikle aktarma merkezleri ile farklı ulaşım türlerinin entegrasyonuna odaklanan politika araçlarını esas almaktadır. Öte yandan, bireysel araç kullanımını azaltmayı ve yolculuk talebini yönetmeyi amaçlayan “Tema 3: Trafik Tıkanıklığının

Azaltılması”, otomobilden bağımsız yaşam tarzlarını destekleyen, kentsel lojistik süreçlerini ve trafik akışını iyileştirmeye yönelik politika önlemleri çerçevesinde şekillendirilmiştir. Plan kapsamında önerilen 26 ana proje Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1.1 SKUP İstanbul Projeleri (İstanbul SKUP, ARUP, 2022)

Niceliksel Olarak Değerlendirilenler	Niteliksel Olarak Değerlendirilenler
Raylı Sistem Ağının Genişletilmesi	Tıkanıklık Fiyatlandırması
Düşük Salım Bölgeleri	İstanbulkart’ın Minibüsleri de Kapsayacak Şekilde Genişletilmesi
Toplu Taşıma Otobüs Filosunun Karbonsuzlaştırılması	İstanbul Ağ Yönetimi Kontrol Merkezi (İAYKM)
Metrobüsün Karbonsuzlaştırılması	Mahalle Sakinlerinin Otopark İzni Planı
Otopark Düzenlemelerinin Bütüncül bir Yaklaşımla Ele Alınması	Otomatik (Otopark) Ödeme Sistemlerinin Uygulanması
Otobüs Şeritleri	Otopark Yaptırımlarının Yeniden Organizasyonu
Besleyici Bisiklet Güzergâhları	Minibüslerin Besleyici Güzergâha Dönüştürülmesi: Arnavutköy ilçesi
Otobüs Hizmetleri İyileştirme Programı	Deniz Ulaşımının Geliştirilmesi, Filonun Yenilenmesi
	Transfer Merkezleri Sistemlerinin Oluşturulması-Yaygınlaştırılması
	Trafik Sakinleştirme
	Yaya Güzergâhları
	Yayalar ve Bisikletliler için Kavşak İyileştirmeleri
	Gerçek Zamanlı Yolcu Bilgisi ve Açık Verinin Genişletilmesi
	Kurumsal Hareketlilik Yönetiminin Uygulanması
	İnşaat Malzemeleri Konsolidasyon Merkezleri (İKM)
	Park Et Devam Et Alanları
	Elektrikli Bisikletler ve Elektrikli Skuterler
	Mahalle Hareketlilik Hizmet Merkezleri

İstanbul SKUP'un amaçlarına hangi ölçüde ulaşabildiğini ölçebilmek ve seçilen temel gösterge ve hedef yılı (2040) bazlı değerleri planın dokuz temel amacı kapsamında ortaya koyan çalışmada yol güvenliğine ilişkin olarak; "Ulaşım ve yolculukların emniyetini ve güvenliğini artırmak", "Trafik hacimlerini, sıklıkını ve otomobil bağımlılığını azaltmak", "Toplu taşımaya geçişi teşvik etmek", "Aktif türlere (yürüyüş ve bisiklet) geçişi teşvik etmek" başlıklı 4. 5. 6 ve 7. amaçlar öne çıkmaktadır. İlgili amaçlar ve bunlara bağlı göstergeler ile mevcut durum ve 2040 hedefleri Çizelge 1.2'de görülmektedir.

Çizelge 1.2. Kent İçi Yol Güvenliği Açısından "SKUP İstanbul" hedeflerinin Değerlendirilmesi

Amaç	Gösterge	Mevcut Durum	2040 Hedefi	Değerlendirme
Amaç 4: Ulaşım ve yolculukların emniyetini ve güvenliğini artırmak	-Kişi başına ölüm -Kişi başına ciddi yaralanma sayısı	- Yüz binde 2,3 (2019) - Binde 1,4 (2019)	- Merkez bölgelerde sıfır ölüm Ana arterlerde ölümlerde %60 azalma -Yaralanmalarda %70 azalma	Global <i>Vision Zero</i> stratejileriyle uyumlu olan bu hedef, İstanbul gibi yoğun bir metropol için iddialı ancak gereklidir. Başarı için fiziksel altyapının yanı sıra hız yönetimi, yaya önceliği, dijital hız denetimi, akıllı kavşaklar ve genel hız limiti reformları gereklidir.
Amaç 5: Trafik hacimlerini, sıklıkını ve otomobil bağımlılığını azaltmak	-Karayolu trafiğinde yoğun olmayan saatlere kıyasla yoğun saatlerdeki gecikmeler (özel araç trafiği) -Seçilmiş 10 koridorda, yoğun saatlerde, araç trafiği yoğunluğunun ağırlıklı ortalaması -Seçilmiş 10 merkezi alanda, cadde üstü ve cadde dışı araç otopark alanlarındaki toplam azalma	- 1,37 - 7.811 taşıt/saat -N/A	- %15 azalma - %40 azalma - Cadde üstü ve cadde dışı otoparkların %80'inin kaldırılması	Otopark arzının kısıtlanması etkili bir yöntem olsa da, İstanbul'da düşük emisyon bölgeleri ve tıkanıklık fiyatlandırması gibi tamamlayıcı politikalarla desteklenmelidir. Siyasi ve toplumsal direnç önemli zorluklardır.

Amaç 6: Toplu taşımaya geçişi teşvik etmek	-Türel dağılımda toplu taşımanın payı -Toplu taşıma kullanımından duyulan memnuniyet -Belediye bütçesinden toplu taşıma yatırımlarına ayrılan pay	- %28 (2017) - Raylı sistem %81 Otobüs %67,8 (2019) -%30,7 (2020)	- %35 - Raylı/deniz ulaşımında %85-90 Otobüs %75-80 -N/A	Raylı sistem yatırımlarının zamanında tamamlanması kritiktir. Otobüs memnuniyetinin artması, sefer sıklığı, aktarma süreleri ve durak konforunun iyileştirilmesine bağlıdır. Dijital sistemler ve otobüs şeritleri süreci destekleyebilir.
Amaç 7: Aktif ulaşım türlerine (yürüyüş ve bisiklet) geçişi teşvik etmek	-Aktif türler ile yapılan yolculukların yüzdesi -Bisiklete özgü altyapının uzunluğu	- Yaya %40,5 Bisiklet %0,07 -374 km	- Yaya %45 Bisiklet %5 -3.680 km	Yaya oranındaki hedef ulaşılabilirken, bisiklet hedefi İstanbul'un coğrafyası ve kültürel yapısı nedeniyle iddialıdır. Altyapı yatırımı ve paylaşımlı bisiklet sistemleriyle desteklenmesi gerekmektedir.

İstanbul SKUP kapsamında belirlenen 26 ana projeden, yol ve trafik güvenliğiyle ilişkili olan 11'i seçilmiş; bu projelerin 4. 5. 6. ve 7. amaçlara katkı düzeyi ile toplumsal kapsayıcılık ve cinsiyet eşitliği boyutları (CETKap) ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile uyum düzeylerini değerlendirmek amacıyla Çizelge 1.3 oluşturulmuştur.

Çizelge 1.3, her projenin İstanbul SKUP vizyonu doğrultusunda yol güvenliği ile ilişkili dört temel hedefe (Amaç 4, 5, 6, 7) olan katkısını nitel ve nicel veriler üzerinden değerlendirmek üzere yapılandırılmıştır. Her bir projenin ilgili amaçlara katkısı düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç farklı düzey için derecelendirilmiştir (★ = Düşük katkı, ★★ = Orta katkı, ★★★ = Yüksek katkı). Çizelge 1.3'ü dolduran uzmanlardan; 11 projenin amaçlarla doğrudan ilişkili olup olmadığı, kent geneline etkisi, hedef kitle, toplu taşıma kullanıcıları ya da bisikletliler gibi gruplar üzerindeki etkisi gibi faktörleri dikkate almaları talep edilmiştir. Projelerin dezavantajlı gruplar üzerindeki etkisini ölçen Cinsiyet Eşitliği ve Toplumsal Kapsayıcılık (CETKap) değerlendirmesinde uzmanlardan projeleri; kadınlar, yaşlılar, çocuklar ve engelliler gibi kırılgan grupların

erişiminin kolaylaştırılması ve aktif ulaşımın teşvik edilmesi (örneğin bisiklet yolları, yaya düzenlemeleri) üzerinden ele almaları istenmiştir. Projeler uzmanlar tarafından, kırılgan grupların güvenliğine ve erişimine doğrudan katkı sağlıyorsa “Yüksek”, belirli gruplara fayda sağlasa da hedefe doğrudan yönelmemişse “Orta” ve toplumsal kapsayıcılık yönünden zayıfsa “Düşük” şeklinde değerlendirilmiştir. CETKap değerlendirmesi, nitel ve doğrudan hedef grup etkisini yansıttığı için düşük–orta–yüksek gibi kategorik (ordinal) bir sınıflama ile ifade edilmiştir. CETKap etkileri genellikle ölçülebilir niceliksel verilere değil, projelerin içeriksel analizine ve hedeflenen toplumsal gruplar üzerindeki potansiyel etkilerine dayanmaktadır. SKA’ya uyum değerlendirmesinde ise uzmanlardan 11 projenin sürdürülebilir kalkınma amaçlarına olan katkı düzeylerini değerlendirmeleri istenmiştir. SKA uyumu, daha soyut bir politika uyum düzeyini ifade ettiğinden, orta–yüksek–çok yüksek şeklinde üçlü bir ölçeklendirme kullanılmıştır. Bu ölçek, projelerin çevresel, toplumsal ve iklimsel hedeflerle ne ölçüde bütünleştiğini belirtmek için tercih edilmiştir. “Düşük” kategorisi özellikle dışlandığından, değerlendirilen projelerin tamamı temel düzeyde sürdürülebilirlik unsurları taşıyan SKUP kapsamında olduğu varsayımıyla hareket edilmiştir. SKA’lara uyumda özellikle; SKA 3: Sağlık ve Refah (yol güvenliği, aktif ulaşım), SKA 11: Sürdürülebilir Şehirler (erişilebilirlik, çevre), SKA 13: İklim Eylemi (düşük karbonlu ulaşım) hedeflerine odaklanılmıştır.

Çizelge 1.3. SKUP İstanbul 4-5-6-7. Amaçlarına Katkı Sağlayan Projelerin Katkı Düzeyleri ile CETKap ve SKA Değerlendirmeleri

Proje Adı	Amaç 4: Yol Güvenliği	Amaç 5: Trafik Sıklığı	Amaç 6: Toplu Taşıma Erişim	Amaç 7: Aktif Türler	CETKap	SKA Uyumu
Raylı Sistem Ağına Genişletilmesi	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Otobüs Şeritleri	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Transfer Merkezleri Sistemlerinin Oluşturulması- Yaygınlaştırılması	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
İstanbul Ağ Yönetimi Kontrol Merkezi (İAYKM)	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Yayalar ve Bisikletliler için Kavşak İyileştirmeleri	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Yaya Güzargaları	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Besleyici Bisiklet Güzargaları	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Otobüs Hizmetleri İyileştirme Programı	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Deniz Ulaşımının Geliştirilmesi, Filonun Yenilenmesi	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Park Et Devam Et Alanları	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Orta ☐ Yüksek ☐ Çok Yüksek
Trafik Sakinleştirme	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek	☐ Düşük ☐ Orta ☐ Yüksek

Çizelge yazar tarafından oluşturulmuştur.

Çalışmada ayrıca, İstanbul SKUP'un genel performansı ve etki potansiyelini değerlendirmek üzere Çok Ölçütlü Analiz (ÇÖA) puanlaması oluşturulmuştur. Puanlama; her bir projenin yol güvenliğiyle ilişkili dört temel SKUP amacı (Yol Güvenliği, Trafik Sıkışıklığı, Toplu Taşımaya Erişim, Aktif Ulaşım Türleri) temel alınarak ve projenin CETKap ve SKA değerlendirmeleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. ÇÖA puanlaması, projelerin SKUP Amaç 4–7 ile ilişkili bütüncül katkısını ve uygulama kapasitesini hem niteliksel hem de niceliksel girdilerle ifade etmek için 0–100 aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal ölçek, projeler arasında daha ince farklılıkları ayırt edebilmek ve toplam skorlarla önceliklendirme yapabilmek için tercih edilmiştir. Sayısal değerler uzman değerlendirmeleri, etki alanı, politika katkı düzeyi ve maliyet-yarar tahminleri üzerinden ağırlıklandırılmıştır.

Bu yaklaşımda her proje için:

- Amaç 4–7 kapsamındaki yıldızların toplam sayısı (1–12 arası) temel etki puanı olarak alınmış,
- CETKap değeri: Düşük (0), Orta (+1), Yüksek (+2) olarak puanlanmış,
- SKA uyumu: Orta (0), Yüksek (+1), Çok Yüksek (+2) olarak puanlanmış,
- Elde edilen toplam puan ölçeklendirilerek 0–100 aralığında derecelendirilmiştir.

ÇÖA puanı = ((Amaç Yıldız Sayısı × 5) + CETKap puanı × 5 + SKA puanı × 5)

ÇÖA puanı, farklı türde ve ölçekte etkileri olan üç bileşeni (Amaçlara katkı, CETKap, SKA) aynı puanlama sistemine entegre etmek ve 0-100 derecelendirmesi şeklinde kurgulanan toplam puan içindeki yerini görebilmek amacıyla beş çarpanı kullanılmıştır.

Hesaplanan ÇÖA puanları, aşağıdaki derecelendirme kategorilerine göre sınıflandırılmıştır:

Puan Aralığı	Öncelik Seviyesi
80–100	Yüksek Öncelikli Projeler
60–79	Orta Öncelikli Projeler
40–59	Düşük Öncelikli Projeler
0–39	Uygulanabilirliği Zayıf Projeler

Çizelge 1.4'te uzmanlar tarafından İstanbul SKUP'un 4-5-6 ve 7 amaçlarına katkı sağlayan 11 projenin değerlendirmesi ile projelerin CETKap ve SKA düzeylerine ilişkin değerlendirmeleri görülmektedir. Çizelge 1.5'te ise uzman değerlendirmeleri neticesinde hesaplanan 11 projenin ÇÖA puanları görülmektedir

Çizelge 1.4. SKUP İstanbul Uzman Değerlendirmeleri

Proje Adı	Amaç 4: Yol Güvenliği	Amaç 5: Trafik Sıkışıklığı	Amaç 6: Toplu Taşıma	Amaç 7: Aktif Türler	(CETKap) Uyum (SKA)	(ÇÖA)	
Raylı Sistem Ağıнын Genişlemesi	★★★	★★★	★★★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 1:							
Uzman 2:	★★	★★	★★★	★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 3:	★★	★★★	★★★	★★★	Orta	Çok Yüksek	
Uzman 4:	★★★	★★★	★★★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★★	★★★	★★★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Otobüs Şeritleri							
Uzman 1:	★★★	★★★	★★	★★	Orta	Yüksek	
Uzman 2:	★★★	★★	★★★	★	Orta	Çok Yüksek	
Uzman 3:	★★	★★	★★	★★	Orta	Yüksek	
Uzman 4:	★★★	★★★	★★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★★	★★★	★★	★★	Orta	Yüksek	
Transfer Merkezleri Sistemleri							
Uzman 1:	★★	★★	★★★	★★★	Orta	Yüksek	
Uzman 2:	★★	★	★★★	★	Yüksek	Orta	
Uzman 3:	★★	★★	★★★	★★★	Orta	Yüksek	
Uzman 4:	★★★	★★★	★★★	★★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★	★★	★★★	★★★	Orta	Yüksek	
İstanbul Ağ Yönetimi Kontrol Merkezi (İAYKM)							
Uzman 1:	★★★	★★★	★★		Orta	Yüksek	
Uzman 2:	★★★	★★★	★★	★	Düşük		
Uzman 3:	★★★	★★	★★	★★	Orta	Orta	
Uzman 4:	★★★	★★★	★★	★★	Orta	Yüksek	
Uzman 5:	★★★	★★★	★★	★★	Orta	Yüksek	
Yaya ve Bisiklet Kavşak İyileştirmeleri							
Uzman 1:	★★★	★★		★★★	Yüksek	Yüksek	
Uzman 2:	★★★	★	★	★★★	Yüksek	Orta	

Uzman 3:	★★	★★	★★★	★★★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 4:	★★★★	★★	★★	★★★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★★★	★★	★★★	★★	Yüksek	Yüksek	
Yaya Güzergâhları ve Yaya Alanları Düzenlemesi Uzman 1:	★★★★	★★			Yüksek	Yüksek	
Uzman 2:	★★★★	★	★	★★★★	Yüksek	Orta	
Uzman 3:	★★★★	★★	★★	★★	Yüksek	Yüksek	
Uzman 4:	★★★★	★★	★★	★★★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★★★	★★	★	★	Yüksek	Yüksek	
Besleyici Bisiklet Güzergâhları Uzman 1:	★★	★★★★		★★★★	Yüksek	Yüksek	
Uzman 2:	★★	★	★★★★	★★★★	Orta	Yüksek	
Uzman 3:	★★	★★	★★★★	★★	Düşük	Çok Yüksek	
Uzman 4:	★★★★	★★	★★★★	★★★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★	★★★★	★★★★	★	Yüksek	Yüksek	
Otobüs Hizmetleri İyileştirme Programı Uzman 1:	★★	★★★★	★★★★		Yüksek	Yüksek	
Uzman 2:	★★	★	★★★★	★	Yüksek	Orta	
Uzman 3:	★★	★★	★★	★★	Orta	Yüksek	
Uzman 4:	★★★★	★★★★	★★★★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★	★★★★	★★★★	★★★★	Yüksek	Yüksek	
Deniz Ulaşımının Geliştirilmesi ve Filonun Yenilenmesi Uzman 1:	★★★★	★★	★★★★		Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 2:	★	★★	★★	★	Orta	Yüksek	
Uzman 3:	★★★★	★★★★	★★	★★★★	Orta	Yüksek	
Uzman 4:	★★★★	★★★★	★★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★★★	★★	★	★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Park Et Devam Et Alanları Uzman 1:	★	★★	★★★★		Düşük	Orta	

Uzman 2:	★	★★★	★★★	★	Düşük	Çok Yüksek	
Uzman 3:	★★	★★	★★★	★★★	Orta	Yüksek	
Uzman 4:	★★★	★★★	★★★	★★	Yüksek	Yüksek	
Uzman 5:	★	★★	★★★	★★	Düşük	Orta	
Trafik Sakinleştirme Uzman 1:	★★★	★★★	★★	★★★	Orta	Yüksek	
Uzman 2:	★★★	★	★	★★	Yüksek	Düşük	
Uzman 3:	★★	★★★	★★	★★	Orta	Çok Yüksek	
Uzman 4:	★★★	★★	★★	★★★	Yüksek	Çok Yüksek	
Uzman 5:	★★★	★★★	★★	★★★	Orta	Çok Yüksek	

Tabloda yer alan değerlendirmeler iki şehir plancısı, iki inşaat mühendisi ve bir AB proje uzmanı tarafından paylaşılan değerlendirmeleri içermektedir.

(★ = Düşük katkı, ★★ = Orta katkı, ★★★ = Yüksek katkı)

Çizelge 1.5. SKUP İstanbul ÇÖA Puanları

Proje Adı	Yıldız Ort (4+5+6+7)	CETKap Ort	SKA Ort	ÇÖA Puanı
Raylı Sistem Ağı Genişlemesi	10.6	1.8	1.8	62
Otobüs Şeritleri	9.6	1.0	1.4	54
Transfer Merkezleri Sistemleri	10.4	1.2	1.2	58
İstanbul Ağ Yönetimi Kontrol Merkezi	9.2	0.8	0.8	49
Yaya ve Bisiklet Kavşak İyileştirmesi	10.4	2.0	1.6	63
Yaya Güzergâhları	10.0	2.0	1.6	61
Besleyici Bisiklet Güzergâhları	9.8	1.6	1.8	59
Otobüs Hizmetleri İyileştirme Programı	10.0	1.6	1.6	60
Deniz Ulaşımı ve Filonun Yenilenmesi	9.8	1.6	1.8	59
Park Et Devam Et Alanları	9.4	0.8	1.2	52
Trafik Sakinleştirme	10.8	1.2	1.4	60

Çizelge 1.5’de sunulan SKUP İstanbul kapsamında yol ve trafik güvenliği ile ilişkili 11 projenin ÇÖA puanlarına yönelik değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

Raylı Sistem Ağı Genişletilmesi: Bu proje, ÇÖA puanlamasında üst orta seviyede (62 puan) yer almakta olup, kentsel hareketliliğin temel omurgasını oluşturması nedeniyle önemlidir. Ancak uzmanlarca, sadece yeni raylı sistem hatlarının açılmasının yeterli olmayacağı, özellikle İstanbul bağlamında “raylı sisteme erişim” konusunun ayrıca ele alınması gerektiği belirtilmiştir. Bu durum, planlamada son kilometre bağlantıları, istasyon çevresi güvenliği ve mikromobilité bağlantılarının güçlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Raylı sistem yatırımlarında, mekânsal erişilebilirlik sorunu doğrudan yol güvenliğiyle ilişkili bir husus olup yetersiz erişim, yaya kazalarının artmasına neden olabilecektir.

Otobüs Şeritleri: Bu proje için uzmanlar tarafından yapılan yorumda, İstanbul gibi yoğun trafik baskısı altındaki kentlerde özel şeritlerin toplu taşımaya ayrılmasının, diğer şeritlerde tıkanıklığa neden olabileceği vurgulanmıştır. Bu riskin, hız değişimleri agresif sürüş davranışlarını tetikleyebileceğinden yol güvenliği açısından dikkatle ele alınması elzemdir. Literatürde bu tür müdahalelerin bütüncül bir trafik yönetimiyle desteklenmediği durumlarda ters etkiler yaratabildiği görülmektedir. Bu nedenle proje, yalnızca şerit tahsisı değil, hız yönetimi, sinyal optimizasyonu ve bütüncül ulaşım talep yönetimi ile desteklenmelidir.

Deniz Ulaşımının Geliştirilmesi: Deniz ulaşımının geliştirilmesi İstanbul için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Uzmanlarca bu potansiyelin daha fazla üzerinde durulması gerektiği ifade edilmiştir. Ancak bu tür projelerde yalnızca deniz araçlarının artırılması yeterli olmayacağı açıktır. İskele çevresi yaya güvenliği, yolcu transfer noktalarındaki entegrasyon ve iskeleye erişim yollarının güvenliğinin artırılması, yol güvenliği hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Deniz ulaşımını güçlendirmek, karasal trafikteki baskıyı azaltabilir; ancak bu etkinin ortaya çıkması için multimodal bütünleşme gereklidir.

Yaya ve Bisiklet Kavşak İyileştirmeleri ile Yaya Güzergâhları: Bu projeler, kırılgan yol kullanıcılarının korunması açısından doğrudan yol güvenliğine katkı sağlamaktadır. Uzman yorumlarında özellikle bu projelerin sosyal adalet perspektifiyle değerlendirilmesi gerekliliğine değinilmiştir. Yaya güvenliği iyileştirmeleri, yalnızca merkezi bölgelerde değil, dezavantajlı mahallelerde de önceliklendirilmelidir. Bu tür projelerin kent içi hız yönetimi stratejileriyle birlikte ele alınmasının Vision Zero hedeflerine ulaşmada temel teşkil edeceği açıktır.

Trafik Sakinleştirme ve Transfer Merkezleri: Trafik sakinleştirme uygulamaları, hızın düşürülmesi yoluyla kazaları azaltmada etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu projelerde alan seçimi, sosyal eşitlik ilkesine göre yapılmalıdır. Transfer merkezleri ise toplu taşımanın etkinliğini artırırken, yaya güvenliği ve erişilebilirlik konularını da beraberinde gündeme getirmektedir. Tasarım sürecinde kullanıcı dostu ve güvenli bir deneyim sağlanması kritik önemdedir.

Çalışma bulguları, İstanbul SKUP kapsamında yol güvenliği ile sosyal eşitlik ve sürdürülebilirlik hedeflerinin entegrasyonunun geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Uzman görüşleri, projelerin teknik yeterliliğinin ötesinde, yerel bağlamda uygulanabilirlik, erişilebilirlik, yönetim ve sosyal etki boyutlarının önemini ortaya koymuştur. Bu kapsamda İstanbul için önerilen strateji, sadece altyapı yatırımlarını değil, yaya önceliği, hız yönetimi, kapsayıcı tasarım ve toplumsal eşitlik hedeflerini bir arada gözeten bütüncül bir yaklaşımdır.

5.SONUÇ

Bu çalışmada, sürdürülebilir kentsel hareketlilik planları (SUMP) bağlamında kent içi yol güvenliği konusu, İstanbul üzerinden çok boyutlu olarak ele alınmıştır. Yapılan analizlerde, yol güvenliği olgusunun sadece teknik bir hedef değil; sosyal adalet, yönetim yapıları, altyapı eşitliği ve politika bütünleşmesi ile doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmıştır. Güvenliğin yalnızca ulaşım mühendisliğiyle değil, aynı zamanda karar alma süreçlerinde şeffaflık, paydaş katılımı ve toplumsal kırılganlıkların gözetilmesi ile şekillendiği görülmüştür.

İstanbul SKUP'un amaçlarında yol güvenliğine ilişkin olarak; “Ulaşım ve yolculukların emniyetini ve güvenliğini artırmak”, “Trafik hacimlerini, sıklık ve otomobil bağımlılığını azaltmak”, “Toplu taşımaya geçişi teşvik etmek”, “Aktif turlere (yürüyüş ve bisiklet) geçişi teşvik etmek” başlıklı 4. 5. 6 ve 7. amaçlar öne çıkmaktadır. İstanbul SKUP, CETKap yaklaşımıyla, sosyal kapsayıcılık temelinde yol güvenliğini yeniden tanımlamakta; çocuklar, yaşlılar, kadınlar ve diğer dezavantajlı grupların erişim ve güvenlik ihtiyaçlarını önceliklendirmektedir. Ancak İstanbul'daki uygulamaların henüz kurumsal bir bütünlük ve izleme kapasitesine tam olarak kavuşmamış olması, bu yaklaşımın etki gücünü sınırlamaktadır.

İstanbul SKUP, sosyal eşitlik perspektifinden özgün bir yaklaşım sunmakta, toplumsal kapsayıcılığı planlama süreçlerine dahil eden CETKap modeliyle kırılgan grupların ihtiyaçlarını görünür kılmaktadır. İstanbul SKUP, yol güvenliğini kadınların, yaşlıların, çocukların, engellilerin ve diğer sosyal grupların erişim hakkı üzerinden tanımlamış; bu grupların planlama döngüsüne aktif biçimde katılımını sağlayarak sosyal temsiliyeti güçlendirmiştir. Ancak bu

yaklaşımın etkili sonuçlar üretebilmesi için kurumsal izleme kapasitesinin geliştirilmesi, göstergelerin sürekli olarak raporlanması ve yol güvenliği politikalarının diğer kentsel politika alanlarıyla (konut, çevre, sosyal yardım) entegre edilmesi gerekmektedir.

İstanbul İçin Politika Önerileri:

İstanbul özelinde yapılan analizler ışığında aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Yol güvenliği hedeflerinin SKUP belgelerinde açık, ölçülebilir ve zaman takvimine dayalı biçimde tanımlanması; örneğin yıllık kaza azaltım oranlarının belirlenmesi.
- Kurumlar arası koordinasyonun güçlendirilmesi; veri paylaşımı, ortak platformlar ve görev tanımlarının netleştirilmesiyle yönetim yapısının etkinleştirilmesi.
- Yol güvenliği hedeflerinin yalnızca ulaşım politikası kapsamında değil; konut, çevre, eğitim, sağlık ve sosyal yardım gibi alanlarla eşgüdümlü şekilde planlanması, böylece konunun bütüncül politika çerçevesine yerleştirilmesi.
- Katılım mekanizmalarının süreklilik kazanması; özellikle kırılgan grupların sürece aktif olarak dâhil edilmesini sağlayacak sosyal katılım modellerinin geliştirilmesi.
- Güvenlik projelerinin toplumsal etki düzeylerinin izlenmesi; kadınlar, çocuklar, yaşlılar ve engelliler gibi gruplar için özel erişim ve güvenlik göstergeleri belirlenmesi.

Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler:

Bu çalışmanın sunduğu çerçeve, sürdürülebilir ulaşım politikalarının farklı ölçeklerde ve farklı sosyo-politik bağlamlarda güvenlik odaklı olarak nasıl yeniden şekillenebileceğini anlamak açısından da önem taşımaktadır. Bu bağlamda gelecekte yapılacak çalışmalara şu öneriler sunulabilir:

- Farklı şehir tiplerinin karşılaştırmalı analizine dayanan saha araştırmaları yapılması; örneğin metropol, orta ölçekli ve çevresel riskleri yüksek şehirlerin güvenlik stratejilerinin karşılaştırılması.
- Katılımcı planlama süreçlerinin yol güvenliğine etkisini ölçen sosyal araştırmaların yapılması; özellikle katılım ve sonuçlar arasındaki ilişkiye dair nedensel bağların ortaya konması.
- Yerel yönetimlerin uluslararası politikaları nasıl yerleştirdiği ve uygulamaya nasıl entegre ettiği üzerine yönetim temelli analizlerin yapılması.

Bu çalışma, Türkiye’de sürdürülebilir ulaşım planlaması ve kent içi yol güvenliği politikalarının yeniden düşünülmesine katkı sağlayacak nitelikte bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, klasik kaza istatistikleri ya da yalnızca altyapı temelli karşılaştırmalar yerine, yol güvenliğini çok düzlemli bir yönetim sorunu olarak değerlendirmesidir. Yol güvenliği yalnızca bir mühendislik çıktısı olarak değil, toplumsal kapsayıcılığın, kurumsal koordinasyonun ve planlama etiğinin bir yansıması olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşım, güvenliğin sürdürülebilir ulaşım planlamasında yalnızca bir sonuç değil; aynı zamanda süreç boyunca gözetilmesi gereken temel bir ilke olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, güvenli ulaşımın nasıl tasarlanması gerektiği kadar, kimin için, kimlerle birlikte, hangi değerler ışığında tasarlanması gerektiğine dair de bütüncül bir sorgulama geliştirmiştir.

Kaynakça

- İnternet : “ Bir Bakışta İstanbul”, Web: <http://www.istanbul.gov.tr/bir-bakista-istanbul>, Son Erişim Tarihi: 03/04/2025 [1].
- İnternet: “ Hakkımızda”,Web: <https://www.metro.istanbul>, erişim: 26/02/2025 [2].
- İnternet: “İETT Faaliyet Raporu”, Web: <https://iett.istanbul/BBImages/Slider/Image/2023-iett-faaliyet-raporu.pdf>, Son Erişim Tarihi: 01/03/2025 [3].
- İnternet: “ İstanbul'da 34 bin 783 elektrikli scooter için izin verildi”, Web: <https://www.aa.com.tr> ,Son Erişim Tarihi: 05/03/2025 [4].
- AYAZ, Ç (2023), Kentsel Hareketlilik Yönetimine Stratejik Bir Bakış: İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı Üzerine Nitel Bir Analiz, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir
- DOĞAN, K, DOĞAN, M (2020), İstanbul’da Yerleşme - Ulaşım ilişkisine Coğrafi Bakış, Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, Cilt: 3, Sayı: 2, ss.320-344
- İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı, 2011
- İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı, ARUP,2022
- İstanbul Ulaşım Ve Hareketlilik Raporu, İBB, 2022
- Karahan, G; Kurtuluş, C & Garagon, E.,(2023), “Kent Ulaşımında Mikromobilité Çözümlerine Lokasyon Analitiği Yaklaşımı” , Onyediy Eylül Üniveritesi, Bandırma
- UMAM Roadmap Report (2020) , EIT Urban Mobility, İstanbul