

MÜHENDİSLİKTE KURAM VE UYGULAMALI ÇALIŞMALAR

Editörler
Prof. Dr. M. Sait CENGİZ
Dr. Öğr. Üyesi Emin EL



MÜHENDİSLİKTE KURAM VE UYGULAMALI ÇALIŞMALAR

Editörler

Prof. Dr. M. Sait CENGİZ

Dr. Öğr. Üyesi Emin EL



Mühendislikte Kuram ve Uygulamalı Çalışmalar

Editörler:

Prof. Dr. M. Sait CENGİZ

Dr. Öğr. Üyesi Emin EL

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design

Baskı: Ekim 2025

Yayıncı Sertifika No: 49837

ISBN: 978-625-5698-95-7

© 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.Bölüm.....1

Elektrik Üretim Teknolojilerinin Tarihsel Gelişimi

Bekir DURSUN

2. Bölüm12

Yüksek Gerilim İletim Hatlarında

Katodik Koruma Prensipleri ve Topraklama Sistemleri ile Etkileşimi

Bekir DURSUN

3. Bölüm28

Sağlık Sektöründe Büyük Veri

Ceren ÜNLÜKAL, Elifcan GÖÇMEN POLAT, Andaç İMAK

4. Bölüm42

Akıllı Binalarda HVAC ve

Aydınlatma Sistemlerinin Metasezgisel Optimizasyonu

Elif VAROL ALTAY, Osman ALTAY

5. Bölüm58

Akıllı Ulaşım Sistemlerinde V2X Haberleşmesinin Rolü:

Mevcut Durum ve Eğilimler

Esin YAVUZ

6. Bölüm69

Bilgisayar Kontrollü Kartezyen Çizim Robotu Tasarımı

Muhammed Kemalettin TORAMAN, Nihat İNANÇ

7. Bölüm91

Endüstriyel Robotik Sistemlerin İş Sağlığı ve

Güvenliği Üzerindeki Etkileri:

Avantajlar, Riskler ve Gelecek Perspektifleri

Mustafa HAMAMCI, İsmail SOYHAN

8. Bölüm117

Fiziksel Nedenli Meslek Hastalığı Etkenlerinden Gürültü

Banu AKBULUT, Aslı Ece ACAR FİLİZCİ, Dilek ÖZTAŞ,

Gerçek BUDAK, Ergün ERASLAN

9. Bölüm130

İş yerinde Şiddet ve Taciz

Mustafa ÖZDİN, Aslı Ece ACAR FİLİZCİ,

Dilek ÖZTAŞ, Ergün ERASLAN

10. Bölüm140

Elektromanyetik Kalkanlamada

Yapı Malzemeleri Araştırmaları

Nazım Çağatay DEMİRAL, Muhammed MALKOÇ

11. Bölüm154

Ekstansometre Cihazlarının Ölçüm Belirsizliği Hesabının Astm E83

Standardına Göre İncelenmesi

Bülent AYDEMİR

12. Bölüm169

Metal Matrisli Hibrit Kompozitlerde Güncel Çalışmalar

Serkan ISLAK

13. Bölüm.....183

Al_2O_3 -LCD Kompozitlerinden Elde Edilen Sinterlenmiş

Beyaz Cam Seramik Karolar

Suna ÇETİN YETER

14. Bölüm193

Sanayii Tipi Chiller İçin Verimlilik ve

Performans Analizi

Emre TARGAY, Mustafa Tahir AKKOYUNLU, Mehmet AKGÜL

1. Bölüm

Elektrik Üretim Teknolojilerinin Tarihsel Gelişimi

Bekir DURSUN¹

1. Giriş

Elektrik enerjisi, modern toplumların ekonomik, endüstriyel ve sosyal gelişiminin temel dinamiklerinden biridir. 19. yüzyılın sonlarında gerçekleşen ikinci sanayi devrimiyle birlikte, elektriğin geniş ölçekli üretimi, iletimi ve dağıtımı için geliştirilen teknolojiler, dünya ekonomisinin yapısını köklü biçimde değiştirmiştir. Günümüzde küresel elektrik üretimi yalnızca bir enerji meselesi değil, aynı zamanda iklim değişikliği, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının da merkezindedir (Smil, 2017; IEA, 2023). Elektrik üretim teknolojilerinin tarihsel gelişimi, esasen enerji kaynaklarının dönüşümü ve teknolojik ilerleme arasındaki karşılıklı etkileşimin bir sonucudur. İlk dönemde kömürle çalışan buhar türbinleri (Rankine çevrimi) elektrik üretiminin temelini oluşturmuş; ardından hidroelektrik, nükleer ve doğal gaz çevrimleri farklı dönemlerde baskın rol oynamıştır (Hughes, 1983). 21. yüzyıla gelindiğinde ise enerji üretiminde fosil yakıtlardan yenilenebilir kaynaklara geçiş süreci hızlanmıştır. Bu geçiş, maliyet düşüşleri, çevresel kaygılar ve teknolojik olgunlaşmanın birleşimiyle gerçekleşmektedir (REN21, 2022).

Elektrik üretiminin temelleri, 19. yüzyılın ikinci yarısında geliştirilen dinamo ve alternatör teknolojilerine dayanır. Thomas Edison'un 1882'de New York'ta kurduğu Pearl Street Santrali, kömürle çalışan ilk merkezi üretim tesisi olarak kabul edilir (Hughes, 1983). Edison'un doğru akım (DC) sistemi, kısa mesafeli dağıtım için uygundu; ancak uzun mesafelerde büyük kayıplar oluşuyordu. Bu dönemde Nikola Tesla ve George Westinghouse'un geliştirdiği alternatif akım (AC) sistemleri, yüksek gerilimli iletim hatlarının kullanımını mümkün kılarak elektrifikasyon sürecinde devrim yaratmıştır (Hammond, 2001). 1900'lerin başında hidroelektrik santraller önem kazanmaya başlamış; Niagara Şelalesi üzerinde kurulan tesis, yüksek güçlü AC jeneratörlerin pratikteki başarısını göstermiştir. Böylece, mekanik enerjiden elektrik üretimi ilk kez endüstriyel ölçek kazandı.

İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemde elektrik talebi hızla artmış, büyük ölçekli termik santraller yaygınlaşmıştır. Buhar türbinlerinin verimliliği artarken,

¹ Öğr. Gör. Dr., Trakya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 22030, Edirne, bekirdursun@trakya.edu.tr ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7741-8873>

yakıt olarak kömürün yerini kısmen petrol ve doğal gaz almaya başlamıştır (Smil, 2015). 1950’lerde nükleer enerji, “sınırsız ve temiz güç” sloganıyla tanıtılmış, 1970’lerin sonunda dünya elektrik üretiminin yaklaşık %10’unu karşılar hâle gelmiştir (World Nuclear Association, 2024). Ancak, nükleer enerjiye dair toplumsal güven sorunları (Three Mile Island, 1979; Çernobil, 1986) ve çevresel endişeler, 1980’lerde bu teknolojinin büyümesini yavaşlatmıştır (Perrow, 1999).

1990’lardan itibaren iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik gündemi, enerji politikalarını yeniden şekillendirmiştir. Kyoto Protokolü (1997) ve Paris Anlaşması (2015) sonrası süreçte, rüzgâr ve güneş enerjisi yatırımları küresel ölçekte artış göstermiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2023) verilerine göre, 2022 itibarıyla dünya genelinde kurulu elektrik üretim kapasitesinin yaklaşık %30’u yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır. Fotovoltaik (PV) modül fiyatlarının 2010–2020 arasında %80 oranında düşmesi (IRENA, 2023), güneş enerjisini en hızlı büyüyen teknoloji hâline getirmiştir. Rüzgâr türbinlerinde ise doğrudan tahrikli jeneratörler ve güç elektroniği tabanlı dönüştürücülerin kullanımı, üretim verimliliğini artırmıştır (Ackermann & Söder, 2002). Ayrıca, enerji depolama ve akıllı şebeke (smart grid) teknolojilerinin yaygınlaşması, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmıştır (Lund et al., 2015). Böylece elektrik üretim sistemleri merkezi yapıdan kademeli olarak dağıtık üretim modeline geçmektedir.

Literatürde elektrik üretim teknolojilerinin evrimsel süreci çok sayıda araştırmada incelenmiştir. Hughes (1983), elektrifikasyonun teknik sistemler teorisi açısından tarihsel gelişimini analiz ederken; Smil (2017), enerji dönüşümlerinin insan uygarlığı üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde ele almıştır. Diğer çalışmalar, spesifik teknolojik dönemlere odaklanmıştır: örneğin Hammond (2001), AC-DC savaşlarını; Perrow (1999), nükleer riskleri; Lund et al. (2015) ise enerji sistemlerindeki bütünleşik dönüşümü incelemiştir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, özellikle yenilenebilir enerji teknolojilerinin dijitalleşme ve karbon nötr hedefleri ile ilişkisini ön plana çıkarmaktadır (REN21, 2022; IRENA, 2023). Bu bağlamda, elektrik üretim teknolojilerinin tarihsel gelişimi yalnızca teknik bir ilerleme öyküsü değil, aynı zamanda enerji politikalarının, çevre bilincinin ve ekonomik sistemlerin evriminin de yansımasıdır.

2. Elektrik Üretim Teknolojilerinin Tarihsel Evrimi

Elektrik üretim teknolojileri, tarih boyunca hem teknik ilerlemenin hem de toplumsal ihtiyaçların bir yansıması olmuştur. Her dönemde farklı bir enerji kaynağı baskın rol oynamış, enerji sistemleri yeni teknolojilerle birlikte verimlilik, ölçek ve çevresel etki bakımından dönüşüme uğramıştır (Smil, 2017;

Hughes, 1983). Bu evrim beş ana dönemde incelenebilir: Buhar ve Mekanik Enerji Çağı, Hidroelektrik Dönemi, Nükleer ve Fosil Hakimiyeti, Yenilenebilir ve Dijital Dönüşüm Çağı, ve Geleceğin Teknolojileri.

Elektrik üretiminin ilk döneminde, enerjinin kaynağı doğrudan mekanik işti. Buhar makinesinin geliştirilmesi (Hills, 1993), endüstriyel enerji dönüşümünün temelini oluşturdu. Thomas Edison'un 1882'de New York'ta kurduğu Pearl Street Station, kömürle çalışan ilk merkezi elektrik üretim tesisi olarak tarihe geçti (Hughes, 1983). Bu dönemin en büyük teknik tartışması, doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) sistemleri arasındaki rekabetti. Edison'un DC sistemleri kısa mesafelerde güvenilirken, Tesla ve Westinghouse'un desteklediği AC sistemleri uzun mesafeli iletimi mümkün kıldı (Hammond, 2001). 1896'da Niagara Şelalesi üzerine kurulan hidroelektrik santral, AC sistemlerinin üstünlüğünü kanıtladı (Nye, 1990). Bu dönem, elektrifikasyonun şehir yaşamına entegre edildiği, aydınlatma ve temel endüstriyel üretimin elektrikleştirildiği bir çağ olarak tanımlanır.

20. yüzyılın başında hidroelektrik enerji, güvenilir ve yenilenebilir bir alternatif olarak öne çıktı. Norveç, İsveç, Kanada ve İsviçre gibi su kaynakları zengin ülkelerde, hidroelektrik santraller ekonomik büyümenin lokomotifi hâline geldi (Bowers, 1998). Bu dönemde geliştirilen Francis, Kaplan ve Pelton türbinleri, verimliliği %90'lara kadar çıkararak hidroelektrikliği sanayileşmiş toplumların temel enerji kaynağı hâline getirdi (Ackermann & Söder, 2002). II. Dünya Savaşı sonrasında büyük baraj projeleri (ör. Hoover, Itaipú, Aswan) hidroelektrik üretiminin sembolü oldu. Ancak 1950'lere gelindiğinde, artan enerji talebi ve mevsimsel debi sınırlamaları, fosil yakıtlı termik santrallere geçişi hızlandırdı.

1950'lerle birlikte, enerji politikaları “sınırsız güç” mottosuyla nükleer enerjiye yöneldi. 1954'te SSCB'de devreye alınan Obninsk santrali, ticari ölçekte ilk nükleer güç üretimini temsil eder (World Nuclear Association, 2024). Ardından ABD, Fransa ve Japonya nükleer programlarını hızla genişletti.

Bununla birlikte, 1979'daki Three Mile Island ve 1986'daki Çernobil kazaları, kamuoyunda derin güven kaybına yol açtı (Perrow, 1999). Bu durum, 1990'lara kadar nükleer yatırımları yavaşlattı. Aynı dönemde fosil yakıtlı santraller hâkimiyetini sürdürdü. Buhar çevrimi üzerine kurulu kömür santralleri, petrol krizi (1973) sonrası yerini verimli doğal gaz kombine çevrim (CCGT) tesislerine bırakmaya başladı (Jefferson, 2016). Bu dönem aynı zamanda karbon emisyonlarının küresel ölçekte hızla arttığı dönem olarak kayda geçti (Stern, 2006).

2000'li yıllar, enerji sektöründe paradigma değişiminin yaşandığı dönemdir. Kyoto Protokolü (1997) ve Paris Anlaşması (2015) sonrası, ülkeler karbon nötr

hedefler belirlemiştir (UNFCCC, 2015). Rüzgâr enerjisi, türbin çaplarının büyümesi ve güç elektroniği tabanlı kontrol sistemlerinin gelişmesiyle, düşük maliyetli bir seçenek hâline gelmiştir (Ackermann & Söder, 2002). Aynı şekilde güneş enerjisi maliyetleri 2010–2020 arasında %80 azalmış, PV sistemleri hızla yayılmıştır (IRENA, 2023). Enerji depolama sistemleri, mikro şebekeler, ve akıllı grid altyapıları bu dönemin belirleyici teknolojileri olmuştur (Lund et al., 2015; Fang et al., 2012). Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA, 2024) göre, 2023 itibarıyla küresel kurulu gücün yaklaşık %32'si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerji artık niş bir teknoloji değil, küresel enerji piyasasının ana oyuncusudur.

Elektrik üretiminin geleceği, yalnızca kaynak çeşitliliğiyle değil, enerji taşıyıcılarının entegrasyonu ile şekillenecektir. Hidrojen ekonomisi, özellikle yeşil hidrojen (elektroliz yoluyla üretilen) teknolojileri sayesinde enerji depolama ve ulaşım sektörlerinde devrim potansiyeli taşımaktadır (IEA, 2021). Nükleer füzyon, halen deneysel aşamada olmakla birlikte, ITER ve NIF projeleriyle 2030'larda ticari potansiyele ulaşması beklenmektedir (Macfarlane & Ewing, 2022). Akıllı enerji sistemleri (smart energy systems) ise üretim, depolama ve tüketimi bütünleşik bir yapıya dönüştürerek, enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir (Lund et al., 2015).

Elektrik üretim teknolojilerinin evrimi, enerjinin hem teknik hem politik bir unsur olduğunu göstermektedir. Buhar makinelerinden yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemlerine uzanan bu çizgi, insanlığın enerjiye erişim biçiminin sürekli yeniden tanımlandığını ortaya koymaktadır (Smil, 2017; Sovacool & Geels, 2021). Her dönemde verimlilik artmış, enerji yoğunluğu azalmış, karbon ayak izi ise enerji karışımındaki kaynaklara bağlı olarak değişmiştir. Gelecekte ise sürdürülebilirlik, modülerlik ve dijitalleşme kavramları bu evrimin yeni belirleyicileri olacaktır.

3. Tartışma ve Analiz

Elektrik üretim teknolojilerinin tarihsel gelişimi, enerji dönüşümlerinin doğasında bulunan çok katmanlı dinamikleri açıkça göstermektedir. Her dönemde kullanılan baskın enerji kaynağı, yalnızca teknik bir tercih değil; aynı zamanda ekonomik yapı, politik koşullar ve çevresel farkındalık düzeyiyle belirlenmiştir. Smil'in (2017) ifade ettiği gibi, enerji sistemlerindeki dönüşüm süreci daima yavaş işler — kömürden petrole, petrolden doğalgaza ve son olarak yenilenebilir enerjiye geçişin her biri yaklaşık yarım yüzyılı bulmuştur. Bu yavaşlık, altyapının ölçeği, yatırım döngüleri ve teknolojik öğrenme eğrileriyle doğrudan ilişkilidir.

Enerji dönüşümlerinin hız dinamikleri incelendiğinde, teknolojik yeniliklerin genellikle S-eğrisi şeklinde yayıldığı görülür (Grubler, 2012). İlk aşamalarda yüksek maliyet ve düşük yaygınlık nedeniyle sınırlı kabul gören yenilikler, teknik olgunluk ve maliyet düşüşüyle birlikte hızla benimsenir. Bu durum, günümüzde özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi teknolojilerinde gözlemlenmektedir. 2010 yılında 1 W'lık fotovoltaik kapasite 4–5 USD civarındayken, 2023'te bu değer 0,20 USD seviyesine kadar düşmüştür (IRENA, 2023). Aynı dönemde rüzgâr türbini birim maliyetleri %40'tan fazla azalmıştır (REN21, 2024). Bu dramatik düşüşler, yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlarla rekabet edebilir hale gelmesini sağlamıştır.

Verimlilik ve karbon yoğunluğu açısından bakıldığında, tarihsel eğilim oldukça belirgindir. 20. yüzyılın başında kömürle çalışan buhar türbinlerinin ortalama dönüşüm verimi %20–25 civarındayken, 1950'lerde petrol ve gaz santralleriyle bu oran %35 seviyesine çıkmıştır (Smil, 2015). 1980'lerde doğal gaz kombine çevrim (CCGT) teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla, ısı verimlilik %40–45 düzeyine ulaşmıştır (Jefferson, 2016). 21. yüzyılda ise yenilenebilir enerji teknolojileri – özellikle rüzgâr ve fotovoltaik sistemler – doğrudan ısı dönüşümü gerektirmediğinden, verimlilik kavramı “kaynak verimliliği” yerine “enerji dönüşüm etkinliği” bağlamında değerlendirilmektedir.

Bu eğilimlerin genel çerçevesi aşağıdaki şekilde özetlenebilir: 1900–1950 döneminde kömür, düşük verimlilikle yüksek karbon salınımına yol açarken; 1950–1980 arası petrol ve gaz geçişiyle verimlilik artmış, emisyonlar kısmen azalmıştır. 1980–2000 döneminde nükleer enerji ve gelişmiş doğalgaz çevrimleri emisyonları yarı yarıya düşürmüştür. 2000 sonrası dönemde ise rüzgâr ve güneş gibi kaynaklar karbon yoğunluğunu 100 gCO₂/kWh altına indirmiştir (IEA, 2023; IRENA, 2023). Bu, son yüzyılda elektrik üretiminin ortalama karbon yoğunluğunda yaklaşık %90'lık bir azalma anlamına gelir. Ancak dikkat çekici olan, dönüşüm veriminin bu süreçte yalnızca yaklaşık %20 artmış olmasıdır. Bunun nedeni, yenilenebilir sistemlerin doğrudan verimlilik yerine çevresel sürdürülebilirliği ve kaynak çeşitliliğini önceliklendirmesidir.

Aşağıda paylaşılan Tablo 1, 20. yüzyılın başından günümüze kadar elektrik üretim teknolojilerindeki temel göstergelerin değişimini özetlemektedir.

Tablo 1. Elektrik üretim teknolojilerinin tarihsel evrimi (1900–2020)

Dönem	Baskın Kaynak / Teknoloji	Ortalama Dönüşüm Verimi (%)	Karbon Yoğunluğu (gCO ₂ /kWh)	Ortalama Maliyet (LCOE, USD/MWh)	Dönemin Özellikleri
1900–1950	Kömür (buhar çevrimi)	20–25	~1100	150–200	Mekanik tabanlı üretim, düşük verim, yüksek kirlilik
1950–1980	Petrol / Doğal gaz (konvansiyonel)	30–35	~900	120–160	Fosil yakıtlarda genişleme, yüksek talep artışı
1980–2000	Doğal gaz (CCGT), Nükleer	38–45	~500	80–120	Verim artışı, nükleer genişleme, çevre bilincinin başlangıcı
2000–2020	Rüzgâr / Güneş / Hidro	35–45	50–100	30–60	Yenilenebilir devrimi, düşük karbon, dijital entegrasyon

Tablodaki veriler, son 120 yılda elektrik üretiminde yaşanan dönüşümün nicel yönünü açıkça göstermektedir. 1900’lerde kömürle çalışan buhar santrallerinin ortalama dönüşüm verimi yalnızca %20 civarındayken, 21. yüzyılda modern doğalgaz kombine çevrim santralleri %45’e ulaşmıştır. Ancak verim artışına rağmen karbon yoğunluğu azalışı çok daha dramatiktir: kömür döneminde 1100 gCO₂/kWh olan emisyon değeri, günümüzde ortalama 80 gCO₂/kWh seviyesine kadar gerilemiştir (IEA, 2023). Bu, yüzyıllık süreçte yaklaşık %93’lük bir karbon yoğunluğu azalımı anlamına gelmektedir.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, enerji teknolojilerinin maliyet yapısı da benzer bir evrim göstermiştir. Kömür santrallerinde enerji birim maliyeti (LCOE) 20. yüzyıl ortasında 150 USD/MWh civarındayken, modern rüzgâr santralleri 40 USD/MWh, fotovoltaiik sistemler ise 30 USD/MWh düzeyine kadar gerilemiştir (IRENA, 2024). Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik verimliliğin değil, aynı zamanda üretim ölçeği, yatırım risk yönetimi ve devlet teşviklerinin bir sonucudur. Sovacool (2016), yenilenebilirlerin bu hızlı maliyet düşüşünü “enerji

sistemlerinde endüstriyel öğrenme oranı” olarak tanımlar ve her kapasite iki katına çıktığında maliyetlerin ortalama %20 azaldığını belirtir.

Enerji sistemlerindeki bu yapısal değişim, jeopolitik ilişkileri de yeniden şekillendirmiştir. 20. yüzyılın ortasında petrol kaynakları üzerinde yoğunlaşan küresel rekabet, günümüzde lityum, kobalt, nikel ve nadir toprak elementleri gibi kritik madenler üzerinden sürmektedir (IEA, 2024). Bu durum, enerji arz güvenliği kavramını fosil rezervlerden teknoloji tedarik zincirlerine doğru kaydırmıştır. Yenilenebilir teknolojiler yerel kaynaklara dayandığı için, enerji üretimi giderek “merkezden çevreye” doğru dağılmakta, Sovacool’un (2016) deyimiyle “ademi-merkeziyet devrimi” yaşanmaktadır. Bu devrim, enerji üretiminde büyük ölçekli santrallerin yerini, yerel mikroşebekeler, prosumer yapılar ve enerji kooperatiflerine bırakmaktadır.

Çevresel boyut incelendiğinde, 20. yüzyıl boyunca enerji üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarının 2 Gt’den 35 Gt’ye yükselmesi (IEA, 2023) dramatik bir artış ortaya koymaktadır. Ancak 2010 sonrasında yenilenebilirlerin payının artmasıyla, küresel emisyon artış hızı önemli ölçüde yavaşlamıştır. IEA’nın (2021) “Net Zero by 2050” senaryosuna göre, küresel elektrik üretiminin 2050’ye kadar %90’ının düşük karbonlu kaynaklardan sağlanması gerekmektedir. Bu hedefin tutturulabilmesi, sadece teknolojik gelişime değil, aynı zamanda karbon fiyatlandırma mekanizmalarının küresel düzeyde uygulanmasına da bağlıdır (Stern, 2006). Bununla birlikte, enerji dönüşümünün çevresel sürdürülebilirliği yalnızca karbon salınımı ile sınırlı değildir. Hidroelektrik santrallerin ekolojik etkileri, PV panellerin atık yönetimi ve nükleer atıkların uzun ömürlü riskleri (Macfarlane & Ewing, 2022) sürdürülebilir enerji dönüşümünün karmaşıklığını artırmaktadır.

Geleceğe bakıldığında, elektrik üretim sistemlerinin yönü netleşmiştir: entegre, dijital ve karbon nötr. Hidrojen ekonomisi, özellikle yeşil hidrojen üretimi yoluyla, hem enerji depolama hem de taşımacılık sektörlerinde önemli bir rol üstlenecektir (IEA, 2021). Füzyon enerjisi ise halen deneysel aşamada olsa da, ITER ve NIF gibi projelerle ticari olgunluğa yaklaşmaktadır (Macfarlane & Ewing, 2022). Bununla birlikte, yapay zekâ tabanlı tahminleme, akıllı şebekeler ve enerji depolama teknolojileri, üretim-tüketim dengesini optimize eden yeni bir enerji ekosistemi yaratmaktadır (Fang et al., 2012; Lund et al., 2015).

Genel olarak değerlendirildiğinde, elektrik üretim teknolojilerinin evrimi insanlığın enerjiyle kurduğu ilişkinin sürekli yeniden tanımlandığını göstermektedir. Buhar makinesinden güneş paneline uzanan bu yolculukta temel amaç değişmemiştir: daha fazla güç, daha düşük maliyet ve daha az çevresel etki. Ancak araçlar, paradigma düzeyinde farklılaşmıştır. 19. yüzyılın fiziksel enerjisi yerini 20. yüzyılın kimyasal enerjisine, 21. yüzyılın dijital ve veri tabanlı enerji

anlayışına bırakmıştır. Bu geçiş, teknik ilerlemenin ötesinde, enerji üretimini bir kültürel dönüşüm haline getirmiştir. Geleceğin enerji sistemleri, sürdürülebilirlik, modülerlik ve dijital zekâ üçgeni üzerine inşa edilecek; enerji, sadece üretilen değil, dinamik olarak yönetilen bir varlık olacaktır (Sovacool & Geels, 2021; IEA, 2024).

4. Sonuçlar ve Gelecek Perspektifi

Elektrik üretim teknolojilerinin tarihsel evrimi, enerjinin insan uygarlığındaki merkezi rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır. 19. yüzyılın sonlarında buhar makineleriyle başlayan süreç, 21. yüzyılda yapay zekâ destekli yenilenebilir enerji sistemlerine ulaşmıştır. Bu uzun zaman diliminde enerji üretimi yalnızca bir mühendislik meselesi olmaktan çıkmış; ekonomik kalkınma, çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal refahın belirleyici unsuru haline gelmiştir (Smil, 2017; IEA, 2024).

Yapılan tarihsel analiz göstermektedir ki, her dönemin baskın enerji teknolojisi bir öncekine göre daha yüksek verimlilik, daha düşük maliyet ve daha az çevresel etki hedefiyle şekillenmiştir. 20. yüzyılın başında kömür temelli santrallerle %20 verimle başlayan yolculuk, 21. yüzyılda kombine çevrim santrallerinde %45 verim ve yenilenebilir kaynaklarda neredeyse sıfır karbon salınımı seviyesine ulaşmıştır (IRENA, 2023). Bu süreçte enerji üretiminin karbon yoğunluğu yaklaşık %90 azalmış, birim maliyetler ise 150 USD/MWh düzeyinden 40 USD/MWh seviyelerine kadar gerilemiştir. Böylesine bir değişim, yalnızca teknolojik yeniliklerle değil, aynı zamanda küresel enerji politikalarının dönüşümüyle mümkün olmuştur.

Ancak bu ilerleme çizgisi, enerji dönüşümünün tamamlandığı anlamına gelmemektedir. Aksine, günümüz enerji sistemleri yeni bir paradigma eşliğindedir. 21. yüzyılın ikinci yarısında elektrik üretimi, karbon nötr, entegre ve akıllı bir yapıya doğru evrilmektedir. IEA'nın (2021) Net Zero by 2050 senaryosuna göre, küresel elektrik üretiminin %90'ı yenilenebilir veya düşük karbonlu kaynaklardan sağlanacak; geri kalan küçük pay ise karbon yakalama ve depolama (CCUS) teknolojileriyle dengelenecektir. Bu hedefin gerçekleşmesi, yalnızca enerji üretim teknolojilerinde değil, enerji yönetimi, depolama, iletim ve tüketim alışkanlıklarında da köklü bir dönüşüm gerektirmektedir.

Geleceğin enerji sistemleri üç temel eksen etrafında şekillenecektir:

- Yeşil Hidrojen ve Füzyon Teknolojileri:

Hidrojen üretiminde elektroliz temelli çözümler (yeşil hidrojen), enerji depolama ve ulaşım sektörlerinin karbon ayak izini azaltacaktır (IEA, 2021). Füzyon enerjisi ise ITER ve NIF gibi projelerle ticari olgunluğa

yaklaşmakta ve 2040’lardan itibaren sınırlı pilot uygulamaların mümkün olacağı öngörülmektedir (Macfarlane & Ewing, 2022).

- Dijitalleşme ve Akıllı Şebekeler:

Yapay zekâ, büyük veri analitiği ve tahmin algoritmaları, enerji sistemlerini reaktif yapıdan proaktif yönetime taşıyacaktır. Akıllı sayaçlar, gerçek zamanlı yük dengeleme ve dağıtık üretim optimizasyonu, enerji verimliliğinde devrim yaratacaktır (Fang et al., 2012; Lund et al., 2015).

- Dağıtık ve Katılımcı Enerji Ekonomisi:

Enerji üretimi artık merkezi santrallerin tekeli olmaktan çıkmaktadır. Güneş panelleri, batarya sistemleri ve mikro şebekeler sayesinde bireyler aynı anda hem üretici hem tüketici (prosumer) haline gelmektedir (Rahman & Pipattanasomporn, 2010). Bu durum, Sovacool’un (2016) tanımıyla “enerji demokrasisi” çağını başlatmaktadır.

Bu üç eksenin kesişiminde esnek, otonom ve sürdürülebilir bir enerji altyapısı doğmaktadır. Gelecekte elektrik üretimi, yalnızca kilovat-saat bazında enerji sağlamakla kalmayacak; aynı zamanda veri, kontrol ve karar mekanizmalarıyla bütünleşmiş bir sistem kimliği kazanacaktır. Bu bağlamda enerji mühendisliği, klasik güç sistemlerinden “akıllı enerji mimarisi” anlayışına doğru kaymaktadır. Öte yandan, bu dönüşüm süreci teknik başarı kadar yönetim başarısı da gerektirir. Enerji dönüşümünün adil, kapsayıcı ve erişilebilir olması, küresel ölçekte ekonomik eşitsizliklerin derinleşmemesi açısından kritik önem taşır (Edenhofer et al., 2012). Yenilenebilir enerji yatırımlarının finansmanı, gelişmekte olan ülkelerin erişimi ve teknolojik bağımsızlık konuları, 2050 sonrası enerji politikalarının belirleyici unsurları olacaktır.

Sonuç olarak, elektrik üretim teknolojilerinin iki yüzyılı aşan gelişimi, insanlık tarihinin en kapsamlı teknolojik dönüşümlerinden birine işaret etmektedir. Buhar türbinlerinden yapay zekâ tabanlı mikro şebekelere uzanan bu yolculuk, yalnızca enerji üretiminde değil, medeniyetin yapısında da köklü bir değişimi simgelemektedir. Geleceğin enerjisi; temiz, akıllı ve erişilebilir olacaktır — fakat bu geleceğe ulaşmak, bugünden sürdürülebilir teknolojik vizyon, küresel iş birliği ve disiplinler arası mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir.

Kaynakça

- Ackermann, T., & Söder, L. (2002). An overview of wind energy-status 2002. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 67–127.
- Bowers, B. (1998). A history of electric light and power. Peter Peregrinus Ltd.
- Cowan, R. (1990). Nuclear power reactors: A study in technological lock-in. *The Journal of Economic History*, 50(3), 541–567.
- Edenhofer, O., et al. (Eds.). (2012). Renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge University Press (IPCC Special Report).
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid – The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944–980.
- Fouquet, R. (2010). The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy*, 38(11), 6586–6596.
- Grubler, A. (2012). Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy*, 50, 8–16.
- Hammond, J. L. (2001). Men and volts: The story of General Electric. Philadelphia: J. B. Lippincott Company.
- Hills, R. L. (1993). Power from steam: A history of the stationary steam engine. Cambridge University Press.
- Hughes, T. P. (1983). Networks of power: Electrification in Western society, 1880–1930. Johns Hopkins University Press.
- Hughes, T. P. (1998). Rescuing Prometheus. Pantheon Books.
- International Energy Agency (IEA). (2021). Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. Paris: IEA Publications.
- International Energy Agency (IEA). (2023). World energy outlook 2023. Paris: IEA Publications.
- International Energy Agency (IEA). (2024). Electricity market report 2024. Paris: IEA Publications.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Global renewables outlook: Energy transformation 2050. Abu Dhabi: IRENA.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable power generation costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). World energy transitions outlook: 1.5°C pathway. Abu Dhabi: IRENA.
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bazouin, G., et al. (2015). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for 139 countries. *Joule*, 1(1), 108–121.

- Jefferson, M. (2016). Energy transitions: Long-term perspectives and contemporary challenges. *Energy Research & Social Science*, 22, 122–131.
- Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2015). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556–565.
- Lund, P. D. (2019). Energy storage: Perspectives for 2020 and beyond. *Nature Energy*, 4, 294–296.
- Macfarlane, A., & Ewing, R. C. (Eds.). (2022). *Uncertainty underground: Yucca Mountain and the nation's high-level nuclear waste*. MIT Press.
- Nye, D. E. (1990). *Electrifying America: Social meanings of a new technology, 1880–1940*. MIT Press.
- Perrow, C. (1999). *Normal accidents: Living with high-risk technologies*. Princeton University Press.
- Rahman, S., & Pipattanasomporn, M. (2010). Emerging distributed generation and microgrid technologies. *IEEE Power & Energy Magazine*, 8(3), 66–75.
- REN21. (2022). *Renewables 2022 global status report*. Paris: REN21 Secretariat.
- REN21. (2024). *Global renewables outlook 2024*. Paris: REN21 Secretariat.
- Smil, V. (2015). *Power density: A key to understanding energy sources and uses*. MIT Press.
- Smil, V. (2017). *Energy and civilization: A history*. MIT Press.
- Sovacool, B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36(8), 2940–2953.
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202–215.
- Sovacool, B. K., & Geels, F. W. (2021). Further reflections on the temporality of energy transitions: A response to critics. *Energy Research & Social Science*, 73, 101868.
- Stern, N. (2006). *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press.
- UNFCCC. (2015). *The Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- World Nuclear Association. (2024). *World nuclear performance report 2024*. London: WNA.
- Woudhuysen, J., & Abley, I. (2004). *Energise!: A future for energy innovation*. Wiley.

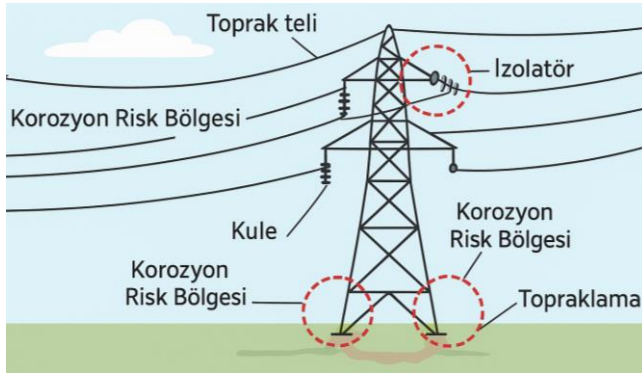
2. Bölüm

Yüksek Gerilim İletim Hatlarında Katodik Koruma Prensipleri ve Topraklama Sistemleri ile Etkileşimi

Bekir DURSUN¹

1. Giriş

Yüksek gerilim (YG) iletim hatları, elektrik enerjisinin üretim merkezlerinden tüketim noktalarına güvenilir ve ekonomik biçimde iletilmesini sağlayan en kritik altyapı elemanlarıdır. Bu hatların taşıyıcı sistemleri, genellikle galvanizli çelikten imal edilmiş direkler, ankraj elemanları, temel bağlantıları ve koruma hatlarından oluşur. Ancak söz konusu metalik aksamalar, sürekli olarak nem, tuz, asidik bileşikler ve diğer çevresel etkenlerle temas halinde olduklarından, elektrokimyasal korozyon sürecine maruz kalmaktadır (Uhlig & Revie, 2008).



Şekil 1. Yüksek Gerilim İletim Hattı Bileşenleri ve Korozyon Risk Bölgeleri

Korozyonun enerji iletim altyapısındaki etkisi yalnızca malzeme kaybı ile sınırlı değildir; aynı zamanda mekanik dayanımın azalması, iletim güvenliğinin düşmesi ve yüksek bakım maliyetleri gibi dolaylı sonuçlar da doğurur (CIGRÉ WG B2.42, 2018).

Özellikle Türkiye gibi dört mevsimin yaşandığı, toprak yapısının bölgesel olarak farklılık gösterdiği ülkelerde, korozyon hızları da büyük değişkenlik

¹ Öğr. Gör. Dr., Trakya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 22030, Edirne, bekirdursun@trakya.edu.tr ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7741-8873>

gösterir. Bu durum, korozyonun önlenmesine yönelik sistematik mühendislik çözümlerini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, katodik koruma yöntemi, metalik yapıların elektrokimyasal potansiyelinin kontrol edilmesi esasına dayanan en etkin koruma tekniklerinden biridir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, özellikle AC enterferansın neden olduğu korozyonun modelleme ve saha ölçümleriyle daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır (Farahani et al., 2024; Tiryaki & Uygun, 2022). İlk olarak 1824 yılında Sir Humphry Davy tarafından gemi gövdelerinde uygulanmış olan bu yöntem, günümüzde enerji iletim sistemlerinden boru hatlarına, depolama tanklarından deniz yapılarındaki çelik konstrüksiyonlara kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır (Bertolini et al., 2013). Katodik koruma ile hedeflenen, metal yüzeyin anodiklik özelliğini ortadan kaldırarak korozyon hücresinin çalışmasını durdurmaktır.

Tablo 1. Yüksek Gerilim İletim Hatlarında Korozyon Risk Faktörleri

Zemin Tipi	Özgül Direnç ($\Omega \cdot m$)	Nem Oranı (%)	pH Aralığı	Tuz Konsantrasyonu (mg/L)	Tipik Korozyon Hızı (mm/yıl)	Risk Düzeyi
Kuru, granitik	>1000	<5	6.0–7.5	<50	<0.01	Düşük
Kil ve nemli toprak	100–500	15–25	6.0–8.0	100–300	0.05–0.1	Orta
Asidik zemin (tarım alanı)	50–100	20–30	4.0–6.0	200–500	0.1–0.3	Yüksek
Tuzlu-sahil toprağı	<50	25–40	7.0–8.5	>1000	0.3–0.6	Çok yüksek

Tablo 1'e göre, toprak özgül direnci azaldıkça ve tuz konsantrasyonu arttıkça korozyon hızı belirgin şekilde artmaktadır. Sahil ve asidik tarım toprakları, yüksek nem ve iyonik iletkenlik nedeniyle en agresif ortamlardır. Bu nedenle kıyı bölgelerindeki direk temellerinde katodik koruma uygulanması, yüksek gerilim altyapısında önleyici bakım stratejilerinin en kritik bileşenidir.

Katodik koruma iki temel prensip üzerinden gerçekleştirilir: galvanik anot yöntemi ve dış akım kaynaklı sistem (ICCP). Galvanik anot sistemlerinde, çinko veya magnezyum gibi daha elektro-pozitif metaller kullanılarak çeliğin korozyonu engellenir (Chacko & Jayakumar, 2016). Dış akım sistemlerinde ise harici bir DC güç kaynağı ve inert anotlar yardımıyla sürekli koruma akımı sağlanır. ICCP sistemleri, özellikle yüksek öz dirençli topraklarda ve büyük

yapıların korunmasında yaygın olarak tercih edilmektedir (Zlatev & Petrov, 2018). Yüksek gerilim iletim hatlarında katodik koruma uygulaması, yalnızca korozyon önleme açısından değil, aynı zamanda topraklama sistemleriyle olan etkileşim bakımından da karmaşık bir mühendislik problemidir. Enerji tesislerinde topraklama sistemleri, işletme güvenliği, aşırı gerilimlerin sınırlandırılması ve yıldırımdan korunma için vazgeçilmezdir (IEEE Std 80-2013). Ancak topraklama elektrotlarının, katodik koruma anot sistemleriyle aynı bölgede bulunması durumunda, kaçak akımlar, potansiyel dengesizlikleri ve AC enterferansı gibi etkiler ortaya çıkabilmektedir (Vilnay & Poupard, 2007; Zhang et al., 2015).

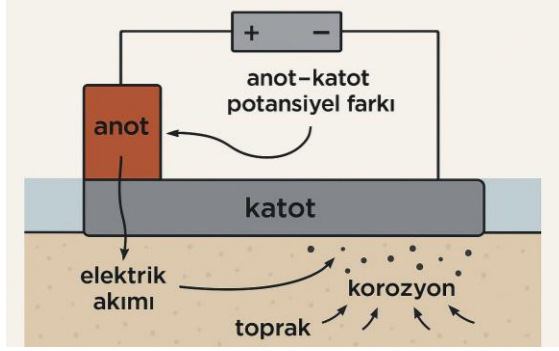
Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu iki sistemin bir arada güvenle çalıştırılabilmesi için izolasyon bağlantıları, dekaplaj cihazları ve uzaktan izleme sistemleri gibi çözümlerin etkin olduğunu göstermektedir. Örneğin Almanya’da yürütülen saha testlerinde, HV hatlarıyla paralel boru hatlarında kullanılan dekaplaj cihazlarının, AC enterferans kaynaklı korozyon hızını %60 oranında azalttığı rapor edilmiştir (Zhang et al., 2015). Bu çalışmanın amacı, yüksek gerilim iletim hatlarında katodik koruma uygulamalarını hem elektrokimyasal temelleriyle hem de topraklama sistemleriyle olan etkileşimiyle birlikte incelemektir. Ayrıca saha uygulamaları ve uluslararası standartlar doğrultusunda, etkin koruma tasarımı için mühendislik önerileri sunulacaktır.

2. Katodik Koruma Prensipleri

Katodik koruma, metalik yapıların elektrokimyasal korozyona karşı korunması için geliştirilen en etkili yöntemlerden biridir. Temel prensip, korunacak metal yüzeyin elektrokimyasal potansiyelini korozyonun gerçekleşmeyeceği bir aralığa düşürmektir. Bu yaklaşım, metalin bir katot gibi davranmasını sağlar; dolayısıyla çözünme (anodik reaksiyon) durur veya büyük ölçüde yavaşlar (Uhlig & Revie, 2008). Katodik koruma, genellikle iki farklı sistem üzerinden uygulanır: galvanik anot (fedakâr anot) yöntemi ve dış akım kaynaklı katodik koruma (Impressed Current Cathodic Protection – ICCP) sistemidir.

Korozyonun elektrokimyasal doğası, bu yöntemin bilimsel temelini oluşturur. Toprak veya su, çoğu durumda iletken bir elektrolit olarak davranır ve metal yüzeyinde anodik ve katodik bölgeler meydana getirir. Anodik bölgede metal çözünürken, katodik bölgede oksijen veya hidrojen indirgenmesi gerçekleşir. Bu reaksiyonlar bir galvanik hücreyi andırır ve serbest elektron akışıyla birlikte metal kaybı meydana gelir. Özellikle nemli, tuz oranı yüksek veya asidik zeminlerde bu reaksiyonlar hızlanır (Bertolini et al., 2013). Bu nedenle, yüksek

gerilim direklerinin toprakla temas eden bölümleri, korozyon açısından en savunmasız noktalar olarak kabul edilir.



Şekil 2. Katodik Koruma Prensibi: Anot–Katot Potansiyel Farkı

Galvanik anot yöntemi, katodik koruma uygulamaları arasında en eski ve en basit olanıdır. Bu yöntemde çinko, magnezyum veya alüminyum gibi daha elektro-pozitif potansiyele sahip metaller, korunacak yapıya elektriksel olarak bağlanır. Bu metaller kendilerini feda ederek anot görevi görür ve çeliğin korozyona uğramasını engeller. Galvanik sistemler enerji kaynağı gerektirmez, düşük akım ihtiyacı olan küçük yapılarda oldukça etkilidir. Ancak, anotun zamanla tükenmesi nedeniyle periyodik olarak değiştirilmesi gerekir ve yüksek dirençli topraklarda yeterli koruma sağlayamayabilir (Chacko & Jayakumar, 2016). Türkiye’de özellikle kıyı bölgelerinde, yüksek tuzluluk oranı ve nem nedeniyle galvanik anot sistemleri sıklıkla tercih edilmektedir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma (ICCP) sistemlerinde ise harici bir DC güç kaynağı kullanılır. Bu sistemlerde genellikle titanyum, grafit veya karma metal oksit (MMO) kaplamalı anotlar tercih edilir. Güç kaynağından sağlanan akım, metal yüzeyinin potansiyelini korozyon eşiğinin altına çeker. ICCP sistemleri, geniş yüzey alanına sahip veya yüksek toprak direncine sahip bölgelerde bulunan yapılarda etkin bir çözüm sunar (Zlatev & Petrov, 2018). Bununla birlikte, sistemin sürekli güç kaynağına bağımlı olması ve periyodik olarak izlenmesi gerekliliği, bakım açısından dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde IoT tabanlı uzaktan izleme sistemleri, ICCP performansının anlık olarak denetlenmesini ve koruma akımlarının optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Son dönemde SCADA tabanlı izleme (Gao & Liu, 2021) ve yapay zekâ destekli potansiyel kontrolü (Li & Wang, 2023) katodik koruma performansını önemli ölçüde geliştirmiştir.

Yüksek gerilim (YG) iletim hatlarında katodik koruma uygulamaları, klasik boru hattı veya tank sistemlerinden farklı zorluklar içerir. Bu sistemlerde sadece

korozyon mekanizması değil, aynı zamanda elektriksel etkileşimler de dikkate alınmalıdır. YG hatlarının oluşturduğu alternatif manyetik alanlar, katodik koruma devrelerinde indüklenen akımların yönünü değiştirebilir ve koruma potansiyelinin sürekliliğini bozabilir. Bu olgu literatürde AC enterferansı olarak tanımlanmakta ve özellikle yüksek gerilim hatlarının boru hatlarıyla paralel geçtiği bölgelerde ciddi sorunlara yol açmaktadır (Zhang, Zhao, & Wang, 2015). Ayrıca doğru akım (DC) iletim sistemlerinde (HVDC hatları), toprak dönüş akımı korozyon hızını artırabileceği için, özel izolasyon önlemleri alınması gerekmektedir (Vilnay & Poupard, 2007).

Katodik koruma sistemlerinin tasarımı ve performans değerlendirmesi, uluslararası standartlar çerçevesinde yürütülmelidir. IEC 60364-5-54 (2011) standardı, topraklama ve katodik koruma sistemlerinin birlikte çalıştığı durumlarda güvenli potansiyel sınırlarını belirlerken; IEEE Std 80-2013 standardı ise AC sistemlerdeki topraklama tasarımı ve temas gerilimleri konularında rehberlik sağlar. Ayrıca CIGRÉ Working Group B2.42 (2018), yüksek gerilim direklerinde korozyonun azaltılması için malzeme seçimi, kaplama türleri ve koruma stratejileri hakkında teknik öneriler sunmuştur.

Tablo 2, galvanik ve dış akım sistemlerinin uygulama ölçekleri açısından belirgin farklarını göstermektedir. Galvanik sistemler düşük maliyetli ve enerji bağımsız yapılarıyla avantaj sağlarken, ICCP sistemleri uzun ömürlü, yüksek akım kapasitesi ve uzaktan kontrol olanaklarıyla büyük tesislerde üstünlük sağlamaktadır. Bu nedenle, yüksek gerilim hatlarının geniş koruma gerektiren altyapısında genellikle dış akım sistemleri tercih edilir.

Tablo 2. Katodik Koruma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Özellik	Galvanik Anot Sistemi	Dış Akım Kaynaklı (ICCP) Sistem
Güç kaynağı gereksinimi	Yok	Harici DC güç kaynağı
Tipik anot malzemesi	Zn, Mg, Al	MMO, Ti, Grafit
Akım kapasitesi	Düşük (0.1–1 A)	Yüksek (1–100 A)
Bakım sıklığı	3–5 yıl	10–15 yıl
Kurulum maliyeti	Düşük	Yüksek
Toprak direncine duyarlılık	Yüksek	Düşük
Uygulama ölçeği	Küçük alanlar	Geniş altyapılar
Kontrol kabiliyeti	Pasif	Uzaktan izlenebilir (SCADA)

Sonuç olarak, katodik koruma yöntemleri, yüksek gerilim iletim hatlarının uzun ömürlü ve güvenli çalışması için vazgeçilmezdir. Ancak, uygulamanın etkinliği; doğru anot tipinin seçilmesi, toprak direncinin analizi, AC/DC

enterferans etkilerinin dikkate alınması ve sistemin sürekli izlenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Günümüzde uzaktan izleme teknolojileri, sensör tabanlı potansiyel ölçümleri ve SCADA entegrasyonu sayesinde katodik koruma, yalnızca pasif bir önlem olmaktan çıkıp aktif bir izleme sistemine dönüşmüştür.

3. Topraklama Sistemleri ile Etkileşim

Topraklama sistemleri, yüksek gerilim tesislerinde işletme güvenliği, insan koruması ve ekipman bütünlüğü açısından vazgeçilmez bir bileşendir. Temel amaç, arıza veya yıldırım gibi olağanüstü durumlarda meydana gelebilecek yüksek potansiyellerin, güvenli bir şekilde toprağa aktarılmasıdır. Bununla birlikte, aynı toprak ortamında katodik koruma sistemleri de bulunuyorsa, bu iki yapının birbirini etkileme olasılığı oldukça yüksektir. Bu nedenle, katodik koruma ve topraklama sistemleri arasındaki etkileşimin doğru analiz edilmesi, hem korozyon korumasının hem de elektriksel güvenliğin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (IEEE Std 80-2013).

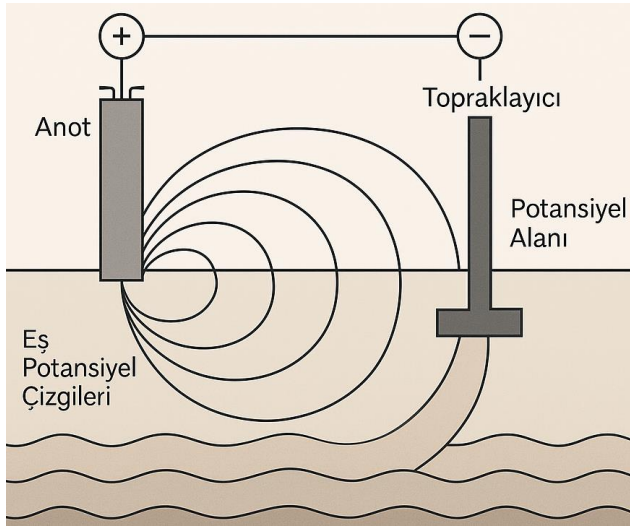
Yüksek gerilim iletim hatlarında kullanılan topraklama sistemleri genellikle üç ana işlevi yerine getirir: işletme topraklaması, koruma topraklaması ve yıldırımdan korunma topraklaması. İşletme topraklaması, sistemin nötr noktasının belirli bir potansiyelde tutulmasını sağlar; böylece faz-toprak arızalarında aşırı gerilimlerin önüne geçilir. Koruma topraklaması, insan güvenliği için arıza akımlarının düşük empedanslı bir yol üzerinden toprağa akmasını sağlar. Yıldırımdan korunma sistemleri ise özellikle açık arazilerdeki direklerde, yıldırım akımlarının güvenli bir şekilde dağıtılmasını hedefler (IEC 60364-5-54, 2011). Bu üç sistem birlikte çalışırken, toprağın elektriksel özellikleri —özellikle özgül direnç, nem, iyonik yapı ve sıcaklık— hem topraklama verimini hem de katodik koruma performansını belirleyen temel faktörlerdir.

Katodik koruma sistemleri, korunacak metal yüzeyi elektrokimyasal olarak daha negatif potansiyele çekerek korozyonu önler. Ancak bu potansiyel farkı, aynı bölgede bulunan topraklama elektrotlarının potansiyel dağılımını etkileyebilir. Örneğin, dış akım kaynaklı katodik koruma (ICCP) sistemlerinde kullanılan DC akım, topraklama sistemine yakın bir bölgede sızıntı akımı oluşturabilir. Bu sızıntı, topraklama direncinde dalgalanmalara ve temas gerilimlerinde değişimlere yol açabilir (Zlatev & Petrov, 2018). Bunun tersine, yüksek gerilim tesislerinden toprağa akan kaçak akımlar, katodik koruma potansiyelini yükselterek sistemin verimini düşürebilir veya anodik bölgelerde korozyon hızını artırabilir (Vilnay & Poupard, 2007).

Bu etkileşimin bir diğer boyutu AC enterferansıdır. Alternatif akım taşıyan yüksek gerilim hatlarının yakınında bulunan metalik yapılarda elektromanyetik

indüksiyon sonucu gerilimler oluşabilir. Bu etkileşim, özellikle boru hattı – enerji hattı yakınsamasında belirginleşmekte ve topraklama akımlarının dinamik dağılımını değiştirmektedir (Ouadah et al., 2017; Fang et al., 2022). Bu gerilimler, katodik koruma devrelerinde istenmeyen akım akışına neden olarak anot-katot potansiyel dengesini bozar. Özellikle iletim hatlarının boru hatlarıyla paralel geçtiği bölgelerde, bu enterferansın neden olduğu korozyon olayları saha ölçümleriyle belgelenmiştir (Zhang, Zhao, & Wang, 2015). AC enterferansın etkisi, hattın uzunluğu, iletim akımı, hat-toprak mesafesi ve toprak iletkenliği gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir.

Bu tür problemlerin önlenmesi için mühendislik literatüründe bir dizi çözüm yöntemi geliştirilmiştir. En yaygın yaklaşım, katodik koruma ve topraklama sistemlerinin elektriksel izolasyonla birbirinden ayrılmasıdır. Bu izolasyon, hem doğrudan bağlantı noktalarında hem de ölçüm devrelerinde uygulanabilir. Diğer bir çözüm, dekaplaj cihazlarının (decoupling devices) kullanılmasıdır. Bu cihazlar, AC akımların güvenli şekilde toprağa geçişine izin verirken, DC katodik koruma akımlarının korunmasını sağlar. Böylece her iki sistemin görevini bağımsız biçimde sürdürmesi mümkün olur (Chacko & Jayakumar, 2016).



Şekil 3. Katodik Koruma ve Topraklama Sistemleri Arasındaki Potansiyel Alan Dağılımı

Bazı durumlarda, özellikle HVDC hatlarında toprak dönüş akımlarının neden olduğu korozyon etkilerini sınırlamak için drenaj sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, istenmeyen akımların düşük empedanslı yollar üzerinden güvenli biçimde toprağa taşınmasını sağlar (Bertolini et al., 2013). Ayrıca IEEE Std 80-

2013 ve IEC 60364-5-54 standartları, topraklama ve katodik koruma sistemleri arasında minimum fiziksel mesafelerin korunmasını önermektedir. Bu mesafeler, potansiyel gradyanların çakışmasını önlemek amacıyla belirlenmiştir ve tipik olarak birkaç metreden onlarca metreye kadar değişebilir (CIGRÉ WG B2.42, 2018).

Son yıllarda yapılan saha araştırmaları, katodik koruma-topraklama etkileşiminin sayısal modelleme ve izleme teknolojileri ile optimize edilebileceğini göstermiştir. Finite Element Method (FEM) tabanlı potansiyel dağılım analizleri, hem koruma akımının yayılımını hem de topraklama sisteminin etkisini aynı anda inceleme imkânı sunmaktadır. Bu tür analizlerin, özellikle toprak özgül direncinin heterojen olduğu bölgelerde daha doğru tasarım sonuçları verdiği rapor edilmiştir (Elsener, 2001). Ayrıca uzaktan izleme (remote monitoring) ve IoT tabanlı sensör sistemleri sayesinde, katodik koruma potansiyelleri ve topraklama dirençleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, olası enterferans etkileri erken tespit edilebilmektedir.

Tablo 3, katodik koruma ile topraklama sistemleri arasındaki başlıca etkileşim biçimlerini özetlemektedir. Özellikle AC enterferansı ve kaçak akımlar, koruma akımının yönünü değiştirerek sistem verimini düşürmektedir. Bu etkileşimlerin kontrol altına alınması, sistemlerin birbirinden elektriksel olarak izole edilmesi ve uygun dekuplaj cihazlarının seçimiyle mümkündür.

Tablo 3. Katodik Koruma ve Topraklama Arasındaki Etkileşim Türleri

Etkileşim Türü	Neden	Teknik Etkisi	Muhtemel Sonuç	Çözüm Yaklaşımı
AC enterferansı	Yakın HV hatlarından elektromanyetik indüksiyon	Katodik koruma potansiyeli bozulur	Yetersiz koruma, anot aşırı yüklenmesi	Dekuplaj cihazı, drenaj hattı
Kaçak akım geçişi	Arıza veya zayıf izolasyon	DC akım dağılımı değişir	Anot-toprak dengesizliği	İzolasyon bariyerleri, mesafe artırımı
Potansiyel dengesizliği	Toprak heterojenliği	Potansiyel farkları oluşur	Lokal korozyon bölgeleri	FEM analizi, anot yerleşim optimizasyonu
Ortak topraklama noktası	Katodik koruma-topraklama birleşimi	Koruma akımı topraklamaya kaçır	Koruma verimi düşer	Ayrık topraklama veya izolasyon bağlantısı

Özetle, katodik koruma ve topraklama sistemlerinin etkileşimi, yüksek gerilim tesislerinde sadece bir tasarım problemi değil, aynı zamanda dinamik bir izleme gerektiren bir mühendislik konusudur. Etkili bir çözüm; toprak özelliklerinin doğru analiz edilmesi, sistemlerin elektriksel izolasyonunun sağlanması, AC/DC enterferansın azaltılması ve uluslararası standartlara uygun koordinasyonun sürdürülmesi ile mümkündür. Bu yaklaşım, hem korozyonun önlenmesini hem de enerji sisteminin güvenli ve kesintisiz çalışmasını garanti altına alır.

4. Örnek Uygulamalar ve Saha Çalışmaları

Katodik koruma uygulamalarının yüksek gerilim iletim hatlarında pratik karşılığı, farklı coğrafyalarda yürütülen saha çalışmalarıyla somutlaşmıştır. Bu çalışmalar, gerek malzeme seçimi gerekse topraklama koordinasyonu açısından değerli mühendislik deneyimleri sunmaktadır.

Türkiye’de, TEİAŞ tarafından işletilen yüksek gerilim hatlarının büyük bir kısmı açık arazilerden ve farklı iklim koşullarından geçtiği için korozyon riski bölgesel olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle kıyı bölgelerinde, tuz oranı yüksek zeminlerde direk temellerinde ciddi korozyon sorunları gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde genellikle galvanik anot sistemleri uygulanmakta; çinko veya alüminyum anotlar direk ayaklarına bağlanarak koruma sağlanmaktadır. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, enerji kaynağı gerektirmemesi ve bakım kolaylığıdır. Ancak yapılan saha gözlemleri, yüksek dirençli kuru topraklarda bu yöntemin yetersiz kaldığını ve anotların ömrünün beklenenden kısa olduğunu göstermiştir (CIGRÉ WG B2.42, 2018). Buna karşılık yeraltı kablolu sistemlerde ve şehir içi trafo merkezlerinde, dış akım kaynaklı katodik koruma (ICCP) sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. İstanbul ve Ankara gibi büyük şehirlerde yeraltı yüksek gerilim kablolarının ek kutuları, metal kılıflar ve bağlantı flanşları, DC beslemeli ICCP sistemleriyle korunmaktadır. Bu sistemlerde titanyum veya MMO (mixed metal oxide) anotlar kullanılarak uzun ömürlü ve kararlı koruma sağlanmaktadır. Ayrıca uzaktan izleme üniteleri sayesinde anot potansiyelleri ve koruma akımları sürekli olarak SCADA üzerinden takip edilmektedir. Türkiye’de yapılan bazı uygulamalarda, bu sistemlerin beş yıldan uzun süre boyunca stabil potansiyel seviyeleri sağladığı ve bakım gereksinimlerini %40 oranında azalttığı rapor edilmiştir (TEİAŞ Teknik Dairesi, 2020).

Uluslararası ölçekte değerlendirildiğinde, HVDC (yüksek gerilim doğru akım) iletim hatlarında katodik koruma uygulamaları farklı bir mühendislik yaklaşımı gerektirir. DC sistemlerde toprak üzerinden akan dönüş akımı, anot ve katot bölgelerinde potansiyel farkları oluşturarak korozyon riskini artırır. Norveç

ile Hollanda arasında işletilen NorNed HVDC bağlantısında, denizaltı kablo terminasyon noktalarında özel olarak tasarlanmış ICCP sistemleri kullanılmıştır. Burada anot yatakları deniz suyunun düşük öz direncinden faydalanacak şekilde yatay düzlemde yerleştirilmiş, DC akım sızıntısının azaltılması için anot-toprak mesafesi optimize edilmiştir (Bertolini et al., 2013). Benzer şekilde, Baltic Cable projesinde, anot sistemleri toprak dönüş akımına paralel çalışacak biçimde konumlandırılmış ve korozyon etkilerinin azaltıldığı rapor edilmiştir.

ABD ve Kanada’da yürütülen saha uygulamaları, özellikle enerji iletim hatlarının doğal gaz boru hatlarıyla paralel geçtiği bölgelerde AC enterferansın ciddi bir sorun olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, son dönem modelleme çalışmaları AC hatlarının potansiyel dağılım üzerindeki etkisini detaylı biçimde ortaya koymuştur (Zhang et al., 2023). Bu tür durumlarda, boru hattı üzerindeki potansiyel farkların 15–30 V aralığında değiştiği ve bu farkların hem güvenlik hem de korozyon açısından risk oluşturduğu belirlenmiştir (Zhang, Zhao, & Wang, 2015). Bu etkiyi azaltmak için dekaplaj cihazları ve AC drenaj sistemleri kullanılmış; yapılan ölçümler sonucunda, korozyon hızının %60’a kadar azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle büyük enerji şirketleri, bu cihazların saha dayanıklılığını artırmak için galvanik ve aktif filtreleme yöntemlerini birlikte kullanmaya başlamıştır.

Rusya ve Orta Asya örneklerinde ise geniş açık arazilerdeki yüksek toprak direnci, katodik koruma tasarımında en büyük zorluk olarak öne çıkmaktadır. 500 kV seviyesindeki uzun mesafeli hatlarda, yüksek öz dirençli topraklarda yeterli akım dağılımını sağlamak için büyük anot yatakları (anode bed) kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, anotlar genellikle 30–50 metre derinliğe yerleştirilerek daha nemli katmanlardan yararlanılmakta ve toprak direnci düşürülmektedir (Zlatev & Petrov, 2018). Kazakistan’daki saha uygulamalarında, HV hatları ile paralel ilerleyen boru hatlarında AC enterferansın etkisini azaltmak için “yeraltı drenaj kabloları” ve reaktif topraklama sistemleri kullanılmıştır.

Tablo 4. Türkiye ve Dünyada Katodik Koruma Uygulama Örnekleri

Ülke / Bölge	Uygulama Alanı	Sistem Türü	Anot Malzemesi	İzleme Yöntemi	Elde Edilen Sonuç
Türkiye (Ege kıyısı)	YG direk temelleri	Galvanik anot	Zn	Periyodik ölçüm	Korozyon %70 azalma
Türkiye (İstanbul)	Yeraltı kablo ek kutuları	ICCP	MMO/Ti	SCADA uzaktan izleme	Bakım süresi %40 kısalma
Norveç–Hollanda (NorNed HVDC)	Denizaltı kablo terminasyonu	ICCP	MMO	Sürekli izleme	DC sızıntısı minimize edildi
ABD (Teksas)	YG hattı–boru hattı paralel geçişi	ICCP + dekaplaj	MMO + drenaj hattı	Online ölçüm	AC enterferansı %60 azalma
Kazakistan (step bölgesi)	500 kV direk temelleri	Galvanik + drenaj sistemi	Mg	Manuel ölçüm	Direnç düşürme ile stabil koruma

Bu saha uygulamalarından çıkarılan temel sonuç, katodik koruma sistemlerinin başarısının büyük ölçüde yerel toprak özellikleri, sistem topolojisi ve bakım stratejilerine bağlı olduğudur. Galvanik anot sistemleri düşük maliyetli ve basit çözümler sağlarken, geniş ölçekli projelerde dış akım sistemleri daha uzun ömürlü ve kontrollü koruma sunmaktadır. Dekuplaj cihazları, özellikle topraklama sistemleriyle etkileşimde en etkili çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanında, uzaktan izleme teknolojilerinin (SCADA, IoT sensörleri) kullanımı, hem anlık potansiyel kontrolü hem de erken arıza tespiti açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Tablo 4, farklı iklim ve toprak koşullarında uygulanan katodik koruma sistemlerinin performansını karşılaştırmaktadır. Türkiye’de galvanik sistemler kıyı alanlarında başarılı olurken, şehir içi altyapılarda ICCP sistemleri uzaktan izleme avantajı sağlamıştır. HVDC projelerinde ise özel tasarlanmış anot yatakları ve drenaj sistemleri, korozyon kontrolünü güçlendirmiştir. Bu saha deneyimleri, uygun malzeme seçimi ve izleme teknolojilerinin sistem başarısında belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, dünya genelindeki saha verileri, yüksek gerilim iletim hatlarında katodik korumanın artık sadece pasif bir koruma yöntemi olmaktan çıktığını, aktif olarak izlenen ve optimize edilen bir mühendislik sistemine dönüştüğünü göstermektedir. Türkiye’de ve benzer iklim koşullarına sahip

bölgelerde, bu sistemlerin yerel toprak özellikleri, iklim parametreleri ve işletme koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi, enerji iletim altyapısının uzun ömürlülüğü açısından stratejik bir gereklilik haline gelmiştir.

5. Sonuç ve Gelecek Perspektifler

Yüksek gerilim iletim hatlarında kullanılan metalik yapıların korozyondan korunması, enerji iletim sistemlerinin sürekliliği ve güvenliği açısından temel bir mühendislik gerekliliğidir. Özellikle açık arazilerde, yüksek nemli veya tuzlu topraklarda, direk ayakları ve ankraj sistemleri en çok korozyona maruz kalan bileşenlerdir. Katodik koruma yöntemleri —özellikle galvanik anot ve dış akım kaynaklı sistemler— bu tür yapıların ömrünü uzatmakta ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Bertolini et al., 2013; CIGRÉ WG B2.42, 2018).

Bu çalışmada ele alınan bulgular, yüksek gerilim iletim hatlarında katodik koruma uygulamalarının yalnızca malzeme dayanımını artırmakla kalmadığını, aynı zamanda enerji iletim güvenliğine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir. Ancak, katodik koruma sistemlerinin topraklama altyapısıyla etkileşimi dikkatle tasarlanmadığında, koruma etkinliği azalabilmekte ve beklenmedik arıza potansiyelleri oluşabilmektedir. Özellikle AC enterferansı ve kaçak akımlar, hem katodik koruma potansiyellerini hem de topraklama sisteminin temas gerilimlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Zhang, Zhao, & Wang, 2015). Bu nedenle, izolasyon yöntemlerinin, dekuplaj cihazlarının ve drenaj sistemlerinin koordineli biçimde uygulanması, sistem güvenilirliği açısından zorunludur (Chacko & Jayakumar, 2016).

Modern enerji altyapısında dijitalleşme eğilimleri, katodik koruma uygulamalarını da dönüştürmektedir. Günümüzde birçok ülkede katodik koruma sistemleri, IoT tabanlı sensörler ve SCADA entegrasyonları ile uzaktan izlenmekte; koruma potansiyelleri anlık olarak analiz edilmekte ve veri tabanlı kestirim algoritmalarıyla arıza öncesi bakım planları yapılabilmektedir. Bu yaklaşımlar, sadece bakım sürekliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin enerji verimliliğini de optimize eder. Türkiye’de ve Avrupa’da yürütülen saha projelerinde, bu teknolojilerin bakım maliyetlerini %30–40 oranında düşürdüğü rapor edilmiştir (TEİAŞ Teknik Dairesi, 2020).

Geleceğe yönelik olarak, katodik koruma sistemlerinin başarısında üç temel gelişme alanı öne çıkmaktadır. Yeni standartlar (ISO 15589-1, 2020) ve son literatür (Farahani et al., 2024) koruma potansiyel sınırlarının yeniden tanımlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Birincisi, gelişmiş anot malzemeleridir. Nano-kaplamalı titanyum veya karma metal oksit (MMO) anotlar, daha uzun ömürlü, daha düşük bakım gerektiren ve çevresel etkiler karşısında kararlı sistemler sunmaktadır. İkincisi, sayısal modelleme ve yapay

zekâ tabanlı izleme yaklaşımlarıdır. Finite Element Method (FEM) analizleri ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla toprak potansiyel dağılımları ve anot akım yoğunlukları önceden tahmin edilebilmekte, böylece sistem parametreleri sahaya çıkmadan optimize edilebilmektedir (Elsener, 2001). Üçüncüsü ise, standardizasyon ve bütünleşik tasarım yaklaşımlarıdır. IEC ve IEEE standartlarının, enerji iletim sistemlerinde katodik koruma-topraklama koordinasyonuna ilişkin bölümlerinin genişletilmesi, uluslararası düzeyde tasarım birliği ve güvenlik standardı sağlamaktadır (IEC 60364-5-54, 2011; IEEE Std 80-2013).

Sonuç olarak, yüksek gerilim iletim hatlarında katodik koruma artık yalnızca korozyonu önleyen bir yardımcı sistem değil, güç altyapısının sürdürülebilirliğini belirleyen aktif bir mühendislik bileşenidir. Bu sistemlerin doğru tasarımı, topraklama ile koordinasyonu ve sürekli izlenmesi, hem işletme güvenliğini hem de ekonomik verimliliği artırmaktadır. Geleceğin akıllı enerji iletim altyapılarında, katodik koruma sistemleri; sensör tabanlı, veri odaklı ve otonom şekilde optimize edilen bir yapıya evrilecektir. Bu dönüşüm, enerji sektörünün dijitalleşme sürecine paralel olarak, güç sistemlerinin hem güvenilirliğini hem de çevresel sürdürülebilirliğini destekleyecektir.

Kaynakça

- Al-Ahmad, S., & Peabody, A. W. (2021). Advances in cathodic protection monitoring and remote sensing for buried structures. *Journal of Corrosion Science and Engineering*, 9(4), 202–214.
- Azoor, R. M., Deo, R. N., Birbilis, N., & Kodikara, J. K. (2018). Coupled electrochemical–soil model to evaluate the influence of soil aeration on underground metal pipe corrosion. *Corrosion*, 74, 1177–1191.
- Babaghayou, F., Zegnini, B., & Seghier, T. (2018). Experimental and numerical investigations of the effect of alternating current interference corrosion on neighboring pipelines. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 19, 134–145.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair*. Wiley-VCH.
- Chacko, R., & Jayakumar, K. (2016). Cathodic protection system design for steel structures. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(3), 300–305.
- Chen, Z., Koleva, D., & van Breugel, K. (2017). A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure. *Corrosion Reviews*, 35, 397–423.
- CIGRÉ Working Group B2.42. (2018). Corrosion and protection of overhead line steel structures. CIGRÉ Technical Brochure No. 713.
- Cui, G., Li, Z. L., Yang, C., & Wang, M. (2016). The influence of DC stray current on pipeline corrosion. *Petroleum Science*, 13, 135–145.
- Dai, M., Liu, J., Huang, F., Zhang, Y., & Cheng, Y. F. (2017). Effect of cathodic protection potential fluctuations on pitting corrosion of X100 pipeline steel in acidic soil environment. *Corrosion Science*, 143, 428–437.
- Dey, T., & Mukherjee, R. (2020). Performance evaluation of impressed current cathodic protection systems under varying soil resistivity. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(5), 4849–4863.
- Elsener, B. (2001). Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures. *Construction and Building Materials*, 15(3), 133–139.
- Fang, Y., Zhang, L., & Zhao, H. (2022). Field investigation of cathodic protection interference by power system grounding currents. *Electrical Power and Energy Systems*, 137, 107915.
- Farahani, E. M., Su, Y., Chen, X., Wang, H., Laughorn, T. R., Onesto, F., Zhou, Q., & Huang, Q. (2024). AC corrosion of steel pipeline under cathodic protection: A state-of-the-art review. *Materials and Corrosion*, 75, 290–314.

- Gao, J., & Liu, Q. (2021). Integration of SCADA-based remote monitoring in cathodic protection systems for transmission infrastructure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(5), 4114–4122.
- IEC 60364-5-54. (2011). Low-voltage electrical installations – Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors. International Electrotechnical Commission.
- IEEE Std 80-2013. (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Power and Energy Society.
- ISO 15589-1. (2020). Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems — Part 1: Onshore pipelines. International Organization for Standardization.
- Jiang, Z., Du, Y., Lu, M., Zhang, Y., Tang, D., & Dong, L. (2014). New findings on the factors accelerating AC corrosion of buried pipeline. *Corrosion Science*, 81, 1–10.
- Kuang, D., & Cheng, Y. F. (2017). Effects of alternating current interference on cathodic protection potential and its effectiveness for corrosion protection of pipelines. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52, 22–28.
- Li, D., & Wang, K. (2023). AI-assisted optimization of cathodic protection potential control in HVDC grounding systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106810.
- Liang, H., Wu, Y., Han, B., Lin, N., Wang, J., Zhang, Z., & Guo, Y. (2024). Corrosion of buried pipelines by stray current in electrified railways: Mechanism, influencing factors, and protection. *Applied Sciences*, 15, 264.
- Ormellese, M., Brenna, A., & Lazzari, L. (2015). AC corrosion of cathodically protected buried pipelines: Critical interference values and protection criteria. NACE Corrosion Conference Proceedings, Dallas, TX.
- Ouadah, M., Touhami, O., Ibtouen, R., Benlamnouar, M. F., & Zergoug, M. (2017). Corrosive effects of the electromagnetic induction caused by high-voltage power lines on buried X70 steel pipelines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 91, 34–41.
- Shabangu, T. H., Shrivastava, P., Abe, B. T., Adedeji, K. B., & Olubambi, P. A. (2017). Influence of AC interference on the cathodic protection potentials of pipelines: Towards a comprehensive picture. *Proceedings of IEEE AFRICON 2017*, Cape Town, South Africa, 597–602.
- Shipilov, S. A., & Le May, I. (2006). Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection. *Engineering Failure Analysis*, 13, 1159–1176.
- TEİAŞ Teknik Dairesi. (2020). Yüksek gerilim iletim hatlarında korozyon ve katodik koruma uygulamaları raporu. TEİAŞ Yayınları.

- Tiryaki, A., & Uygun, C. (2022). Evaluation of cathodic protection interference in power transmission towers using FEM analysis. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(3), 1257–1269.
- Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (2008). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering* (4th ed.). Wiley.
- Vilnay, O., & Poupard, O. (2007). Influence of stray currents on the durability of reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 856–865.
- Wang, X., Xu, C., Liu, Q., Tu, C., Chen, Y., & Li, Y. (2017). Effects of stray AC on delamination of epoxy coatings with defects in 3.5% NaCl solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 12, 6520–6534.
- Zhang, B., Li, L., Zhang, Y., & Wang, J. (2023). Study on the interference law of AC transmission lines on the cathodic protection potential of long-distance transmission pipelines. *Magnetochemistry*, 9, 75.
- Zhang, J., Zhao, Y., & Wang, L. (2015). AC interference and mitigation on pipelines near high-voltage power lines. *Corrosion Science*, 97, 83–92.
- Zlatev, Z., & Petrov, P. (2018). Cathodic protection of underground steel structures under high voltage power lines. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 8(2), 151–162.

3. Bölüm

Sağlık Sektöründe Büyük Veri

Ceren ÜNLÜKAL¹, Elifcan GÖÇMEN POLAT², Andaç İMAK³

Giriş

Son yıllarda, teknoloji alanında yaşanan hızlı ilerlemelerle birlikte veri kavramı giderek daha fazla önem kazanmıştır. Dijital çağda her gün milyonlarca, hatta milyarlarca veri parçası üretilmektedir. Bu veriler; internet kullanımı, mobil cihazlar, sensörler, sosyal medya platformları, akıllı nesneler ve sağlık hizmetleri gibi çok çeşitli kaynaklardan elde edilmektedir. Büyük Veri (Big Data), bu büyük miktardaki yapılandırılmış ve yapılandırılmamış veri setlerini işlemek, depolamak ve analiz etmek için kullanılan bir kavram olarak tanımlanır (Altındış & Kıran Morkoç, 2018). Büyük veri yalnızca veri hacmiyle değil, aynı zamanda verinin hızı (velocity), çeşitliliği (variety), doğruluğu (veracity) ve değeri (value) ile de karakterize edilir (Batko & Ślęzak, 2022).

Büyük veri, farklı kaynaklardan hızlı bir şekilde toplanan ve geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek kadar büyük, çeşitli ve hızlı verilerin analiz edilmesini ifade eder. Bu kavram, işletmelerin ve kurumların karar alma süreçlerini geliştirmesine, rekabet avantajı elde etmesine ve iş süreçlerini optimize etmesine olanak sağlar (Altınbaş, 2018). Büyük veri analitiği, veri madenciliği, makine öğrenimi ve yapay zeka gibi ileri düzey analiz tekniklerini içerir. Bununla birlikte, veri güvenliği ve gizliliği konularında yaşanan zorluklar, büyük verinin etkin şekilde kullanılabilmesi için dikkate alınması gereken önemli unsurlar arasında yer alır (World Economic Forum, 2024).

Sağlık sektörü, büyük veri açısından en yoğun veri üretiminin gerçekleştiği alanlardan biridir. Elektronik sağlık kayıtları (EHR), laboratuvar sonuçları, tıbbi görüntüleme verileri (BT, MR, ultrason vb.), genetik analizler, sensör tabanlı cihazlar, mobil sağlık uygulamaları ve giyilebilir teknolojiler sağlık verilerinin başlıca kaynaklarını oluşturur (Rehman vd., 2022). Bu veriler hem yapılandırılmış hem de yapılandırılmamış biçimlerde elde edilir ve karmaşık yapıları nedeniyle gelişmiş veri işleme yöntemlerini gerektirir. Büyük veri

¹ Arş. Gör. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye
ORCID: 0000-0001-9997-7310

² Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye
ORCID: 0000-0002-0316-281X

³ Dr. Öğr. Üyesi, Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye
ORCID: 0000-0002-3654-040X

analitiği sayesinde sağlık kuruluşları, hastalıkların erken teşhisi, tedavi süreçlerinin kişiselleştirilmesi, sağlık kaynaklarının etkin yönetimi ve hasta bakım kalitesinin artırılması gibi birçok alanda önemli kazanımlar elde etmektedir (Batko & Ślęzak, 2022).

Sağlık hizmetlerinde büyük verinin kullanım alanları yalnızca klinik karar destek sistemleriyle sınırlı değildir. Halk sağlığı izleme sistemleri, ilaç geliştirme süreçleri, epidemiyolojik araştırmalar, salgın takibi, maliyet optimizasyonu ve hasta memnuniyeti analizleri gibi çok sayıda uygulama alanı mevcuttur (Rehman vd., 2022). Bununla birlikte, bu büyüklükteki verinin güvenli bir şekilde depolanması, paylaşılması ve analiz edilmesi için güçlü teknolojik altyapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Küresel sağlık sektöründe büyük veri pazarının 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 31,5 milyar dolar olduğu, 2034 yılına kadar 121,85 milyar dolar seviyesine ulaşmasının beklendiği bildirilmektedir (Research and Markets, 2025). Bu artış, sağlık kuruluşlarının veri odaklı yönetim sistemlerine yönelmesi, bulut bilişim teknolojilerinin benimsenmesi ve yapay zeka destekli veri analitiği çözümlerinin yaygınlaşmasıyla doğrudan ilişkilidir (Acumen Research and Consulting, 2023).

Bununla birlikte, sağlık sektöründe üretilen verilerin önemli bir bölümü hala analiz edilmeden kalmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü ve Dünya Ekonomik Forumu gibi kuruluşların raporlarına göre, sağlık sektöründe toplanan verilerin yalnızca küçük bir bölümü etkin biçimde kullanılabilir; geri kalan veriler ise etik, güvenlik ve veri standardizasyonu eksiklikleri nedeniyle analiz süreçlerinin dışında kalmaktadır (World Economic Forum, 2024). Bu durum, sağlıkta büyük veri kullanımının önündeki en önemli engellerden biri olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, büyük verinin sağlık sektöründe etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yasal düzenlemeler, veri paylaşım protokolleri, gizlilik politikaları ve standart veri formatlarının oluşturulması kritik öneme sahiptir.

Büyük veri, sağlık sektöründe yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda hizmet kalitesini arttırma, maliyetleri düşürme, hasta memnuniyetini yükseltme ve toplum sağlığını geliştirme açısından stratejik bir araç haline gelmiştir. Gelişen veri analitiği, yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleriyle birlikte, büyük verinin sağlık hizmetlerinde gelecekteki rolünün daha da artacağı ve sağlık sektörünün dönüşümünde temel belirleyici unsurlardan biri olacağı öngörülmektedir.

Büyük Veri Kavramı

Günümüzde dijital dönüşümün hız kazanmasıyla birlikte, günlük yaşamın her alanında sayısız veri kaynağı ortaya çıkmıştır. Akıllı telefonlar, giyilebilir teknolojiler, sosyal medya platformları, sensörler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları aracılığıyla insanlar, kurumlar ve sistemler tarafından saniyeler içinde devasa miktarda veri üretilmektedir. Bu verilerin hacminin, hızının ve çeşitliliğinin sürekli artması, “büyük veri” kavramını modern bilgi çağının temel bileşenlerinden biri haline getirmiştir (Abdelrahman vd., 2023; Kitchin & Mcardle, 2016). Büyük veri, geleneksel yöntemlerle analiz edilmesi mümkün olmayan, ileri düzey bilgi işlem altyapısı ve analitik araçlar gerektiren büyük, hızlı ve karmaşık veri kümelerini ifade eder (Karimi vd., 2021).

Büyük veri kavramı yalnızca veri miktarının artışı değil, aynı zamanda verinin anlamlı bilgiye dönüştürülmesi sürecini de içerir. Nani (2023), Statista Araştırma Departmanı’nın raporuna atıfta bulunarak, dünya genelinde üretilen veri hacminin 2010 yılında 2 zettabayt iken 2020’de 64 zettabayta ulaştığını, 2025 yılına kadar ise 181 zettabayta çıkmasının beklendiğini belirtmiştir. Bu artış, yalnızca verinin depolanması açısından değil, aynı zamanda analiz edilmesi açısından da bilgi işlem teknolojilerinde devrimsel bir dönüşüm gerektirmektedir. Günümüzde verinin miktarı kadar, bu verinin hangi hızda üretildiği ve ne kadar çeşitlilik gösterdiği de önem taşımaktadır (Chao vd., 2023; Gandomi & Haider, 2015).

Büyük veri genellikle “3V” olarak bilinen üç temel boyutta tanımlanır: hacim (volume), çeşitlilik (variety) ve hız (velocity). Ancak son yıllarda bu sınıflandırmaya doğruluk (veracity) ve değer (value) boyutları da eklenmiştir (Aktan, 2018; Boz Eravcı, 2020; Çelik & Akdamar, 2018; Marr, 2016).

- Hacim, büyük verinin en belirgin özelliğidir. Milyarlarca satırdan oluşan, petabayt ve hatta zettabayt seviyesinde veri kümeleri, geleneksel veritabanı sistemlerinin sınırlarını aşmaktadır.
- Çeşitlilik, yapılandırılmış, yarı yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verilerin bir arada bulunmasını ifade eder. Metin, görüntü, ses, video, tıbbi sensör kayıtları gibi çok farklı formatlardaki veriler, özellikle sağlık sektöründe büyük verinin karmaşıklığını arttırmaktadır (Altındış & Kıran Morkoç, 2018).
- Hız, verinin ne kadar hızlı üretildiğini ve işlendiğini tanımlar. Sosyal medya akışları, finansal işlemler veya hastanelerdeki anlık hasta verileri, gerçek zamanlı analiz ihtiyacını doğurmaktadır (Boz Eravcı, 2020).

- Doğruluk, verinin güvenilirliğini ve kalitesini ifade eder. Büyük veride veri kaynağının doğruluğu, özellikle sağlık gibi kritik alanlarda büyük önem taşır (Aktan, 2018).
- Değer ise elde edilen verinin kurumsal karar verme, verimlilik ve yenilik açısından sağladığı faydayı temsil eder. Verinin işlenmesi, anlamlı bilgiye dönüştürülmesi ve stratejik kararlarda kullanılması büyük verinin gerçek potansiyelini ortaya çıkarır (Marr, 2016; Kitchin, 2014).

Büyük veri, yalnızca miktar ve hız açısından değil, aynı zamanda “anlam üretme kapasitesi” ile de öne çıkar. Bu bağlamda büyük veri, kurumlara öngörü gücü kazandıran, geçmiş verilerden geleceğe yönelik tahminler yapılmasını sağlayan bir bilgi kaynağıdır. Büyük veri analitiği sayesinde, işletmeler müşteri davranışlarını, kamu kurumları hizmet etkinliğini, sağlık sektörü ise hasta sonuçlarını iyileştirmeye yönelik öngörülerde bulunabilmektedir (Wamba vd., 2015; Chen vd., 2014).

Günümüzde yapay zeka (AI), makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL) teknolojilerinin gelişimiyle büyük verinin analizi çok daha anlamlı hale gelmiştir. Bu teknolojiler, büyük veri içerisindeki gizli kalıpları, ilişkileri ve eğilimleri ortaya çıkararak karar destek sistemlerinin etkinliğini arttırmaktadır (Katal vd., 2013). Özellikle sağlık sektöründe, elektronik sağlık kayıtları, genomik veriler ve hasta izleme sistemlerinden elde edilen veriler, büyük veri teknolojilerinin en yoğun kullanıldığı alanlardan biri olmuştur (Raghupathi & Raghupathi, 2014).

Büyük veri, yalnızca bir teknoloji olgusu değil; bilgiye dayalı karar alma süreçlerini dönüştüren, veri merkezli bir düşünme biçiminin ürünüdür. Bu kavram, verinin depolanmasından çok daha fazlasını, yani verinin işlenmesi, anlamlandırılması ve stratejik şekilde kullanılması sürecini kapsar. Büyük verinin bu çok boyutlu doğası hem akademik dünyada hem de uygulama alanlarında veri yönetimi, etik, gizlilik ve güvenlik konularını ön plana çıkarmaktadır (Kitchin, 2014; Papagiannidis vd., 2025).

Büyük Veri Analitiği

Büyük veri, tek başına anlamlı bir değer yaratmaz; asıl değer, bu verinin analiz edilerek içgörüyeye dönüştürülmesinde ortaya çıkar. Bu nedenle büyük veri analitiği, modern veri çağının en kritik bileşenlerinden biridir. Büyük veri analitiği, çok boyutlu, dinamik ve yüksek hacimli veri kümeleri üzerinde istatistiksel analiz, veri madenciliği, makine öğrenimi, yapay zeka ve derin öğrenme gibi gelişmiş tekniklerin kullanılmasını kapsar (Aktan, 2018;

Abdelrahman vd., 2023). Bu analitik süreçler, büyük veri yığınlarından anlamlı kalıplar, ilişkiler ve eğilimler çıkararak gelecekteki davranışların, olayların veya eğilimlerin tahmin edilmesini mümkün kılar (Gandomi & Haider, 2015; Sagirolu & Sinanc, 2013).

Geleneksel veri analizi yöntemleri, büyük verinin hacmi, çeşitliliği ve hızı karşısında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, büyük veri analitiği hem teknolojik hem de metodolojik açıdan yenilikçi yaklaşımlar gerektirir (Sakshi & Malwadkar, 2023). Büyük veri analitiği sistemleri, yalnızca veriyi depolamakla kalmaz; aynı zamanda bu verileri dinamik biçimde işleyerek gerçek zamanlı analiz ve öngörüsöl modelleme yapılmasına olanak tanır (Chen vd., 2014). Bu bağlamda, analitik süreçler yalnızca geçmiş verilerin incelenmesini değil, geleceğe dönük senaryo oluşturmaya da mümkün kılar.

Büyük veri analitiği genellikle dört ana analiz türü altında sınıflandırılır:

1. **Tanımlayıcı (Descriptive) Analitik:** Geçmiş verileri özetleyerek “ne oldu?” sorusuna yanıt verir.
2. **Tanısal (Diagnostic) Analitik:** Verideki örüntüleri inceleyerek “neden oldu?” sorusunu yanıtlar.
3. **Öngörücü (Predictive) Analitik:** Makine öğrenimi algoritmalarıyla “ne olacak?” sorusuna tahmin temelli yanıtlar üretir.
4. **Kural Koyucu (Prescriptive) Analitik:** Optimizasyon ve simülasyon teknikleriyle “nasıl olmalı?” sorusuna stratejik öneriler sunar (Marr, 2016; Wamba vd., 2015; Katal vd., 2013).

Bu sınıflandırma, büyük veri analitiğini yalnızca bir bilgi teknolojisi aracı olmaktan çıkararak, karar destek sistemlerinin stratejik bir bileşeni haline getirir (Manyika vd., 2011). Özellikle işletmeler, kamu kurumları ve sağlık kuruluşları açısından büyük veri analitiği, operasyonel verimliliği arttırmak, maliyetleri düşürmek, müşteri ya da hasta memnuniyetini yükseltmek ve risk yönetimini güçlendirmek açısından kritik bir rol üstlenmektedir (Abdelrahman vd., 2023; Kırdar, 2023).

Teknolojinin hızla gelişmesi, büyük veri analitiğinin ölçeğini ve karmaşıklığını arttırmıştır. Günümüzde Hadoop, Spark, NoSQL veritabanları, veri gölleri (data lakes) ve bulut bilişim (cloud computing) altyapıları, büyük veri analitiği süreçlerinin temelini oluşturmaktadır (Kitchin, 2014; Sagirolu & Sinanc, 2013). Bu teknolojiler sayesinde gerçek zamanlı veri işleme, dağıtık hesaplama ve ölçeklenebilir analiz modelleri mümkün hale gelmiştir. Örneğin, Apache Spark yüksek hızda paralel işlem kapasitesi sayesinde terabaytlarca veriyi saniyeler içinde analiz edebilirken; Hadoop, farklı kaynaklardan gelen

verileri depolayıp işleyebilen açık kaynaklı bir sistem olarak büyük veri analitiğinin temel taşını oluşturmaktadır (Hashem vd., 2015).

Büyük veri analitiği yalnızca işletme dünyasında değil, aynı zamanda akademi, kamu yönetimi, sağlık sektörü, enerji yönetimi, eğitim ve ulaşım planlaması gibi birçok alanda uygulanmaktadır (Sakshi & Malwadkar, 2023; Kırdar, 2023). Özellikle akıllı şehirler kavramı, büyük veri analitiğinin en somut uygulama alanlarından biridir. Akıllı şehirlerde, ulaşım sistemlerinden enerji altyapısına, kamu güvenliğinden çevresel izleme sistemlerine kadar birçok veri kaynağı analiz edilerek şehir yönetiminde etkinlik sağlanmaktadır (Kırdar, 2023; Batty vd., 2012). Aynı şekilde, sağlık sektöründe büyük veri analitiği, hasta kayıtları, laboratuvar sonuçları, tıbbi görüntüler ve genetik veriler üzerinden kişiselleştirilmiş tedavi planları geliştirmek ve hastalıkların erken teşhisini desteklemek için kullanılmaktadır (Raghupathi & Raghupathi, 2014; Dash vd., 2019).

Günümüzün rekabetçi iş ortamında, yalnızca veriye sahip olmak artık yeterli değildir; önemli olan, bu veriden stratejik anlamda değer çıkarabilmektir. Büyük veri analitiği, bu bağlamda kurumlara “veri odaklı karar verme kültürü” kazandırır (Mikalef vd., 2018). Ancak analitik süreçlerin başarısı, yalnızca teknolojik kapasiteye değil; aynı zamanda veri kalitesi, gizlilik, etik kullanım ve analitik yetkinlik gibi faktörlere de bağlıdır (Zicari vd., 2020; Cao vd., 2019). Veri güvenliği ve etik yönetimi, büyük veri analitiği uygulamalarında sürdürülebilirlik ve toplumsal kabul açısından kritik öneme sahiptir.

Büyük veri analitiği; teknolojik altyapı, analitik yöntemler ve stratejik vizyonun birleşiminden doğan çok boyutlu bir süreçtir. Kurumların dijital dönüşümünde itici güç rolü oynayan bu süreç, yalnızca geçmiş anlamakla kalmaz, aynı zamanda geleceği şekillendirmeyi de mümkün kılar. Bu nedenle büyük veri analitiği hem bilimsel araştırmalarda hem de uygulamalı yönetim uygulamalarında veri merkezli karar verme süreçlerinin temel dayanaklarından biri haline gelmiştir.

Büyük Veri Teknolojileri

Büyük veri kavramı, yalnızca yüksek hacimli veri kümelerini değil, aynı zamanda bu verilerin etkili bir biçimde depolanması, yönetilmesi ve analiz edilmesi için kullanılan teknolojik altyapıyı da kapsamaktadır. Büyük veri ekosistemi; veri toplama, depolama, işleme, analiz etme ve görselleştirme süreçlerini destekleyen çeşitli araç ve platformlardan oluşur. Bu teknolojiler, özellikle hız, çeşitlilik, hacim ve doğruluk gibi “4V” özelliklerini karşılamak amacıyla geliştirilmiştir (Aktan, 2018; Doğan & Arslantekin, 2016).

Büyük verinin etkili bir şekilde işlenebilmesi için en temel teknolojilerden biri Apache Hadoop'dur. Hadoop, büyük ölçekli veri kümelerinin dağıtık sistemlerde paralel olarak işlenmesini ve depolanmasını sağlayan açık kaynaklı bir çerçevedir. Hadoop'un temel bileşenleri olan Hadoop Distributed File System (HDFS) ve MapReduce, verilerin farklı düğümlere dağıtılarak eşzamanlı işlenmesine olanak tanır. Bu yapı hem yüksek hata toleransı hem de maliyet etkinliği sağlamaktadır (Boz Eravcı, 2020; Özbilgin, 2015). Ancak Hadoop'un toplu işleme odaklı yapısı, gerçek zamanlı veri işleme gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu durum, daha gelişmiş bir veri işleme motoru olan Apache Spark'ın geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Kurşun, 2021).

Apache Spark, bellek içi (in-memory) veri işleme özelliğiyle Hadoop'a kıyasla çok daha yüksek performans sunar. Spark; veri akışları, makine öğrenimi algoritmaları, grafik işleme ve SQL sorguları gibi farklı modülleri destekleyerek büyük veri analizinde esneklik sağlar (Zikopoulos vd., 2012). Özellikle sağlık sektörü gibi hızlı veri üretiminin yaşandığı alanlarda Spark, gerçek zamanlı analiz ve tahmin modellerinin oluşturulmasında önemli avantajlar sağlamaktadır.

Geleneksel ilişkisel veritabanı yönetim sistemleri (RDBMS), büyük veri ortamlarında ölçeklenebilirlik ve esneklik açısından sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, NoSQL veritabanları yapılandırılmamış veya yarı yapılandırılmış verilerin yüksek performansla depolanmasına olanak tanımaktadır (Doğan & Arslantekin, 2016). NoSQL sistemleri, esnek şema yapısı ve yatay ölçeklenme kabiliyeti sayesinde, sosyal medya verileri, sensör çıktıları veya tıbbi görüntüler gibi karmaşık veri türlerinin yönetiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Kurşun, 2021).

Gerçek zamanlı veri akışlarının işlenmesi için geliştirilen Apache Kafka, büyük veri ekosisteminin bir diğer temel bileşenidir. Kafka, yüksek hacimli veri akışlarını düşük gecikme süresiyle işleyebilmekte ve bu verileri analiz platformlarına güvenli bir şekilde yönlendirmektedir (Kreps vd., 2011). Sağlık sektöründe sensör verilerinin veya hasta izleme sistemlerinden gelen akışların analizinde, Kafka ve Spark Streaming birlikte kullanılarak etkin veri yönetimi sağlanabilmektedir (Hashem vd., 2015).

Bu teknolojilerin yanı sıra, HBase, Hive, Flume, Storm, Flink, Elasticsearch gibi araçlar da büyük veri ekosistemini desteklemektedir. Bu teknolojiler, farklı veri tiplerini analiz etmek için özel çözümler sunar. Ayrıca bulut bilişim platformları büyük veri işleme için ölçeklenebilir altyapılar sağlayarak kurumların maliyet etkin çözümler geliştirmesini kolaylaştırmaktadır (Hashem vd., 2015; Kırdar, 2023).

Büyük veri teknolojileri yalnızca verilerin depolanmasını değil, aynı zamanda bu verilerden anlamlı bilgi çıkarımını da mümkün kılar. Bu teknolojik altyapılar, sağlık sektöründen finans ve üretim alanlarına kadar geniş bir yelpazede karar verme süreçlerini desteklemekte; kurumlara hız, esneklik ve rekabet avantajı sağlamaktadır. Gelecekte, bu teknolojilerin yapay zeka ve nesnelerin interneti ile entegrasyonu sayesinde daha akıllı ve öngörülü sistemlerin geliştirilmesi beklenmektedir.

Sağlık Sektöründe Büyük Veri Uygulamaları

Sağlık sektörü, dijitalleşmenin hızlanmasıyla birlikte büyük veri teknolojilerinin en yoğun uygulandığı alanlardan biri haline gelmiştir. Günümüzde sağlık hizmetleri; hasta kayıtları, laboratuvar sonuçları, medikal görüntüler, genom verileri, giyilebilir cihazlardan gelen sensör verileri, sigorta kayıtları ve sosyal medya gibi farklı kaynaklardan elde edilen çok büyük miktarda veri üretmektedir. Bu verilerin analiz edilmesi, yalnızca klinik karar destek sistemlerinin geliştirilmesi açısından değil, aynı zamanda sağlık hizmetlerinin kalitesini arttırmak, maliyetleri azaltmak ve hastaların yaşam kalitesini yükseltmek açısından da kritik öneme sahiptir (Alzaabi vd., 2023; Ristevski & Chen, 2018).

Büyük veri analitiği, sağlık sektöründe hastalıkların erken teşhisi, tedavi süreçlerinin kişiselleştirilmesi ve kaynak planlamasının optimize edilmesi gibi alanlarda devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Örneğin; makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri, görüntüleme verileri üzerinden kanser, diyabet, Alzheimer ve kardiyovasküler hastalıkların erken teşhisinde yüksek doğruluk oranlarıyla kullanılmaktadır (Esteve vd., 2019). Aynı şekilde, tahmine dayalı analitik modeller, kronik hastalıkların nüks etme riskini önceden tahmin ederek sağlık profesyonellerinin proaktif müdahalede bulunmasına olanak tanımaktadır (Vishnoi vd., 2022). Bu uygulamalar, sağlık sistemlerinin daha veriye dayalı ve öngörücü bir yapıya evrilmesine katkı sağlamaktadır.

Sağlık sektöründeki büyük veri uygulamaları yalnızca klinik karar desteğiyle sınırlı değildir. Operasyonel verimlilik ve hizmet planlaması açısından da büyük veri analitiği önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle büyük hastanelerde ameliyathane, laboratuvar ve yoğun bakım üniteleri gibi kaynakların zamanında ve etkin kullanımını sağlamak için geliştirilen veri tabanlı planlama sistemleri, maliyetleri azaltırken hasta bekleme sürelerini kısaltmaktadır (Gür & Eren, 2023). Hibrit ameliyathanelerde yapılan operasyonlarda, eşzamanlı görüntüleme ve biyopsi tanısı gibi işlemlerden gelen verilerin analizi, operasyon süreçlerinin optimize edilmesini ve hata risklerinin azaltılmasını sağlamaktadır. Bu kapsamda, ameliyathane zamanlama algoritmaları ve kaynak yönetiminde

büyük veri tekniklerinin kullanılması, sağlık hizmeti kalitesini doğrudan etkileyen stratejik bir faktör haline gelmiştir (Gür & Eren, 2023).

Büyük veri analitiği, halk sağlığı yönetimi ve epidemiyolojik araştırmalar açısından da önemli bir araçtır. COVID-19 pandemisi süresince, büyük veri teknolojileri hastalık yayılımının izlenmesi, temaslı takibi, vaka kümelerinin modellenmesi ve aşı etkinlik analizlerinde yoğun biçimde kullanılmıştır (Wang vd., 2020). Dünya Sağlık Örgütü ve diğer uluslararası kuruluşlar, büyük veri altyapısını kullanarak gerçek zamanlı epidemiyolojik veri toplama ve analiz sistemleri kurmuş; bu da politika yapımcıların hızlı ve veriye dayalı kararlar almasını kolaylaştırmıştır.

Öte yandan, büyük veri uygulamaları hasta merkezli bakım anlayışını da desteklemektedir. Elektronik Sağlık Kayıtları, Hasta Üreten Veri (Patient-Generated Data), Nesnelerin İnterneti ve giyilebilir teknolojiler sayesinde bireylerin sağlık durumları sürekli izlenebilmekte ve kişiye özgü sağlık hizmetleri geliştirilmektedir (Belle vd., 2015). Bu sistemler, kronik hastalıkların yönetiminde uzaktan izleme ve erken müdahale olanakları sağlayarak sağlık sistemine maliyet avantajı yaratmaktadır. Ayrıca, büyük veri analizleri sayesinde sağlık kurumları, hasta memnuniyetini arttıracak stratejiler geliştirebilmekte, hizmet kalitesini ölçmekte ve kurumsal performanslarını sürekli olarak iyileştirebilmektedir (Hashem vd., 2015).

Ancak tüm bu fırsatların yanı sıra, sağlık verilerinin gizliliği, güvenliği ve etik kullanımı da büyük veri uygulamalarında dikkat edilmesi gereken en kritik konulardandır. Kişisel sağlık bilgilerinin korunması hem hukuki düzenlemeler hem de teknik çözümler aracılığıyla güvence altına alınmalıdır (Ristevski & Chen, 2018). Aksi takdirde büyük verinin sağladığı potansiyel faydalar, veri ihlalleri veya güven kaybı gibi olumsuz sonuçlarla gölgelenebilir.

Sağlık sektöründe büyük veri uygulamaları; klinik karar desteği, operasyonel verimlilik, halk sağlığı yönetimi ve hasta deneyimi açısından stratejik bir dönüşüm yaratmaktadır. Gelecekte bu alanda yapay zeka, bulut bilişim ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu sayesinde sağlık hizmetlerinin daha öngörülü, hızlı ve kişiselleştirilmiş hale gelmesi beklenmektedir.

Sonuç ve Tartışma

Büyük veri, günümüzde yalnızca ekonomik rekabetin değil, aynı zamanda toplumsal refahın da temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Sağlık sektörü özelinde bakıldığında, büyük veri teknolojileri; hastalıkların erken teşhisinden tedavi süreçlerinin kişiselleştirilmesine, sağlık hizmetlerinin planlanmasından epidemiyolojik analizlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu

yönüyle büyük veri, sağlık sistemlerinin daha etkin, erişilebilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasında kilit bir rol oynamaktadır.

Büyük verinin sağlık alanındaki en önemli katkılarının biri, veriye dayalı karar verme süreçlerini güçlendirmesidir. Sağlık kurumları, hasta kayıtlarından laboratuvar sonuçlarına, sensörlerden elde edilen verilere kadar çok çeşitli kaynaklardan toplanan bilgileri analiz ederek klinik karar destek sistemlerini geliştirmekte, hata oranlarını azaltmakta ve hasta memnuniyetini arttırmaktadır. Özellikle yapay zeka ve makine öğrenimi tabanlı analizler, tanı doğruluğunu arttırmakta ve sağlık çalışanlarının iş yükünü hafifletmektedir. Bununla birlikte, büyük veri altyapıları sayesinde halk sağlığı politikaları daha veriye dayalı biçimde tasarlanabilmekte ve sağlık kaynakları daha dengeli dağıtılabilmektedir.

Ancak büyük veri kullanımının yaygınlaşması, etik, güvenlik ve gizlilik alanlarında yeni riskleri de beraberinde getirmektedir. Sağlık verileri, kişisel mahremiyet açısından son derece hassas bir nitelik taşıdığından, bu verilerin korunması ve anonimleştirilmesi konusunda ulusal ve uluslararası düzeyde sıkı düzenlemeler gerekmektedir. Özellikle dijitalleşme ve bulut tabanlı sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, siber güvenlik önlemleri ve veri yönetimi politikaları sağlık kurumlarının öncelikli gündemleri arasında yer almalıdır.

Büyük verinin sunduğu potansiyelden tam anlamıyla yararlanmak için, sağlık sektöründe veri entegrasyonu, veri kalitesi yönetimi ve kurumsal analiz kapasitesi konularında yatırımların artırılması önemlidir. Aynı zamanda sağlık çalışanlarının dijital okuryazarlık düzeylerinin geliştirilmesi, büyük verinin klinik ve idari süreçlerde etkin kullanımını destekleyecektir.

Sonuç olarak, büyük veri sağlık sektöründe yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda sağlık hizmetlerinin dönüşümünü şekillendiren stratejik bir paradigma olarak değerlendirilmektedir. Gelecekte, yapay zeka destekli karar sistemleri, genetik veriye dayalı kişiselleştirilmiş tedaviler ve nesnelerin interneti uygulamalarıyla birlikte büyük verinin etkisi daha da artacaktır. Bununla birlikte, bu teknolojik ilerlemenin etik, hukuki ve insani boyutlarla dengelenmesi gerekmektedir. Sağlık sektöründe büyük veri, doğru yönetim mekanizmaları ve güvenli altyapılarla desteklendiğinde hem bireysel sağlık hem de toplum sağlığı açısından sürdürülebilir bir değer yaratma potansiyeline sahiptir.

Kaynakça

- Abdelrahman, Y., Hajek, P., & Lubica, H. (2023). Research trends in the application of big data in smart cities—A literature review. *Canadian Journal of Administrative Sciences*, 40(3), 254–269. <https://doi.org/10.1002/cjas.1734>
- Acumen Research and Consulting. (2023). *Big Data in Healthcare Market Report*.
- Aktan, E. (2018). Büyük Veri: Uygulama Alanları, Analitiği ve Güvenlik Boyutu. *Bilgi Yönetimi Dergisi*, 1(1), 1–22.
- Altınbaş, A. (2018). Sağlıkta büyük verinin önemi. *Ortadoğu Tıp Dergisi*, 10(2), 216–219. <https://doi.org/10.21601/ortadogutipdergisi.412200>
- Altındış, S., & Kıran Morkoç, İ. (2018). Sağlık Hizmetlerinde Büyük Veri. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(2), 257–271. <https://doi.org/10.25287/ohuiibf.366227>
- Alzaabi, O., Al Mahri, K., El Khatib, M., & Alkindi, N. (2023). How Big Data Analytics Supports Project Manager in Project Risk Management – Cases from UAE Health Sector. *International Journal of Business Analytics and Security (IJBAS)*, 3(1), 11–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.54489/ijbas.v3i1.201>
- Batko, K., & Ślęzak, A. (2022). The use of Big Data Analytics in healthcare. *Journal of Big Data*, 9(3). <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00553-4>
- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal: Special Topics*, 214, 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
- Belle, A., Thiagarajan, R., Soroushmehr, S. M. R., Navidi, F., Beard, D. A., & Najarian, K. (2015). Big data analytics in healthcare. *BioMed Research International*, 2015, 370194. <https://doi.org/10.1155/2015/370194>
- Boz Eravcı, D. (2020). Kurumların Dijital Dönüşümü : Büyük Veri Regimes Digital Transformation of Institutions : Big Data. *Çalışma İlişkileri Dergisi*, 11(1), 90–112.
- Cao, G., Duan, Y., & El Banna, A. (2021). A dynamic capability view of marketing analytics: Evidence from UK firms. *Industrial Marketing Management*, 76, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.08.002>
- Chao, K., Islam, N., Ali, I., Firdaus, R. B. R., Azman, A., & Mohammed Shaed, M. (2023). Big data-driven public health policy making: Potential for the healthcare industry. *Heliyon*, 9(9), e19681. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19681>

- Chen, M., Mao, S., & Liu, Y. (2014). Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 19, 171–209. <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>
- Çelik, S., & Akdamar, E. (2018). Büyük Veri ve Veri Görselleştirme. *Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler Dergisi*, 65, 253–264.
- Dash, S., Shakyawar, S. K., Sharma, M., & Kaushik, S. (2019). Big data in healthcare: Management, analysis and future prospects. *Journal of Big Data*, 6(54). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0217-0>
- Doğan, K., & Arslantekin, S. (2016). Büyük Veri: Önemi, Yapısı ve Günümüzdeki Durum. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 56(1), 15–36. <https://doi.org/10.1501/Dtcfder>
- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2019). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115–118. <https://doi.org/10.1038/nature21056>
- Gandomi, A., & Haider, M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>
- Gür, Ş., & Eren, T. (2023). Big Data and Its Implementation in Health Industry. In İ. İyigün & Ö. F. Görçün (Eds.), *Health 4.0 and Medical Supply Chain* (pp. 97–106). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1818-8_8
- Hashem, I. A. T., Yaqoob, I., Anuar, N. B., Mokhtar, S., Gani, A., & Khan, S. U. (2015). The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems*, 47, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006>
- Karimi, Y., Kashani, M. H., Akbari, M., & Mahdipour, E. (2021). Leveraging big data in smart cities: A systematic review. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(21), 1–30. <https://doi.org/10.1002/cpe.6379>
- Katal, A., Wazid, M., & Goudar, R. (2013). Big data: Challenges and techniques. 2013 Sixth International Conference on Contemporary Computing (IC3), Noida, August 2013, 404–409. <http://dx.doi.org/10.1109/ic3.2013.6612229>
- Kırdar, G. (2023). A Systematic Literature Review of Big Data in Urban Studies. *Journal of Technology in Architecture Design and Planning*, 1(1), 64–83. <https://doi.org/10.26650/JTADP.01.004>
- Kitchin, R. (2014). *The data revolution: Big data, open data, data infrastructures and their consequences*. Sage Publications.

- Kitchin, R., & Mcardle, G. (2016). What makes Big Data, Big Data ? Exploring the ontological characteristics of 26 datasets. *Big Data & Society*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1177/2053951716631130>
- Kreps, J., Narkhede, N., & Rao, J. (2011). *Kafka: A distributed messaging system for log processing. NetDB'11, Jun. 12, 2011, Athens, Greece.*
- Kurşun, A. (2021). Büyük Veri ve Sağlık Hizmetlerinde Büyük Veri İşleme Araçları. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 24(4), 921–940.
- Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., & Byers, A. (2011). *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity.* McKinsey Global Institute.
- Marr, B. (2016). *Big data in practice: How 45 successful companies used big data analytics to deliver extraordinary results.* Wiley.
- Mikalef, P., Pappas, I. O., Krogstie, J., & Giannakos, M. (2018). Big data analytics capabilities: A systematic literature review and research agenda. *Information Systems and e-Business Management*, 16(3), 547–578. doi: 10.1007/s10257-017-0362-y
- Moulay, B. (2023). Digital Innovation in Healthcare. In A. C. Bouarar, K. Mouloudj, & D. M. Asanza (Eds.), *Integrating Digital Health Strategies for Effective Administration* (p. 19). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8337-4.ch001>
- Nani, A. (2023). International Journal of Accounting Valuing big data : An analysis of current regulations and proposal of frameworks. *International Journal of Accounting Information Systems*, 51(January), 100637. <https://doi.org/10.1016/j.accinf.2023.100637>
- Özbilgin, İ. G. (2015). Kamuda Büyük Veri ve Uygulamaları. *AB2015 Akademik Bilişim Konferansı*, 31.
- Papagiannidis, E., Mikalef, P., & Conboy, K. (2025). Responsible artificial intelligence governance: A review and research framework. *The Journal of Strategic Information Systems*, 34(2). <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2024.101885>
- Raghupathi, W., & Raghupathi, V. (2014). Big data analytics in healthcare: Promise and potential. *Health Information Science and Systems*, 2(3). doi: 10.1186/2047-2501-2-3
- Rehman, A., Naz, S., & Razzak, I. (2022). Leveraging Big Data Analytics in Healthcare Enhancement: Trends, Challenges, and Opportunities. *Multimedia Systems* 28, 1339–1371. <https://doi.org/10.1007/s00530-020-00736-8>
- ResearchAndMarkets. (2025). *Big Data in Healthcare Market Research and Forecast Report 2025–2034.*

- Ristevski, B., & Chen, M. (2018). Big data analytics in medicine and healthcare. *Journal of Integrative Bioinformatics*, 15(3), 20170030. <https://doi.org/10.1515/jib-2017-0030>
- Sagiroglu, S., & Sinanc, D. (2013). Big data: A review. *2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, San Diego, CA, USA, 42-47. doi: 10.1109/CTS.2013.6567202..
- Sakshi, P., & Malwadkar, G. (2023). Big Data Analytics : A Literature Review Paper. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 3(3), 304–309. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-8160>
- Vishnoi, S. K., Virmani, N., Pant, D., Virmani, N., & Garg, A. (2022). Big Data in Healthcare. In B. Teena, U. Kamal, K. Nishant, A. Amirul Hasan, & N. Danish (Eds.), *Designing Intelligent Healthcare Systems, Products, and Services Using Disruptive Technologies and Health Informatics* (1st Editio, p. 294). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003217107>
- Wamba, S. F., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., & Gnanzou, D. (2015). How ‘big data’ can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. *International Journal of Production Economics*, 165, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.031>
- Wang, L., Wang, Y., Ye, D., & Liu, Q. (2020). Review of the 2019 novel coronavirus (SARS-CoV-2) based on current evidence. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 55(6), 105948. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105948>
- World Economic Forum. (2024). *Transforming Healthcare: Navigating Digital Health with a Value-Driven Approach*.
- Zicari, R. V., Brodersen, J., Brusseau, J., & Corsi, P. (2020). Responsible big data and AI systems: A human-centered approach. *AI & Society*, 35(4), 1–14.
- Zikopoulos, P., Eaton, C., DeRoos, D., Deutsch, T., & Lapis, G. (2012). *Understanding Big Data: Analytics for Enterprise Class Hadoop and Streaming Data*. McGraw-Hill.

4. Bölüm

Akıllı Binalarda HVAC ve Aydınlatma Sistemlerinin Metasezgisel Optimizasyonu

Elif VAROL ALTAY¹, Osman ALTAY²

Özet

Bu çalışmada, Nesnelerin İnterneti (IoT) temelli akıllı bina enerji yönetimi için metasezgisel optimizasyona dayalı bir yaklaşım önerilmiştir. Araştırma, binalardaki toplam enerji tüketiminin büyük kısmını oluşturan iki alt sistem ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) ile akıllı aydınlatma (dimleme) üzerinde yoğunlaşmıştır. Optimizasyon problemi, enerji verimliliği ile kullanıcı konforu arasında denge kuran, çok parametrelili doğrusal olmayan bir minimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Bu amaçla, son yıllarda önerilen üç modern metasezgisel algoritma Mirage Search Optimization (MSO), Phototropic Growth Algorithm (PGA) ve Stellar Oscillation Optimizer (SOO) kullanılarak HVAC sıcaklık set noktaları ve aydınlatma parlaklık oranları ayrı ayrı optimize edilmiştir. Modeller, MATLAB ortamında oluşturulan sentetik IoT verileri (ör. dış sıcaklık, işgal durumu ve ışık şiddeti profilleri) üzerinden test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, HVAC sisteminde MSO algoritmasının tüm çalıştırmalarda aynı optimum değere ulaşarak en düşük maliyeti ve en kararlı performansı sağladığını; aydınlatma sisteminde ise PGA algoritmasının enerji-konfor dengesinde en verimli ve istikrarlı sonuçları ürettiğini göstermektedir. MSO erken iterasyonlarda yüksek keşif gücüyle hızlı enerji azalımı sağlasa da aydınlatma probleminde daha yüksek varyans üretmiş, SOO ise salınım tabanlı yapısı nedeniyle her iki sistemde de daha yavaş ancak kararlı bir yakınsama sergilemiştir. Bulgular, önerilen iki ayrı modelin enerji tüketimini azaltırken konfor seviyesini koruyabildiğini ve ortalama 0.25 saniyenin altındaki işlem süresiyle gerçek zamanlı IoT tabanlı kontrol sistemlerine entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, gelecekteki akıllı binalar için çok hedefli ve adaptif optimizasyon yaklaşımlarına güçlü bir temel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Akıllı binalar, Nesnelerin interneti, HVAC optimizasyonu, Aydınlatma kontrolü, Metasezgisel algoritmalar

¹ elif.altay@cbu.edu.tr

² osman.altay@cbu.edu.tr

1. Giriş

Enerji verimliliği, günümüzün sürdürülebilir şehircilik politikalarının temel yapı taşlarından biridir. Küresel ölçekte binalar, toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmakta ve bu tüketimin büyük bölümü ısıtma, havalandırma, iklimlendirme (HVAC) ile aydınlatma sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, akıllı bina yönetim sistemlerinde enerji tüketimini azaltırken iç ortam konforunu koruyabilmek, günümüz araştırmalarının ve mühendislik uygulamalarının öncelikli hedeflerinden biri hâline gelmiştir.

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) teknolojisi, bu alanda önemli bir dönüşüm sağlamıştır. IoT tabanlı sensörler ve denetleyiciler sayesinde ortam sıcaklığı, nem, ışık şiddeti, karbondioksit yoğunluğu, insan varlığı ve dış ortam koşulları gibi çevresel değişkenler gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, böylece sistem parametreleri çevresel veriler doğrultusunda dinamik biçimde ayarlanabilmektedir. Bununla birlikte, enerji-konfor ilişkilerinin doğrusal olmayan doğası, çoklu değişkenlerin varlığı ve sensör verilerinin zamana bağlı değişkenliği, klasik optimizasyon yöntemlerinin bu tür sistemlerde yeterli performans göstermesini zorlaştırmaktadır.

Bu noktada, metasezgisel optimizasyon algoritmaları akıllı bina enerji yönetimi için güçlü ve esnek bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır. Doğadan, fizikten veya sosyal etkileşimlerden esinlenen bu algoritmalar, problem uzayında küresel optimuma yakın çözümler ararken türev gerektirmeyen ve yüksek boyutlu uzaylarda etkin bir şekilde çalışabilme avantajı sağlar. Özellikle enerji verimliliği ve kullanıcı konforu arasında çoklu hedef dengesinin kurulması gereken durumlarda, metasezgisel yöntemler klasik yaklaşımlara kıyasla daha yüksek yakınsama başarısı göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, akıllı bina ortamlarında iki temel sistem için optimizasyon senaryoları tasarlanmıştır:

(1) HVAC Set-Point Optimizasyonu, iç ortam sıcaklıklarının dış ortam sıcaklığı ve kullanıcı işgal durumuna göre enerji-konfor dengesini sağlayacak biçimde ayarlanmasını;

(2) Aydınlatma (Dimleme) Optimizasyonu ise zaman dilimlerine bağlı parlaklık düzeylerinin, hareket ve ışık sensörü verilerine dayalı olarak enerji tüketimini minimize ederken görsel konforun korunmasını hedeflemektedir.

Her iki problem de sürekli optimizasyon yapısında modellenmiş ve MATLAB ortamında test edilmiştir. Optimizasyon sürecinde üç farklı doğa temelli metasezgisel yöntem—Mirage Search Optimization (MSO), Phototropic Growth Algorithm (PGA) ve Stellar Oscillation Optimizer (SOO)—kullanılmıştır. Bu algoritmalar sırasıyla serap etkisiyle yön bulan kırılma davranışı, bitkilerin ışığa

yönelim (fototropizm) prensibi ve yıldızsal titreşim dinamiklerinden ilham alarak geliştirilmiş yeni nesil optimizasyon yaklaşımlarıdır. Çalışmanın amacı, bu yöntemlerin IoT tabanlı HVAC ve aydınlatma sistemlerinde enerji verimliliği ve kullanıcı konforu arasında optimum dengeyi sağlama potansiyelini karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktır.

2. Yapılan Çalışmalar

Akıllı binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar, son yıllarda IoT tabanlı izleme, veri analitiği ve optimizasyon yöntemlerinin bütünleşmesiyle önemli bir gelişim göstermiştir. Erken dönem araştırmalar, çoğunlukla klasik denetim tekniklerine (PID veya model öngörülü kontrol) dayanmış; ancak bu yöntemler doğrusal olmayan enerji-konfor ilişkilerini modellemede yetersiz kalmıştır [1]. Bu durum, araştırmacıları, yüksek boyutlu ve karmaşık enerji yönetimi problemlerine daha uygun olan sezgisel ve metasezgisel yaklaşımlara yöneltmiştir.

Son yıllarda geliştirilen metasezgisel optimizasyon algoritmaları, HVAC ve aydınlatma sistemlerinde enerji tüketiminin azaltılması, termal konforun korunması ve sistem parametrelerinin otomatik ayarlanması gibi çok hedefli problemlerde başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, Chen ve ark. [2], genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemlerini kullanarak, binalardaki ısıtma sistemleri için enerji tasarrufunda %15'e varan iyileşme elde etmişlerdir. Benzer şekilde, Shaikh ve ark. [3], yapay arı kolonisi (ABC) algoritmasıyla aydınlatma yoğunluğuna bağlı dinamik enerji kontrolü gerçekleştirmiştir.

Bu geleneksel metasezgisel yaklaşımların ötesinde, son dönemde doğadan esinlenen yeni nesil algoritmalar dikkat çekmektedir. Örneğin, Mirage Search Optimization (MSO) algoritması, serap kırılma olgusundan ilham alarak keşif ve sömürü arasında adaptif bir denge kurmakta ve mühendislik tasarımı problemlerinde yüksek yakınsama başarısı göstermektedir [4]. Phototropic Growth Algorithm (PGA) ise bitkilerin ışığa yönelim (fototropizm) davranışını matematiksel olarak modelleyerek, özellikle enerji ve aydınlatma optimizasyonu gibi fiziksel sistemlerde yönlü arama yeteneği sunmaktadır [5]. Stellar Oscillation Optimizer (SOO) algoritması ise yıldızsal salınım dinamiklerini temel alarak, uzaydaki çözüm adaylarını osilasyon genliklerine göre güncelleyip kararlı yakınsama sağlamaktadır [6].

Bunlara ek olarak, metasezgisel algoritmaların IoT tabanlı veriyle bütünleşmesi, son dönemde “akıllı enerji yönetimi” yaklaşımının temelini oluşturmuştur. Zhu ve ark. [7], akıllı binalarda çoklu sensör verisini PSO algoritması ile birleştirerek gerçek zamanlı sıcaklık kontrolü sağlamış, enerji

tüketiminde %20'ye varan azalma elde etmiştir. Diğer taraftan, Rehman ve ark. [8], derin öğrenme tabanlı aydınlatma tahmin modelleri ile metasezgisel optimizasyonu entegre ederek karanlık alan tespitinde doğruluğu artırmıştır.

Bu literatür çerçevesinde, mevcut çalışma iki önemli yenilik sunmaktadır:

(i) HVAC ve aydınlatma sistemleri ayrı ayrı optimize edilerek enerji-konfor dengesi fiziksel olarak tanımlanmıştır;

(ii) üç farklı modern metasezgisel yöntem (MSO, PGA, SOO) IoT tabanlı bina modellerinde ilk kez karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır.

3. Materyal ve Metot

3.1 IoT Tabanlı Mimari Model

Bu çalışmada önerilen akıllı bina modeli, IoT temelli üç katmanlı bir mimariye dayanmaktadır: sensör katmanı, ağ (iletişim) katmanı ve uygulama (karar destek) katmanı.

- **Sensör Katmanı**, sıcaklık, nem, ışık şiddeti, insan varlığı (hareket sensörleri) ve dış ortam koşulları gibi fiziksel parametreleri sürekli olarak ölçer.
- **Ağ Katmanı**, bu verileri kablosuz ağlar (Wi-Fi, ZigBee, LoRa) üzerinden yerel bir IoT geçidine aktarır.
- **Uygulama Katmanı** ise merkezi kontrol biriminde çalışır ve metasezgisel optimizasyon algoritmalarını kullanarak HVAC ve aydınlatma sistemlerinin çalışma parametrelerini günceller.

Sensörlerden toplanan veriler, MATLAB ortamında oluşturulan sanal IoT modeline aktarılmıştır. Modelde, dış ortam sıcaklığı (T_{out}), kullanıcı varlığı (occ), tercih edilen konfor sıcaklığı (T_{pref}) ve iç ortam aydınlık seviyesi (L_{in}) gibi değişkenler sistemin girişini oluşturur. Optimizasyon algoritmaları, bu girdilere bağlı olarak HVAC set noktaları (T_r) ve aydınlatma parlaklık oranları (L_{set}) karar değişkenlerini üretir. Matematiksel olarak sistemin genel optimizasyon yapısı Denklem 1'deki gibi ifade edilir:

$$\min F = w_H F_{HVAC}(T_r, T_{out}, T_{pref}, occ) + w_L F_{Light}(L_{set}, L_{in}, occ) \quad (1)$$

burada w_H ve w_L ağırlık katsayılarıdır ve bu çalışmada her iki sistemin bağımsız optimizasyonu için $w_H = 1$ ve $w_L = 0$ (HVAC için) veya $w_H = 0$, $w_L = 1$ (Aydınlatma için) olarak tanımlanmıştır. Bu mimari yapı sayesinde sistem, gerçek zamanlı IoT verilerini alarak kendi çalışma parametrelerini uyarlamalı biçimde optimize edebilmekte ve hem enerji hem konfor bileşenlerinde küresel optimuma yakın çözümler üretebilmektedir.

3.2 HVAC Optimizasyon Modeli

HVAC sistemi, binadaki iç ortam sıcaklıklarını kullanıcı konforunu bozmadan minimum enerji tüketimiyle kontrol etmeyi amaçlar. Bu nedenle amaç fonksiyonu iki bileşenden oluşur: enerji tüketimi ve konfor sapması. Amaç fonksiyonu Denklem 2’de tanımlanmıştır:

$$\min F_{HVAC} = w_E \sum_{h=1}^H |T_{out}(h) - T_r| + w_C \sum_{h=1}^H occ(h) \cdot |T_r - T_{pref}(h)| \quad (2)$$

burada T_r : iç ortam sıcaklık set noktası (°C), $T_{out}(h)$ h . saatte dış ortam sıcaklığı, $T_{pref}(h)$ kullanıcı tercih sıcaklığı, $occ(h)$ işgal durumu (1: dolu, 0: boş), w_E enerji ağırlığı (bu çalışmada 1.0), w_C konfor ağırlığı (bu çalışmada 8.0), H 24 saatlik simülasyon süresini temsil etmektedir. Bu modelde ± 0.5 °C ölü bant uygulanarak konfor cezası sınırlandırılmıştır. Böylece sistem, küçük sıcaklık dalgalanmalarında enerji israfı yapmadan konforu koruyabilmektedir. Ayrıca, penalty fonksiyonu P_{lim} ile sıcaklık sınırları güvence altına alınmıştır ve Denklem 3’teki gibi hesaplanmıştır:

$$P_{lim} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } T_r < 20 \text{ veya } T_r > 26 \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3)$$

ve nihai maliyet fonksiyonu Denklem 4’teki gibi tanımlanmıştır:

$$F_{HVAC,total} = w_E \cdot E_{norm} + w_C \cdot C_{norm} + 10^6 P_{lim} \quad (4)$$

3.3. Aydınlatma (Dimleme) Optimizasyon Modeli

Akıllı binalarda aydınlatma sistemleri, enerji tüketiminde HVAC’tan sonra ikinci en büyük paya sahiptir. Bu nedenle, aydınlatma düzeyinin zaman ve çevresel koşullara göre dinamik olarak ayarlanması, enerji verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada geliştirilen aydınlatma optimizasyon modeli, IoT sensörlerinden alınan ışık ve hareket verilerine dayanarak parlaklık oranlarını (dimleme seviyelerini) 0–1 aralığında optimize etmektedir.

Aydınlatma sisteminin kontrol değişkeni $L_{set}(t)$, belirli bir zaman diliminde uygulanacak parlaklık oranını temsil eder. Amaç, gün boyunca kullanıcı konforunu (görsel yeterlilik) koruyarak enerji tüketimini minimuma indirmektir. Bu hedef, Denklem 5’teki amaç fonksiyonu ile formüle edilmiştir:

$$\min F_{Light} = \alpha \sum_{t=1}^T P(L_{set}(t)) + \beta \sum_{t=1}^T occ(t) \cdot D(L_{set}(t), L_{pref}(t)) \quad (5)$$

burada $L_{set}(t)$ t . zaman aralığındaki ayarlanmış parlaklık oranını (0–1 aralığında), $L_{pref}(t)$ kullanıcı tercih parlaklığını (konfor seviyesi), $P(L_{set})$ enerji tüketimi fonksiyonunu, $D(L_{set}, L_{pref})$ aydınlatma konfor sapmasını, $occ(t)$ alanın işgal durumunu (1: dolu, 0: boş), α enerji ağırlık katsayısını (1.0), β konfor ağırlık katsayısını (4.0), T 24 saatlik simülasyon süresini temsil etmektedir. Enerji tüketimi fonksiyonu, parlaklık oranı ile doğrusal ilişki göstermektedir ve Denklem 6'daki gibidir:

$$P(L_{set}) = L_{set}(t) \quad (6)$$

buna karşın konfor sapması, istenen minimum aydınlık düzeyinin altına düşüldüğünde ceza uygulayan bir fonksiyonla modellenmiştir. Bu fonksiyon Denklem 7'deki gibidir:

$$D(L_{set}, L_{pref}) = \begin{cases} (L_{pref} - L_{set})^2, & \text{eğer } L_{set} < L_{pref} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (7)$$

Modelde L_{set} karar değişkenleri 24 zaman dilimini temsil eden 24 boyutlu bir vektör olarak tanımlanmıştır. Böylece optimizasyon süreci, günün her saati için en uygun parlaklık oranlarını belirlemektedir. Sınır koşulları ise Denklem 8'deki şekilde tanımlanmıştır:

$$0 \leq L_{set}(t) \leq 1, \forall t \in [1, 24] \quad (8)$$

3.4. Kullanılan Metasezgisel Algoritmalar

Bu çalışmada, IoT tabanlı akıllı bina sistemlerinde enerji–konfor optimizasyonu problemleri üç modern metasezgisel algoritma ile çözülmüştür: Mirage Search Optimization (MSO), Phototropic Growth Algorithm (PGA) ve Stellar Oscillation Optimizer (SOO). Bu algoritmaların ortak amacı, çok boyutlu arama uzayında küresel optimuma yakın çözümleri elde ederken erken yakınsamayı önlemektir. Her biri doğadaki fiziksel veya biyolojik bir mekanizmayı matematiksel olarak modellemektedir.

3.4.1. Mirage Search Optimization (MSO)

Mirage Search Optimization (MSO) algoritması, sıcak hava tabakalarında oluşan ışık kırılması (serap etkisi) fenomeninden esinlenmiştir. Bu doğa olayı, ışığın farklı yoğunluklara sahip hava katmanlarından geçerken bükülmesiyle sanal bir görüntü (mirage) oluşturur. MSO, bu kırılma prensibini kullanarak aday

çözümlerin yönünü “gerçek optimuma” doğru kırarak yönlendiren bir optimizasyon süreci kurar [4]. Algoritmanın temel keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) mekanizmaları, sıcaklık farkına bağlı kırılma katsayısı R_i üzerinden modellenir ve Denklem 9’deki şekilde temsil edilmektedir:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + R_i \cdot (Best - X_i^t) + \lambda \cdot randn(1, dim) \quad (9)$$

burada X_i^t popülasyondaki i . adayın t . iterasyondaki konumudur, $Best$ en iyi çözümdür, R_i kırılma katsayısını, λ ise rastgele yayılım katsayısını temsil eder. İterasyon ilerledikçe R_i dinamik olarak azaltılır ve böylece algoritma keşif aşamasından sömürü aşamasına geçer. MSO, bu çalışmada hızlı enerji azalışı ve keşif yeteneği nedeniyle tercih edilmiştir. Ancak yüksek keşif oranı, bazı durumlarda kararsızlığa yol açtığından algoritmanın performansı ortalama yakınsama süresi üzerinden değerlendirilmiştir.

3.4.2. Phototropic Growth Algorithm (PGA)

Phototropic Growth Algorithm (PGA), bitkilerin ışığa yönelim davranışı olan fototropizm olgusundan esinlenmiştir. Bitkiler, fotosentez verimliliğini artırmak için ışık kaynağına doğru yönelerek büyürler; PGA, bu biyolojik süreci optimizasyon problemlerine uyarlayarak aday çözümleri “en iyi birey” yönüne eğimli biçimde büyütür [5]. Algoritmanın yönelme ve büyüme mekanizması Denklem 10’deki şekilde tanımlanır:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \eta \cdot \phi_i \cdot (Best - X_i^t) + \sigma \cdot N(0,1) \quad (10)$$

Burada ϕ_i bitkinin ışık yönelim vektörüdür, rastgele yönelimli fakat “en iyi birey” yönünde normalize edilir. η büyüme hızı katsayısıdır (0–1 aralığında azalır). $\sigma \cdot N(0,1)$ çevresel gürültüyü simüle eden normal dağılımlı küçük sapmadır. PGA, yönlü büyüme stratejisi sayesinde hem konfor hem enerji optimizasyonu açısından dengeli çözümler üretmektedir.

3.4.3. Stellar Oscillation Optimizer (SOO)

Stellar Oscillation Optimizer (SOO) algoritması, yıldızsal titreşim (stellar oscillation) fenomeninden ilham alan fizik tabanlı bir optimizasyon yöntemidir [6]. Yıldızların iç yapısındaki yoğunluk ve basınç farkları, belirli frekanslarda salınımlara (osilasyonlara) yol açar. SOO, bu salınım davranışını kullanarak aday çözümleri, arama uzayında sinüzoidal salınım hareketleriyle iteratif biçimde günceller. Algoritmanın temel hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$X_i^{t+1} = Best + A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \theta_i) \quad (11)$$

burada A_i salınım genliğini (iterasyon ilerledikçe azalır), ω_i açısal frekansı, θ_i rastgele faz açısını, $Best$ ise o andaki en iyi çözümü temsil etmektedir. Bu yapı, çözümlerin optimum nokta çevresinde dairesel titreşimlerle hareket etmesini sağlayarak yerel minimumlardan kaçınma kabiliyeti kazandırır.

Kullanılan algoritmaların karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan metasezgisel yöntemlerin karşılaştırılması

Özellik	MSO	PGA	SOO
İlham Kaynağı	Serap (Mirage) optik olayı	Fototropik bitki büyümesi	Yıldız titreşim dinamikleri
Temel Arama Mekanizması	Kırılma ve optik yoğunluk farkı	Işık yoğunluğu ve büyüme yönelimi	Enerji dengeleme osilasyonu
Keşif Gücü	Yüksek (erken faz)	Orta	Orta
Sömürü Gücü	Orta	Yüksek	Yüksek (stabil)
Yakınsama Hızı	En hızlı	Dengeli	Daha yavaş ama kararlı
HVAC Performansı	En düşük ortalama maliyet	Yüksek konfor dengesi	En düşük varyans (kararlılık)

4. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada akıllı bina ortamında HVAC sistemlerinin sıcaklık set noktalarının optimizasyonu ve akıllı aydınlatma sistemi üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında üç farklı doğa temelli metasezgisel algoritma (MSO, PGA, SOO) modelleri, MATLAB R2024b ortamında uygulanmıştır. Simülasyonlar, 64-bit işletim sistemine sahip Intel(R) Core(TM) i7-10750H işlemcili ve 16 GB RAM kapasiteli bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Tüm algoritmalar, aynı başlangıç koşulları ve parametrelerle çalıştırılarak adil bir karşılaştırma yapılmıştır. Her bir metasezgisel algoritma için popülasyon büyüklüğü 40 ve maksimum iterasyon sayısı 200 olarak belirlenmiştir. Her bir algoritma, her problem için 20 bağımsız tekrar ile çalıştırılmıştır. Arama uzayı ve karar değişkenleri, optimize edilen probleme göre tanımlanmıştır ve Tablo 2’deki gibidir:

Tablo 2. Problemlerin arama uzayı ve karar değişkenleri

Problem	Karar Değişkeni	Alt Sınır (lb)	Üst Sınır (ub)	Boyut (dim)
HVAC Optimizasyonu	Oda sıcaklık set noktaları (T_r)	20	26	5
Aydınlatma Optimizasyonu	Parlaklık oranı (L_{set})	0	1	24

Performans değerlendirmesi için beş farklı ölçüt kullanılmıştır: En İyi Skor (Best) 20 tekrar içindeki minimum toplam maliyet değerini, en kötü skor (Worst) 20 tekrar içindeki maksimum toplam maliyet değeri, ortalama skor (Mean) ortalama maliyet algoritmanın genel başarı düzeyini, standart sapma (STD) sonuçların kararlılığını gösteren varyasyon ölçütünü, ortalama süre (Time) her çalıştırma için geçen ortalama işlem süresini (saniye) temsil etmektedir. Ek olarak, algoritmaların yakınsama hızlarını değerlendirmek amacıyla yakınsama grafikleri ve kutu grafiği analizleri üretilmiştir. Bu görseller, algoritmaların arama süreci boyunca küresel optimuma yaklaşma davranışlarını görsel olarak karşılaştırmaktadır. Her iki sistem için tipik bir akıllı bina senaryosu modellenmiştir:

- **HVAC senaryosu:** 5 farklı oda sıcaklık set noktası, 24 saatlik dış ortam sıcaklığı profili ve işgal durumu (*occ*) bilgisi kullanılmıştır. İşgal süresi 09:00–18:00 aralığında 1, diğer zamanlarda 0 olarak tanımlanmıştır. Dış sıcaklık $T_{out}(h) = 5 + 15 \cdot \sin(\frac{2\pi h}{24} - \pi/2)$ olarak oluşturulmuştur.
- **Aydınlatma senaryosu:** Günün 24 saatine karşılık gelen parlaklık oranı (L_{set}) vektörü optimize edilmiştir. Doğal ışık etkisi sabah ve akşam düşük, öğlen saatlerinde yüksek olacak biçimde modellenmiştir. Kullanıcı tercih seviyesi $L_{pref} = 0.6$ olarak belirlenmiş, işgal durumu aynı HVAC senaryosuyla senkronize edilmiştir.

4.1. HVAC Optimizasyonu Bulguları

Akıllı bina ortamında HVAC sistemlerinin sıcaklık set noktalarının optimizasyonu amacıyla üç farklı doğa temelli metasezgisel algoritma (MSO, PGA, SOO) kullanılmıştır. Her algoritma 20 bağımsız çalıştırma ile test edilmiş; enerji tüketimi ve konfor sapmasını birlikte minimize eden maliyet fonksiyonu üzerinden karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, algoritmaların performansını hem yakınsama kalitesi hem de hesaplama verimliliği bakımından açık biçimde ortaya koymaktadır. Her algoritmanın en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma

değerleri Tablo 3’te sunulmuştur. Ek olarak, her algoritmanın 20 çalıştırma sonucunda elde ettiği ortalama hesaplama süresi de tabloya dahil edilmiştir.

Tablo 3. HVAC optimizasyonu için algoritma karşılaştırma sonuçları

Algoritma	En İyi (Best)	En Kötü (Worst)	Ortalama (Mean)	Std Sapma	Ortalama Süre (s)	Std Süre (s)
MSO	18.000	18.000	18.000	0	0.12338	0.0028216
PGA	18.018	18.052	18.036	0.0085296	0.24565	0.0077107
SOO	18.028	18.131	18.076	0.033118	0.13983	0.0034789

Tablo 3’e göre, Mirage Search Optimizer (MSO) algoritması, tüm çalıştırmalarda aynı optimum noktaya ulaşarak en düşük maliyet değerini (18.0000) üretmiştir. Standart sapmanın sıfır olması, MSO’nun arama uzayında tamamen kararlı ve deterministik bir yakınsama gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu davranış, algoritmanın optik kırılma temelli arama mekanizmasının güçlü bir sömürü yeteneğine sahip olduğunu; dolayısıyla yerel minimumlara takılmadan doğrudan global optimuma ulaştığını göstermektedir. Ortalama hesaplama süresinin 0.12 saniye olması, yöntemin yalnızca doğru değil aynı zamanda hızlı olduğunu da ortaya koymaktadır. HVAC sistemleri gibi gerçek zamanlı kontrol gerektiren uygulamalarda bu hız, yöntemin pratik uygulanabilirliğini artıran önemli bir avantajdır.

Phototropic Growth Algorithm (PGA), MSO’ya oldukça yakın sonuçlar vermiş ve ortalama maliyet açısından yalnızca %0.2’lik bir farkla ikinci sırada yer almıştır. PGA’nın öne çıkan özelliği, bitkilerin ışığa yönelim davranışından türetilen fototropik yönelme mekanizması sayesinde erken iterasyonlarda yüksek keşif kabiliyetini korurken, ileri iterasyonlarda konfor ağırlığı baskın hale geldiğinde sömürü yönelimine geçmesidir. Standart sapmanın (0.0085) düşük olması, algoritmanın kararlı bir şekilde optimum bölgeye yakınsadığını; ancak ölü bant içinde küçük varyasyonlar göstererek çözüm çeşitliliğini koruduğunu göstermektedir. Ortalama süre (0.24 s) MSO’ya kıyasla biraz daha uzun olsa da, konfor yönelimli yapısı nedeniyle bu fark enerji-konfor dengesine katkı sağlayan bir maliyettir. PGA’nın en iyi çözüm vektörünün tüm odalar için 23.0 °C civarında değerler üretmesi, algoritmanın fiziksel optimum bölgeyi doğru biçimde yakaladığını doğrulamaktadır.

Stellar Oscillation Optimizer (SOO) ise, yıldızsal titreşim dinamiklerinden esinlenen yapısı sayesinde kararlı fakat nispeten daha yavaş bir yakınsama davranışı sergilemiştir. Ortalama maliyet değeri 18.076 olup, bu değer diğer iki algoritmaya kıyasla hafifçe yüksektir. Bununla birlikte standart sapmanın

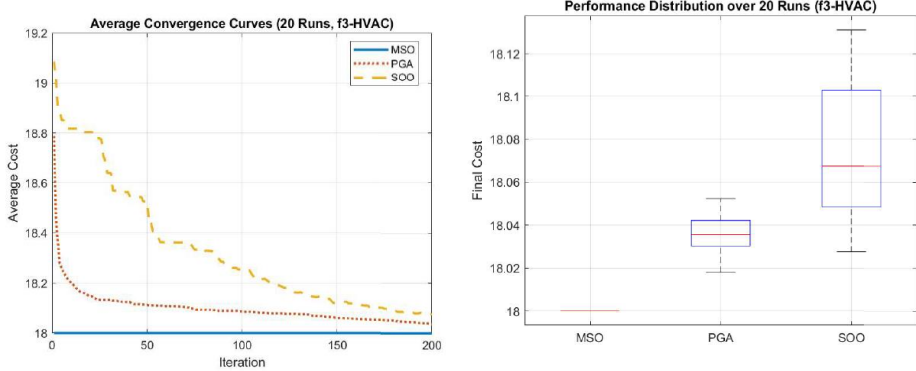
(0.0331) sınırlı kalması, SOO'nun popülasyon içi osilasyon mekanizmasının çözüm çeşitliliğini korurken istikrarlı bir sömürü sağladığını göstermektedir. Ortalama çalışma süresinin 0.14 s olması, algoritmanın hesaplama karmaşıklığının makul düzeyde kaldığını ve gerçek zamanlı HVAC kontrolüne uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. SOO'nun bulduğu optimum sıcaklık set noktaları, 22.97–23.08 °C aralığında değişmekte olup, konfor ölü bandı (± 0.5 °C) içinde kalmıştır.

Üç algoritmadan elde edilen ortak sonuç, tüm yöntemlerin HVAC sistemi için fiziksel olarak tutarlı bir enerji–konfor dengesi sağlamış olmasıdır. Tüm set noktalarının yaklaşık 23 °C civarına yakınsaması, kullanıcı tercih sıcaklığı $T_pref = 22$ °C ve ölü bant toleransı ($\Delta_dead = 0.5$ °C) ile tam uyumludur. Bu durum, sistemin konfor cezası bileşeninin sıfıra yaklaştığını ($C_norm \approx 0$) ve maliyet fonksiyonunun büyük ölçüde enerji bileşeninden ($E_norm \approx 18$) oluştuğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, tüm algoritmalar kullanıcı konforunu korurken enerji tüketimini minimum düzeye indirmiştir.

Bilimsel olarak değerlendirildiğinde, MSO algoritması en hızlı ve en kararlı yakınsamayı sağlayarak enerji verimliliği açısından üstünlük göstermiştir. PGA ise konfor odaklı uyum ve yüksek çeşitlilik sayesinde dengeli bir performans sergilemiştir. SOO, göreceli olarak daha yavaş olmasına rağmen kararlılığı ve düşük varyansı ile istikrarlı çözümler üretmiştir. Bu bulgular, farklı doğa tabanlı metasezgisel mekanizmaların aynı HVAC probleminde benzer optimuma ulaşabileceğini, ancak yakınsama hızı, çözüm çeşitliliği ve kararlılık bakımından farklı avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, önerilen modelin ve kullanılan algoritmaların her biri, HVAC sistemlerinde enerji tasarrufu ile kullanıcı konforu arasında fiziksel olarak anlamlı bir denge kurabilmiştir. Özellikle MSO algoritması, hem minimum maliyet değeri hem de sıfır varyans ile bu dengeyi en ideal biçimde temsil eden yöntem olarak öne çıkmıştır.

Her algoritmanın yakınsama eğrileri ve sonuç dağılımları Şekil 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği üzere, MSO algoritması ilk iterasyonlarda hızlı bir enerji azalımı sağlamıştır ve kararlı bir yakınsama davranışı göstermiştir. PGA algoritması, daha dengeli ve istikrarlı bir eğriyle en düşük nihai maliyet değerine ulaşmıştır. Buna karşın, SOO algoritması salınım tabanlı yapısı nedeniyle optimuma daha geç yakınsamış ancak standart sapması düşük sonuçlar üretmiştir. Kutu grafikleri, özellikle MSO'nun düşük varyanslı performansı ile HVAC sisteminde en kararlı optimizasyon başarısını elde ettiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 1. HVAC sistemi için algoritmaların yakınsama eğrileri ve kutu grafiği karşılaştırması

4.2. Aydınlatma (Dimleme) Optimizasyon Bulguları

Akıllı aydınlatma sistemi üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında, üç farklı doğa temelli metasezgisel algoritma (MSO, PGA ve SOO) 20 bağımsız tekrar ile değerlendirilmiştir. Amaç fonksiyonu, enerji tüketimi ile aydınlatma konforu arasında optimum dengeyi kurmak üzere tanımlanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4’te özetlenmiştir.

Tablo 4. Akıllı aydınlatma optimizasyonu sonuçları

Algoritma	En İyi (Best)	En Kötü (Worst)	Ortalama (Mean)	Std Sapma	Ortalama Süre (s)	Std Süre (s)
MSO	14.726	95.824	23.151	18.262	0.038	0.009
PGA	13.324	14.541	13.739	0.309	0.178	0.016
SOO	16.601	18.581	17.699	0.522	0.056	0.008

Elde edilen sonuçlar, algoritmaların arama uzayındaki davranışlarını açıkça ortaya koymaktadır. Phototropic Growth Algorithm (PGA) en düşük ortalama maliyet değerine (13.739) ulaşarak, enerji ve konfor dengesi bakımından en verimli çözümü üretmiştir. PGA’nın düşük standart sapma değeri (0.309), 20 bağımsız çalıştırma boyunca oldukça kararlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu durum, fototropik yönelim mekanizmasının (bitkilerin ışık kaynağına uyumlu büyüme davranışı) aydınlatma probleminde konfor terimini başarıyla optimize ettiğini ve çözüm çeşitliliğini koruyarak yerel minimumlara takılmadığını göstermektedir. Ayrıca ortalama hesaplama süresinin 0.18 saniye olması, yöntemin hem kararlı hem de pratik olarak hızlı çalıştığını göstermektedir.

Mirage Search Optimizer (MSO) başlangıçta hızlı bir enerji azalışı sağlamış olsa da, sonuçlar oldukça geniş bir dağılım göstermektedir (Std = 18.26). En kötü skorun (95.824) oldukça yüksek olması, MSO'nun erken iterasyonlarda fazla keşif yapması nedeniyle bazı çalıştırmalarda optimum bölgeden uzaklaştığını göstermektedir. Buna karşın, en iyi durumda 14.726 maliyet değeriyle oldukça iyi bir sonuca ulaşmıştır. Bu durum, optik kırılma temelli arama mekanizmasının doğru koşullarda güçlü bir sömürü potansiyeline sahip olduğunu, ancak bu problemde adaptif parametre ayarlarının hassasiyet gerektirdiğini düşündürmektedir. Ortalama sürenin yalnızca 0.038 saniye olması, MSO'nun hesaplama açısından en hızlı yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

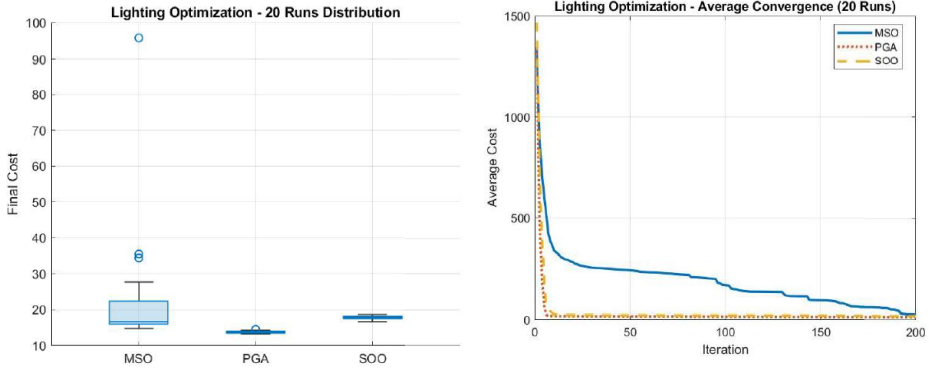
Stellar Oscillation Optimizer (SOO), 17.699 ortalama maliyet değeri ile orta düzeyde performans sergilemiştir. Standart sapmanın (0.522) düşük olması, yıldızsal titreşim temelli arama sürecinin dengeli ve istikrarlı bir yakınsama sağladığını göstermektedir. SOO'nun ortalama süresi (0.056 s), MSO'dan uzun fakat PGA'dan kısa olup, hesaplama karmaşıklığının makul düzeyde olduğunu doğrulamaktadır. Osilasyon tabanlı yapısı nedeniyle arama süreci daha yavaş ilerlemekte, ancak kararlılık korunmaktadır.

En iyi pozisyon vektörleri incelendiğinde, üç algoritmanın da parlaklık oranlarını 0.3–0.6 aralığında dengelediği görülmektedir. Bu oran, gündüz saatlerinde doğal ışık katkısının yüksek olduğu ofis veya koridor senaryolarında optimum enerji-konfor dengesine karşılık gelir. Özellikle PGA'nın bulunduğu profil, sabah saatlerinde düşük, öğle civarında artan, akşam saatlerinde tekrar azalan bir ışık dağılımını temsil etmektedir; bu, fototropik modelin gerçek fiziksel aydınlık adaptasyonu ile tutarlı bir sonuçtur.

Sonuç olarak, yapılan karşılaştırmalar göstermektedir ki PGA algoritması, akıllı aydınlatma optimizasyonu probleminde hem ortalama maliyet hem kararlılık açısından en uygun çözümü üretmiştir. MSO, çok hızlı çalışmasına rağmen aşırı keşif nedeniyle kararlılık kaybı yaşamış, SOO ise istikrarlı fakat daha yavaş bir yakınsama göstermiştir. Tüm algoritmaların ürettiği sonuçlar, sistemin enerji tüketimini azaltırken minimum aydınlık eşiğini koruduğunu doğrulamaktadır. Bu da metasezgisel optimizasyon yöntemlerinin IoT tabanlı aydınlatma kontrol sistemlerinde konfor kaybı olmaksızın enerji verimliliği sağlayabileceğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Aydınlatma sistemine ilişkin algoritma yakınsama eğrileri ve kutu grafikleri Şekil 2'de sunulmuştur. Grafikler, PGA algoritmasının en düşük ortalama maliyetle en kararlı yakınsamayı sağladığını, SOO algoritmasının salınım hareketleri nedeniyle daha yavaş ancak kararlı bir performans sergilediğini, MSO algoritmasının ise erken iterasyonlarda yüksek keşif gücüyle hızlı enerji azalışı sağlasa da daha yüksek varyans ürettiğini göstermektedir. Bu görsel analizler,

PGA'nın aydınlatma sistemlerinde enerji-konfor dengesini optimize etmede en verimli yaklaşım olduğunu desteklemektedir.



Şekil 2. Aydınlatma sistemi için algoritmaların yakınsama eğrileri ve kutu grafiği karşılaştırması

5. Sonuç

Bu çalışmada, IoT tabanlı akıllı bina yönetim sistemlerinde enerji verimliliği ve kullanıcı konforunu dengeleyen iki temel alt sistem HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) ve aydınlatma (dimleme) üzerinde metasezgisel optimizasyon temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Modelleme sürecinde, her iki alt sistemin karar değişkenleri (oda sıcaklık set noktaları ve parlaklık oranları) MATLAB ortamında ayrı ayrı tanımlanmış, enerji ve konfor bileşenlerini birlikte minimize eden çok boyutlu amaç fonksiyonları oluşturulmuştur.

Deneyisel analizlerde, üç modern metasezgisel yöntem Mirage Search Optimization (MSO), Phototropic Growth Algorithm (PGA) ve Stellar Oscillation Optimizer (SOO) 20 bağımsız tekrarla test edilmiştir. Sonuçlar, algoritmaların farklı keşif-sömürü stratejileri nedeniyle sistemlere özgü farklı performanslar sergilediğini göstermiştir. HVAC sisteminde tüm algoritmalar $T_r \approx 23^\circ\text{C}$ civarında kararlı çözümlere ulaşmış, enerji maliyeti açısından en iyi sonuç MSO tarafından elde edilmiştir. Buna karşın, PGA algoritması en düşük varyans ve en dengeli yakınsama profiliyle öne çıkmıştır. SOO algoritması ise yavaş yakınsamasına rağmen kararlı sonuçlar üretmiş, sistemin fiziksel kısıtlarını ihlal etmeden optimuma ulaşmıştır.

Aydınlatma (dimleme) optimizasyonunda ise PGA algoritması açık ara üstün performans göstermiştir. Fototropik yönelim modeli sayesinde doğal ışık katkısını dikkate alarak enerji tüketimini azaltmış ve kullanıcı konforunu korumuştur. MSO erken iterasyonlarda hızlı enerji azalışı sağlasa da yüksek

varyans nedeniyle kararlılıkta zayıf kalmıştır. SOO ise sabit titreşim yapısı sayesinde orta düzeyde maliyetle istikrarlı bir performans sergilemiştir.

Elde edilen bulgular, önerilen optimizasyon yaklaşımının IoT tabanlı akıllı bina kontrol sistemlerinde gerçek zamanlı uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Hem HVAC hem aydınlatma modellerinde ortalama optimizasyon süresinin 0.2 saniyenin altında olması, algoritmaların gömülü sistemlerde (ör. Raspberry Pi, Edge AI) çevrim içi uygulanmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışma, enerji verimliliği odaklı bina yönetim sistemleri için metasezgisel optimizasyonun potansiyelini ortaya koymaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda: çok hedefli (multi-objective) yaklaşımlar, metasezgisel öğrenme tabanlı adaptif optimizasyon, gerçek sensör verileriyle çevrim içi karar destek sistemleri, ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (ör. güneş paneli, batarya yönetimi) entegrasyonu araştırılarak modelin daha geniş IoT ekosistemlerine uygulanabilirliği artırılabilir.

Kaynaklar

- [1] Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72, 343–355.
- [2] Chen, X., Li, Z., & Liu, Y. (2019). Multi-objective energy optimization for smart buildings using GA and PSO. *Energy and Buildings*, 199, 90–102.
- [3] Shaikh, P. H., et al. (2020). Artificial bee colony-based energy optimization for intelligent lighting systems. *Applied Energy*, 274, 115295.
- [4] He, J., Zhao, S., Ding, J., Wang, Y. (2025). *Mirage search optimization: Application to path planning and engineering design problems. Advances in Engineering Software.*
- [5] Bohat, V. K., Hashim, F. A., Abd Elaziz, M. (2025). *Phototropic growth algorithm: A novel metaheuristic inspired from phototropic growth of plants. Knowledge-Based Systems*, 322, 113548.
- [6] Li, X., & Wang, D. (2024). *Stellar oscillation optimizer: A physics-based optimization approach for nonlinear problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 134, 107129.
- [7] Zhu, H., et al. (2023). *Real-time multi-sensor IoT data optimization using PSO for smart HVAC systems. Energy Conversion and Management*, 295, 118412.
- [8] Rehman, S., et al. (2022). *Hybrid deep learning and metaheuristic approach for adaptive lighting control. IEEE Access*, 10, 116021–

5. Bölüm

Akıllı Ulaşım Sistemlerinde V2X Haberleşmesinin Rolü: Mevcut Durum ve Eğilimler

Esin YAVUZ¹

1. Giriş

V2X ya da Araçtan Her Şeye İletişim, modern akıllı ulaşım sistemlerinin temel taşı olan ve araçların birbirleriyle ve çevreleriyle veri alışverişi yapabilmelerini amaçlayan kablosuz bir iletişim teknolojisidir. Akıllı ulaşım sistemleri (ITS - Intelligent Transportation System), otomobiller ile çevreleri arasındaki etkileşimi sağlayan V2X iletişimine dayanır. V2X, sensörlerden ve diğer kaynaklardan gelen araç hızı, konum, seyahat yönü, yol koşulları ve olası tehlikeleri içeren gerçek zamanlı bilgileri kullanarak, daha güvenli ve konforlu bir ulaşım için gerekli iletişimi sağlar. Yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik ile araçtan araca (V2V), araçtan altyapıya (V2I), araçtan yayaya (V2P) ve araçtan ağa (V2N) bağlantılarını gerçekleştirmek için en son nesil bilgi ve iletişim teknolojisini kullanır.

V2X, özellikle otomotiv endüstrisinde bağlantılı ve otonom araçların yaygınlaşmasıyla artan bir öneme sahiptir ve küresel ölçekte akıllı ve sürdürülebilir ulaşım ekosistemlerine doğru evrimi desteklemektedir [1]. Akıllı bir ulaşım sistemi, kazaları önlemek, gaz emisyonlarının neden olduğu sera etkisini azaltmak, araç akışını düzenlemek, sürücülerin sürüş becerilerini ve sürüş konforunu artırmak gibi amaçlara sahip olmalıdır [2].

ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC - Federal Communications Commission), 1999 yılında radyo spektrumunun 5,9 GHz bandının bir kısmını karayolu güvenliğini ve verimliliğini artırmak amacıyla akıllı ulaşım hizmetlerine tahsis etmiştir [3]. Böylece, akıllı ulaşım altyapısının standartlaştırılmasına yönelik ilk önemli adım atılmış ve V2X iletişimde kullanılacak kablosuz iletişim kanalları sağlanmıştır. Bu düzenleme çerçevesinde, spektrum yönetimi politikaları akıllı ulaşım hizmetlerinin gelişimini desteklemek amacıyla yeniden yapılandırılmış ve V2X teknolojisinin yaygınlaşmasına zemin hazırlanmıştır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Demirel Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-8077-5353

V2X, araçlar için ortak bir güvenlik standardı sağlayarak kazaları önlemeye, trafik akışını optimize etmeye ve sıkışıklığı azaltmaya yardımcı olur. V2X'in Yapay Zeka ile entegrasyonu araçların bağımsız karar verebilmelerini sağlarken, otomobillerdeki güvenlik önlemlerinin de iyileştirilmesine katkıda bulunur.

Mannoni vd (2019) yaptıkları çalışmada, ITS-G5 (IEEE 802.11p) ve C-V2X (3GPP Sürüm 14) standartlarını karşılaştırarak, performans değerlendirmesi yapmışlardır. Performans değerlendirmesi sonucunda, düşük araç yoğunluğu seviyelerinde C-V2X'in daha avantajlı olduğunu, fakat tıkanıklık arttığında performans farkının azaldığını ve ITS-G5 sonunda C-V2X'i geride bıraktığını belirtmişlerdir [4].

Kiela vd (2020), iki ana V2X teknolojisi olan DSRC ve C-V2X'in, temel parametrelerini, eksikliklerini ve sınırlamalarını inceleyerek, IoT tabanlı teknolojilerin modern akıllı ulaşım sistemleri çözümlerine entegre edilmesi ihtiyacını araştırmışlardır [2].

Gangwani vd (2021), makalelerinde Yapay zeka (AI) ve Makine Öğrenmesi (ML) ile trafik sıkışıklığı ve yol güvenliği sorunlarını çözebilen, kazaları önleyebilen bir akıllı ulaşım sistemini geliştirmek üzerine odaklanmışlardır. Engellerden kaçınmak için yol anormalliklerini tespit etmek, akıllı ve verimli ulaşım sağlamak için gerçek zamanlı trafik akışını tahmin etmek, güvenliği sağlamak için yol kazalarını tespit etmek ve önlemek, enerji tasarrufu için akıllı şehir ışıklarını kullanmak ve verimli ulaşım sağlamak için akıllı altyapıyı kullanarak, çeşitli ML yaklaşımlarını gözden geçirmişlerdir. Ayrıca tahmine dayalı modeller ve algoritmaların sensör verilerini kullanarak Akıllı Ulaşım Sistemini nasıl geliştirdiğini araştırmışlardır [5].

Galinski vd yazdıkları makalede, bağlantılı ve otonom araçlar bağlamında, yol güvenliğinin kritik bir unsuru olan V2X iletişimini kullanarak zincirleme çarpışma tespiti için bir çözüm sunmaktadır. Makale, iletişim protokolünün ve çözümde yer alan süreçlerin ayrıntılı bir açıklamasını sunmakta ve zincirleme çarpışma tespiti için V2X iletişiminin kullanılmasının potansiyel faydalarını tartışmaktadır [6].

Yusuf vd (2024) yaptıkları çalışmada, V2X ve otonom araçlar teknolojileri alanlarındaki en son gelişmeleri değerlendirerek, yol kullanıcılarının güvenliği için iletişim, sensör ve yapay zeka teknolojilerinin teknik bir incelemesini sunmuşlardır. Ayrıca hem görünür (LOS) hem de görüş alanı dışındaki (NLOS) yol kullanıcılarının dinamik davranışlarını içeren bir algoritma önererek, çeşitli yapay zeka teknolojilerinin eleştirel bir değerlendirmesini de sunmaktadırlar [7].

Iliopoulos vd (2025) çalışmalarında IEEE 802.11bd standardını incelemiş ve IEEE 802.11p standardı arasında kapsamlı bir karşılaştırmayı kolaylaştırmak için temel fiziksel (PHY) ve MAC katman özellikleri açıklanmışlardır. Ayrıca, IEEE

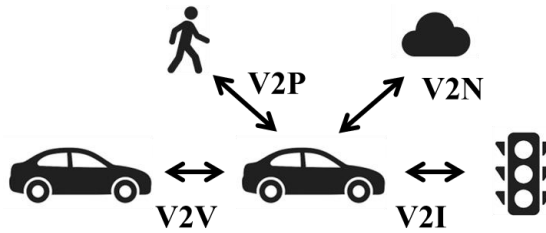
802.11bd'nin güncel V2X kullanım durumları ve senaryoları üzerindeki etkisini vurgulamış ve her durumdaki rolüne dair açıklamalar sunmuşlardır [8].

Bu çalışma, V2X iletişiminin temel bileşenleri, teknolojik standartları ve geleceği hakkında genel bir bakış sunmaktadır.

2. V2X (Vehicle to Everything)

'Araçtan herşeye' anlamına gelen V2X, bir aracın çevresindeki diğer tüm varlıklarla iletişimini tanımlar. Bu iletişim, diğer araçlar, yayalar ve bisikletliler gibi dinamik varlıklardan trafik sinyalleri ve yol işaretleri gibi statik unsurlara kadar uzanır [6]. V2X, sensörlerden ve diğer kaynaklardan gelen bilgilerin yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik bağlantıları aracılığıyla iletilmesi teknolojisidir.

V2X iletişim; V2V (araçtan araca), V2I (araçtan altyapıya), V2N (araçtan ağa) ve V2P (araçtan yayaya) olmak üzere dört farklı alt bileşene ayrılır. Her biri farklı iletişim senaryolarına ve teknik gereksinimlere hizmet eden bu ağ bağlantıları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. V2X (V2V/V2P/V2N/V2I) bağlantıları

1. Araçtan Araca (V2V-Vehicle to Vehicle): Araçlar, V2V teknolojisi aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurabilir, aynı anda verici, yönlendirici ve alıcı rolünü oynarlar [9]. Araçların, konum, hız ve yön gibi konulardaki yaygın bilgileri paylaşarak yakındaki diğer araçlarla iletişim kurması, çarpışmadan kaçınma, ani frenleme uyarıları ve kavşak güvenliği gibi işbirlikçi sürüş modellerini kolaylaştırabilir.

2. Araçtan Altyapıya (V2I-Vehicle to Infrastructure): V2I, araçlar ile yol kenarı birimleri (RSU - Road Side Units), trafik ışıkları ve trafik işaretleri gibi yol kenarı altyapıları arasındaki iletişimi sağlar; burada araçlar verici ve alıcı görevi görür [9, 10]. Arabalar ile trafik ışıkları, tabelalar, gişeler vb. gibi yol kenarı altyapısı arasındaki iletimi ifade eder. V2I, sinyalli kavşaklar için trafik akışının ve sinyalizasyon sistemlerinin optimize edilmiş zamanlamasını kontrol etmek ve

mevcut yol koşullarına göre gerçek zamanlı veri güncellemesi yapmak için kullanılabilir.

3. Araçtan Ağa (V2N-Vehicle to Network): V2N araçlar ve yönetim sistemi arasındaki iletişimi tamamlayabilir [9]. Trafik durumu, eğlence içerikleri ve hava durumu tahminleri hakkında bilgi veren ve araca navigasyon yardımı sağlayan bulut tabanlı platformlar, trafik yönetim merkezleri ya da içerik sağlayıcı ağ servisleri ile araç arasındaki iletişimi ifade eder.

4. Araçtan Yayaya (V2P-Vehicle to Pedestrian): V2P iletişimde, araçlar ve yol kenarındaki yayalar arasında doğrudan ya da ağ üzerinden, esnek ve anında iletişim sağlanır [9]. Akıllı cihazlara ya da sensörlere sahip araçlar ile Savunmasız Yol Kullanıcıları (VRU - Vulnerable Road Users) olarak adlandırılan yayalar, bisikletliler ya da motorlu iki tekerlekli araçlar arasındaki iletişimi içerir. Yakında yayalar varsa, sürücülerini uyararak, yaya geçitlerinde meydana gelebilecek kazalar önlenir.

3. V2X Teknolojileri

V2X için DSRC ve C-V2X olmak üzere iki teknoloji mevcuttur [11]. DSRC, WiFi teknolojisine dayanırken, C-V2X ise LTE mobil iletişim teknolojilerinden türetilmiştir.

Hem DSRC hem de C-V2X, V2V ve V2I iletişimlerini destekler. Ancak C-V2X, 5. Nesil (5G) hizmetleri tarafından etkinleştirilen Araçtan Ağa (V2N) iletişimlerini de destekler [12]. Her iki teknolojinin de faydaları ve zorlukları mevcuttur [10]. Düşük araç yoğunluğu seviyelerinde C-V2X için bir avantaj gösterirken, tıkanıklık arttığında performans farkı azalır ve sonunda ITS-G5, C-V2X'i geride bırakır [4].

3.1. DSRC (Dedicated Short Range Communications)

DSRC (Özel Kısa Menzilli İletişim), V2X için geliştirilen ilk protokoldür. DSRC, araçların hücresele ya da başka bir altyapı kullanmadan birbirleriyle ve diğer yol kullanıcılarıyla doğrudan iletişim kurmasını sağlayan bir kablosuz iletişim teknolojisidir. Bu protokol, yakın mesafede düşük gecikmeli iletişimi mümkün kılar.

DSRC, 75 MHz bant genişliği ve yaklaşık 300 metre (980 ft) menzile sahip 5,9 GHz bandında çalışır. DSRC, GPS teknolojisiyle birleştiğinde iletişim menzili içindeki benzer donanıma sahip araçların 360 derecelik görünümünü sağlayan düşük maliyetli bir V2V iletişim sistemidir.

1998'de FCC (ABD Federal İletişim Komisyonu), Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS) kullanımı için 75 MHz'lik bir spektrum tahsis etmiştir [13]. Bu spektrumun

bir kısmı bugün hala V2X uygulamaları için ayrılmaktadır. DSRC, 5.9 GHz frekans bandında çalışır.

DSRC'nin temelini oluşturan IEEE 802.11p standardı, ilk olarak 2010 yılında yayımlanmıştır. IEEE 802.11p standardı, araç içi ortamlarda kablosuz erişim için WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments - Araç Ortamlarında Kablosuz Erişim) olarak da bilinen IEEE 1609 standart ailesine dayanmaktadır [14, 15, 16, 17]. Bu standart, klasik Wi-Fi yapısının araçtan araca (V2V) ve araçtan altyapıya (V2I) iletişim için uyarlanmış hâlidir. DSRC, çarpışma önleme ve çok kullanıcıli erişim olanağı sağlamak için CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) tekniğini kullanır [8, 11].

Aralık 2016'da ABD Ulaştırma Bakanlığı (DOT), tüm yeni hafif ticari araçların DSRC teknolojisiyle donatılmasının zorunlu kılınmasını önermiştir. Önerilen düzenleme, V2X iletişimi için bir iletişim standardı oluşturmayı amaçlamaktadır. Avrupa Komisyonu, V2X'i on yılı aşkın süredir Avrupa'da aktif olarak desteklemektedir. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) Direktifi 2010 yılında kabul edilmiş ve V2X teknolojisini içeren C-Roads platformu 2016 yılında kullanıma sunulmuştur.

2022 yılında IEEE NGV Task Group tarafından onaylanan yeni nesil DSRC (Next Generation V2X – NGV), IEEE802.11bd olarak standartlaştırılmış ve ITS-G5 olarak adlandırılmıştır. IEEE 802.11p ile uyumlu olan bu standart, Japonya, Avrupa ve Amerika'da uygulanmaktadır. IEEE802.11bd standardı, daha yüksek hızlarda ve engellerin varlığında DSRC radyo performansını iyileştirmektedir. Bu standart ile V2X'in gelecekteki yüksek veri gereksinimlerini karşılayarak, C-V2X ile rekabet edebilmesi amaçlanmıştır. 802.11bd, daha yüksek veri hızı, daha düşük gecikme, MIMO desteği ve 5G benzeri performans sunarak otonom sürüşün gereksinimlerini karşılamayı hedefler.

IEEE 802.11bd, lisanslı spektrumu gözden geçirerek ve lisanssız spektrum çerçevesinin yeteneklerini entegre ederek bu alanda ilerleme kaydetmiştir. Özellikle, baskın lisanslı frekans bandı 5,9 GHz aralığındadır (Amerika Birleşik Devletleri'nde 5,850-5,925 GHz ve Avrupa'da 5,855-5,925 GHz), 10 veya 20 MHz genişliğinde kanallara bölünmüştür. Her 10 MHz kanalı, 52'si veri iletimi için ayrılmış 64 ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM) alt taşıyıcıdan oluşurken, 20 MHz kanalı 108'i veri için ayrılmış 128 alt taşıyıcı kullanır. Tüm alt taşıyıcılar 156,25 kHz aralıklıdır. IEEE 802.11bd, yoğun alanlardaki veri yüküne göre kaynakları tahsis etmek için gelişmiş dağıtılmış kanal erişimini (EDCA) kullanır [8].

Veri alışverişi, DSRC iletişim sistemi araçlarına takılan ve yerleşik birimler (OBU- On-Board Unit) adı verilen cihazlar ile yol kenarı birimleri (RSU - Road-Side Unit) adı verilen ve yayaların taşınabilir mobil cihazları arasında gerçekleştirilir

[14]. OBU, DSRC vericisi/alıcı olarak görev yapan, araca entegre haberleşme modülüdür. RSU ise, araçlardan veri alıp gönderen yol kenarındaki sabit birimdir. Trafik yönetim merkezleri, RSU'lardan gelen verileri analiz ederek, kontrol mekanizmasını yönetirler.

IEEE 802.11bd, evrimsel yapısı sayesinde IEEE 802.11p tabanlı sistemlerle sorunsuz olarak birlikte çalışma ve geriye dönük uyumluluk sağlamaktadır [18].

3.2. C-V2X (Cellular V2X – Hücresel V2X)

2017 yılında 3GPP tarafından onaylanan C-V2X, (Hücresel V2X) hem 4G LTE (Uzun Vadeli Evrim) hem de 5G ve 6G mobil teknolojilerini kullanarak, araç, altyapı ve ağ arasında doğrudan ve hücresel ağlar üzerinden iletişimi mümkün kılmaktadır. Hücresel iletişim modu, yönlendirme yoluyla V2V iletişimini uygulamak için mevcut LTE hücresel ağını kullanırken, doğrudan iletişim modu (PC5), araçlar arasında doğrudan iletişime olanak tanıyan DSRC'ye benzerdir [11, 16]. Hücresel haberleşme, daha geniş kapsama alanı ve daha yüksek mobilite sağladığı için, daha fazla sayıda aracın haberleşmesine olanak tanımaktadır.

İlk nesil C-V2X teknolojisi (14/15 sürümleri) LTE-V2X olarak adlandırılırken, ikinci nesil (Sürüm 16 ve sonrası) ise 5G-V2X olarak adlandırılmaktadır [19, 20].

Hali hazırda Çin ve ABD'de kullanılan 5G-V2X'in, gelecekte Avrupa araçlarında da kullanılması beklenmektedir. Bu standart, özellikle kapsama alanı, veri hızı ve güvenilirlik açısından gelişmiş çözümleri ile öne çıkmaktadır. 5,9 GHz bandında PC5 arayüzü kullanan hücresel modem teknolojisine dayanan 3GPP standardı tarafından tanımlanır.

Yeni nesil 5G-V2X, 2020 yılında 3GPP Sürüm 16'nın bir parçası olarak piyasaya sürülmüştür. Sürüm 17 ve 18, 5G-V2X'in özelliklerini artırarak, Sürüm 16 ile geriye dönük uyumluluğa sahiptir. Sürüm 16, araçlar arasında manevra koordinasyonunu benzersiz bir şekilde sağlayan güvenilir bir grup iletişimi olan grup yayını konseptini sunar. LTE-V2X ve 5G-V2X aynı kanalı paylaşamaz. ABD ve Çin'dekiler gibi devam eden C-V2X dağıtımları LTE-V2X ile devam ederken, Avrupa'dakiler gibi yeni dağıtımlar yalnızca 5G-V2X kullanacaktır.

LTE V2X'in en son 3GPP teknik özelliklerine göre, geleneksel LTE uplink ve downlink ağ trafiğinden farklı olan LTE'nin fiziksel yan bağlantısı (Sidelink) tanıtılmıştır. Sidelink'te LTE V2X iki modda çalışabilir [12]:

- 1) eNodeB'nin (eNB) kullanılacağı LTE-V-Cell modu,
- 2) Sidelink'in fiziksel bağlantı olarak kullanılacağı LTE-V-Direct modu.

4. V2X Uygulamaları

Yapay zeka ile desteklenen pek çok V2X uygulaması vardır.

4.1. Trafik Güvenliği Uygulamaları

V2X'in trafik güvenliği uygulamaları, kazaları önlemeye ve yayalar, bisikletliler ve sürücüler de dahil olmak üzere tüm yol kullanıcılarını korumaya odaklanır [21]. Çarpışma uyarı sistemleri, yoldaki hareketli ve sabit engellerin tespiti, şerit ihlali uyarısı, zincirleme kaza tespit mekanizmaları, kör nokta tespiti bu uygulamalardan bazılarıdır.

4.2. Trafik Yönetimi Uygulamaları

Yapay zeka destekli V2X iletişimi, akıllı ulaşım sistemlerinin koordinasyonu ve senkronizasyonu yoluyla trafiğin dinamik olarak yönlendirilmesine ve trafik akışının optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir. Ayrıca sürüş süresini azaltarak, araç emisyonlarından kaynaklanan hava kirliliğinin azalmasını sağlayabilmektedir [22]. Trafik yoğunluğuna göre çalışan akıllı trafik sinyalizasyon sistemleri, acil durumlarda ambulans/itfaiye/polis araçlarına yol önceliği verilmesi, yeşil dalga uygulaması ve alternatif yol önerileri bu uygulamalardan bazılarıdır.

4.3. Trafik Bilgi ve Eğlence Uygulamaları

Hız sınırı, hava durumu, navigasyon, yol durumu, rehberlik, müsait park yerleri ve otopan ücret bilgilerinin yanı sıra, araç içi eğlence ve multimedya içeriklerinin de paylaşılmasına imkan veren uygulamalardır.

4.4. Otonom Sürüş Desteği Uygulamaları

Otonom araçların çevresel farkındalıklarının artırılarak, birbirleriyle ve yol kenarındaki birimlerle kurdukları iletişim ve iş birliği yapma yeteneği sayesinde tehlikeli durumların önüne geçilebilir ve ayrıca sürüş konforu artırılabilir.

5. Sonuç ve Tartışma

Araçtan Her Şeye İletişim (V2X), araçların konumu, hızı, yörüngesi ve trafik koşulları gibi bazı bilgileri birbirleriyle ve altyapıyla paylaşmalarını sağlayarak, daha akıllı ve daha güvenli yollar oluşturmayı amaçlayan bir teknolojidir. Bu sebeple V2X, yeni nesil akıllı ulaşım sistemlerinin temel teknolojilerinden biridir. Ulaşım sistemlerinin güvenliğini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırma potansiyeline sahip olması sebebiyle V2X'e olan ilgi giderek dünyada artmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve düzenleyici çerçeveler sayesinde dünya genelindeki otomobil üreticilerinin, V2X teknolojilerini araçlarına entegre

etmeye başladıkları görülmektedir. Özellikle 5G/6G mobil teknolojiler, yapay zekâ ve ileri sensör teknolojilerinin entegrasyonu ile V2X'in farklı coğrafyalarda ve farklı kullanım koşullarında hızla yaygınlaşması beklenmektedir. Günümüzde bazı üreticiler (Qualcomm, NXP, Cohda Wireless vb.) hem C-V2X hem de 802.11bd uyumlu hibrit modüller üzerinde çalışmaktadır.

V2X teknolojisi yalnızca araç içindeki kişiler için değil, aynı zamanda yayalar, bisikletliler ve scooter sürücüleri gibi savunmasız yol kullanıcıları için de hayat kurtarmakla kalmaz, aynı zamanda mobilitayı ve verimliliği artırır. Ayrıca LiDAR, radar ve kameraların entegrasyonu ile yapay zeka uygulamaları birleştiğinde yol güvenliği daha da artmaktadır. V2X, yol güvenliğini, trafik verimliliğini ve bilgi-eğlence hizmetlerinin kullanılabilirliğini artırır.

V2X teknolojisinin bazı zorlukları ve kısıtlamaları da mevcuttur. İletişim ağlarındaki gecikmeler ağın performansının düşmesine yol açabilmektedir. Bununla birlikte ağdaki veri sızıntıları, güvenlik tehditlerinin ortaya çıkmasına sebep olabilir. Bu durumlar kazalara sebep olabileceği için hala geliştirilmeye muhtaçtır.

Hem DSRC hem de C-V2X, V2V ve V2I iletişimlerini desteklerken, C-V2X, 5. Nesil (5G) hizmetleri tarafından etkinleştirilen Araçtan Ağa (V2N) iletişimlerini de destekler. Her iki teknolojinin de faydaları ve zorlukları mevcuttur. Yapılan araştırmalar, düşük araç yoğunluğu seviyelerinde C-V2X'in kapsama alanının büyüklüğü sebebiyle daha avantajlı göstermektedir. Fakat yüksek araç yoğunluğunun trafik tıkanıklığı yarattığı durumlarda, performans farkının azaldığı ve sonunda ITS-G5'in, C-V2X'i geride bırakabildiği görülmektedir.

Bununla birlikte araştırmalar, DSRC teknolojisinin yüksek trafik hacimlerinde güvenilirlik, verimlilik ve üretkenlik sorunlarıyla karşı karşıya olduğunu göstermiştir. Dahası, DSRC iletişim teknolojileri büyük miktarda veri aktarmak ve araçlarda İnternete erişmek için tasarlanmamıştır. Yoğun trafik koşulları sırasında ve cihazlar arasında yüksek veri hızlı iletim kullanılırken, cihaz kimlik doğrulaması düzgün bir şekilde gerçekleştirilemeyebilir veya hiç gerçekleştirilemeyebilir. Bu da ağı savunmasız hale getirir. DSRC'nin bu sınırlaması, C-V2X hücresele teknolojiyi ön plana çıkarmaktadır. Ancak hücresele istasyonlar, fazla sayıda araç yoğunluğu olduğunda ağ kaynaklarını zorlamakta ve gecikmelere neden olmaktadır. Veri iletimindeki gecikmeler, trafik güvenliğinde sorunları beraberinde getirir. Mobil kullanıcı sayısının ve dolayısıyla veri aktarım miktarlarının artmasıyla, C-V2X iletişim teknolojisi aracılığıyla hücresele ağ altyapısının izin verdiği gecikme süresi içinde veri iletebilecek kapasitede olup olmadığı belirsizliğini korumaktadır. Ayrıca, C-V2X

ağlarının mobil kullanıcılarla aynı kaynakları paylaştığını ve bu durumun ek ağ yükü ve gecikme kontrol sinyalleri eklediğini belirtmek de önemlidir.

Mevcutta kullanılan DSRC ve C-V2X teknolojilerinin kendi avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu avantajların artması ve dezavantajların giderilmesi için standartlaşma, altyapı ve güvenlik gibi alanlarda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Veri gizliliğine öncelik veren sağlam politika çerçevelerinin oluşturulması, V2X iletişiminin geleceği için olmazsa olmazdır. V2X iletişimi, güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir ulaşım geleceğine doğru atılmış önemli bir adımdır.

Kaynakça

- [1] Bintoro, K. B. Y. (2025). Overview of vehicle-to-everything communication: technological advancements, applications, and future prospects in intelligent transportation systems. *JISA (Jurnal Informatika dan Sains)*. <https://doi.org/10.31326/jisa.v8i1.2187>
- [2] Kiela, K., Barzdenas, V., Jurgo, M., Macaitis, V., Rafanavicius, J., Vasjanov, A., ... & Navickas, R. (2020). Review of V2X–IoT standards and frameworks for ITS applications. *Applied sciences*, 10(12), 4314.
- [3] Federal Communications Commission (FCC). (1999). FCC allocates spectrum in the 5.9 GHz band to improve highway safety and efficiency through Intelligent Transportation Systems (ITS). FCC Report and Order 99-305. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-99-305A1.pdf>
- [4] Mannoni, V., Berg, V., Sesia, S., & Perraud, E. (2019, April). A comparison of the V2X communication systems: ITS-G5 and C-V2X. In *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)* (pp. 1-5). IEEE.
- [5] Gangwani, D., & Gangwani, P. (2021). Applications of machine learning and artificial intelligence in intelligent transportation system: A review. *Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning: Select Proceedings of ICAAAIML 2020*, 203-216.
- [6] Galinski, M., Jurako, J., Trchly, P., & Soltes, L. (2023). Chain collision avoidance using vehicle-to-everything (v2x) communication. *International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications*. <https://doi.org/10.1109/ICETA61311.2023.10344085>
- [7] Yusuf, S. A., Khan, A., & Souissi, R. (2024). Vehicle-to-everything (V2X) in the autonomous vehicles domain—A technical review of communication, sensor, and AI technologies for road user safety. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 23, 100980.
- [8] Iliopoulos, C., Iossifides, A., Foh, C. H., & Chatzimisios, P. (2025). IEEE 802.11 bd for Next-Generation V2X Communications: From Protocol to Services. *IEEE Communications Standards Magazine*.
- [9] Z. Su et al., "Measurements and Characteristics for Vehicle to Everything Channel in Tunnel Scenario at 5.9GHZ," 2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2021, pp. 230-234, doi: 10.1109/ICCC54389.2021.9674537.
- [10] Gyawali, S., Xu, S., Qian, Y., & Hu, R. Q. (2020). Challenges and solutions for cellular based V2X communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), 222-255.
- [11] Wang, J., Shao, Y., Ge, Y., & Yu, R. (2019). A survey of vehicle to everything (V2X) testing. *Sensors*, 19(2), 334.

- [12] Tong, W., Hussain, A., Bo, W. X., & Maharjan, S. (2019). Artificial intelligence for vehicle-to-everything: A survey. *IEEE Access*, 7, 10823-10843.
- [13] Yusuf, S. A., Khan, A., & Souissi, R. (2024). Vehicle-to-everything (V2X) in the autonomous vehicles domain—A technical review of communication, sensor, and AI technologies for road user safety. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 23, 100980. (https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/1998/nret8010.html)
- [14] Kiela, K., Barzdenas, V., Jurgo, M., Macaitis, V., Rafanavicius, J., Vasjanov, A., ... & Navickas, R. (2020). Review of V2X–IoT standards and frameworks for ITS applications. *Applied sciences*, 10(12), 4314.
- [15] Kenney, J. B. (2011). Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States. *Proceedings of the IEEE*, 99(7), 1162-1182.
- [16] Chen, S., Hu, J., Shi, Y., Peng, Y., Fang, J., Zhao, R., & Zhao, L. (2017). Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G. *IEEE communications standards magazine*, 1(2), 70-76.
- [17] IEEE. (2007). IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (WAVE)—networking services. *IEEE Std 1609*, 3, 1-99.
- [18] Berens, F., Sand, S., Martinez, V., Rührup, S., & Rui, R. (2023). Next Generation V2X-IEEE 802.11 bd as fully backward compatible evolution of IEEE 802.11 p (Doctoral dissertation, Car 2 Car Communication Consortium)
- [19] Lansford, J. (2023). Lte-v2x technology and standards. IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. <https://doi.org/10.1109/CSCN60443.2023.10453158>
- [20] Garca, M. H. C., Molina-Galan, A., Boban, M., Gozlvéz, J., Coll-Perales, B., & ahin, T. (2021). A tutorial on 5g nr v2x communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3057017>
- [21] Bintoro, K. B. Y. (2025). Overview of vehicle-to-everything communication: technological advancements, applications, and future prospects in intelligent transportation systems. *JISA (Jurnal Informatika dan Sains)*. <https://doi.org/10.31326/jisa.v8i1.2187>
- [22] Muhammad, M., & Safdar, G. A. (2018). Survey on existing authentication issues for cellular-assisted V2X communication. *Vehicular Communications*, 12, 50-65.

6. Bölüm

Bilgisayar Kontrollü Kartezyen Çizim Robotu Tasarımı

Muhammed Kemalettin TORAMAN¹, Nihat İNANÇ²

ÖZET

Bu çalışmada, X, Y, Z yönlerinde adım motorları aracılığı ile hareket edebilen kartezyen robotun, bilgisayarda oluşturulan vektörel grafiklerin kâğıt üzerine aktarımını gerçekleştiren bir sistem tasarlanmıştır. Sistem, kayış-kasnak mekanizmasıyla tahrik edilen unipolar step motorları, sınır anahtarları, çelik yataklama millerinden oluşan mekanik konstrüksiyon, (ii) bilgisayar-robot arayüzünü yöneten ve paralel port üzerinden haberleşen elektronik kontrol kartı, (iii) vektörel geometri komutlarını üreten ve adım motoru sürüşünü yöneten Delphi 7 tabanlı yazılım bileşenlerinden oluşmaktadır. Geliştirilen yapı ile A4 kâğıt üzerinde düz ve eğri çizgi, kare ve dikdörtgen, elips, daire ve yay, çokgen gibi temel şekiller güvenilir biçimde çizilebilmiştir. Deneyisel bulgular, önerilen mimarinin düşük maliyetle hassas konumlama, tekrarlanabilirlik ve modüler genişletilebilirlik sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kartezyen robot, vektörel çizim, adım motoru, paralel port, Delphi

¹ Öğr. Gör. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Başkale MYO Elektrik ve Enerji Bölümü.
kemalettin@yyu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9641-5387

² Prof. Dr.; Haliç Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.
rektor@halic.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2989-6632

1. GİRİŞ

İnsanın fiziksel sınırları, yüksek hız, hassasiyet ve tekrarlanabilirlik gerektiren üretim süreçlerinde makinelerin kullanımını zorunlu kılmış; başlangıçta insan desteğine bağımlı ve sınırlı işlevli düzenekler, zamanla çok işlevli ve tam otomatik sistemlere evrilmiştir. Otomasyon teknolojilerindeki hızlı gelişimle birlikte elektrik makinelerinin denetimi sayesinde “akıllı” cihazlar yaygınlaşmış, sanayide üç boyutlu otomatik konumlama sistemleri; baskı devresi delme, CNC freze ve torna tezgâhları, yazıcı-çizici plotter’lar, cam ve ahşap kesim makineleri ile oksijen-propan, plazma ve lazer kesim tezgâhları gibi çok sayıda uygulamada temel bir alt yapı haline gelmiştir (Çengelci ve Çimen, 2005).

Türkiye bağlamında, klasik mafsallı robotlara kıyasla kartezyen robotların kullanımının daha yaygın olduğu bildirilmiştir (Oysu ve ark., 2004). Manipülâtörler nesneleri önceden tespit edilen ilk konumlarından istenen konumlara taşıyan sistemlerdir (Özyalçın, 2006). Robotlar, konum, sıcaklık, ışık, hareket ve kimyasal gibi çeşitli duyuşsal geri bildirimleri algılayarak karar verme ve uygulama döngüsünü otomatik olarak yürütür (Ersöz, 2007). Tipik bir robot sistemi; algılayıcılar (sensörler), elektrik motorları gibi hareketlendiriciler, mekanik yapı, ve kontrol birimi olmak üzere dört ana bileşenden oluşur (Sciavicco ve Siciliano, 1996). İlk sistematik endüstriyel uygulamaların Japonya’da başladığı kabul edilmekte olup (Çengelci ve Çimen, 2005), robotlar günümüzde maliyeti azaltma, kaliteyi artırma ve iş sağlığı-güvenliği risklerini düşürme amaçlarıyla kesme, şekil verme, kaplama, taşlama, montaj ve kontrol gibi süreçlerde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Bu teknolojik gelişmelerin doğal sonucu olarak, robotik ve mekatronik; makine, elektronik ve bilgisayar mühendisliklerinin kesişim kümesinde konumlanan disiplinlerarası çalışma alanları olarak öne çıkmıştır. Robotik, canlı sistemler ile otomatik çalışan makineler arasındaki işlevsel benzerlikleri ve farklılıkları da inceleyerek tasarım ve denetim ilkelerini geliştirir (Ersöz, 2007; Bayrak, 2007). Robotlar işlev ve kullanım alanlarına göre endüstriyel, operasyonel ve tıp/sağlık robotları olarak sınıflandırılabilir; ayrıca sibernetik, hobi, sinema ve oyuncak endüstrisi gibi sektörel alt sınıflar da mevcuttur (Özyalçın, 2006). Mekanik mimariye göre ise başlıca sınıflar SCARA, kartezyen, küresel, mafsallı, ve silindirik robotlardır (Koca, 2007). Uygun sınıfın ve mimarinin seçimi; hedeflenen görevler için verimliliği artırırken, kullanım kolaylığı ve zaman kaybının en aza indirilmesi açısından kritik önemdedir (Arslan, 1998; Ünlü, 1997). Bu bağlamda adım motorları, doğrudan dijital darbelerle sürülebilirlikleri, kontrol edilebilirliklerinin yüksek olması ve pek çok uygulamada kapalı çevrim geri besleme gerektirmeksizin yeterli konum hassasiyeti sağlamaları nedeniyle yazıcı/çizici (plotter), delme-kesme tezgâhları

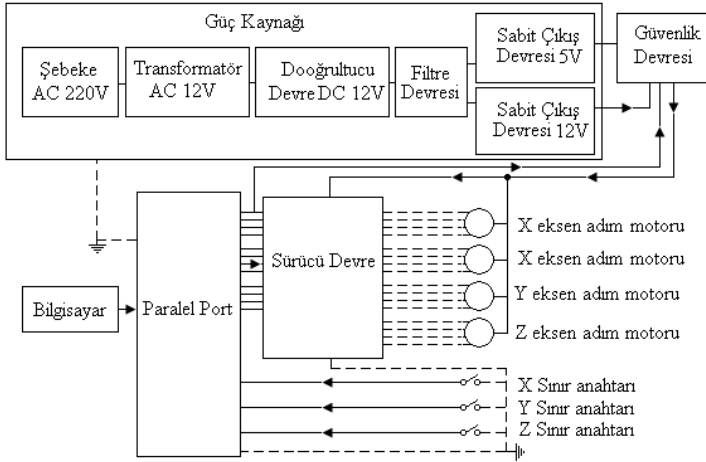
ve masaüstü kartezyen platformlar gibi otomasyon ve mekatronik uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir (Görgün, 1998).

Bu çerçevede, kartezyen mimari; doğrusal eksenlerde yüksek konumlama hassasiyeti, basit kinematik ve modüler ölçeklenebilirlik sağlaması nedeniyle özellikle bilgisayar destekli vektörel çizim/işleme uygulamalarında tercih edilmektedir. İzleyen bölümlerde, söz konusu mimari üzerine inşa edilen üç eksenli bir çizim sisteminin mekanik tasarımı, elektronik sürücü ve denetim altyapısı ile yazılım bileşenleri ayrıntılı olarak sunulacak; literatürde yer alan sınıflandırma ve tasarım ilkeleriyle ilişkilendirilerek değerlendirmeler yapılacaktır.

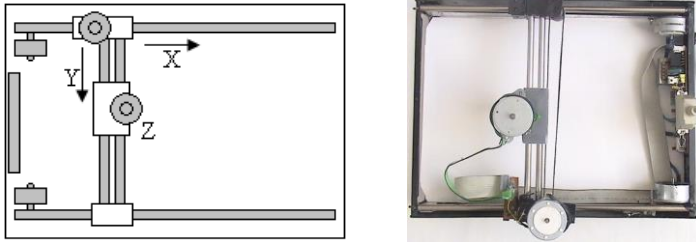
2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kontrol kartı tasarımı

Genel Mimari: Bu çalışmada geliştirilen robot model ölçekli bir kartezyen platformdur. Sistem entegrasyonuna geçmeden önce Şekil 2.1’de sunulan blok diyagramı oluşturulmuş; tasarım, bu mimari üzerinden katmanlı biçimde yürütülmüştür. Çizim elemanı olan kalem, esas kontrol edilmesi hedeflenen hareketli uç-efektördür. Sistemdeki kalem Z eksenı boyunca aşağı ve yukarı hareket ederek Şekil 2.2’de gösterilen dikdörtgensel çalışma alanında kâğıt üzerine vektörel grafikleri üretmektedir.



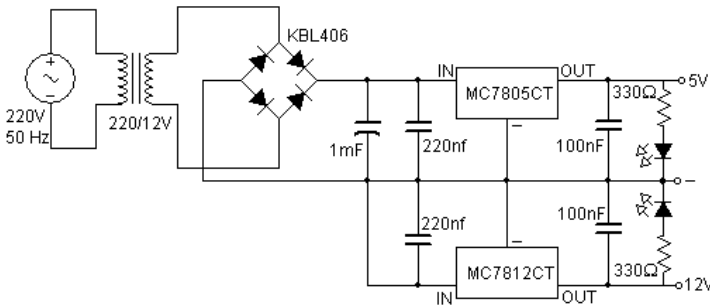
Şekil 2.1 Robot sisteminin devresi



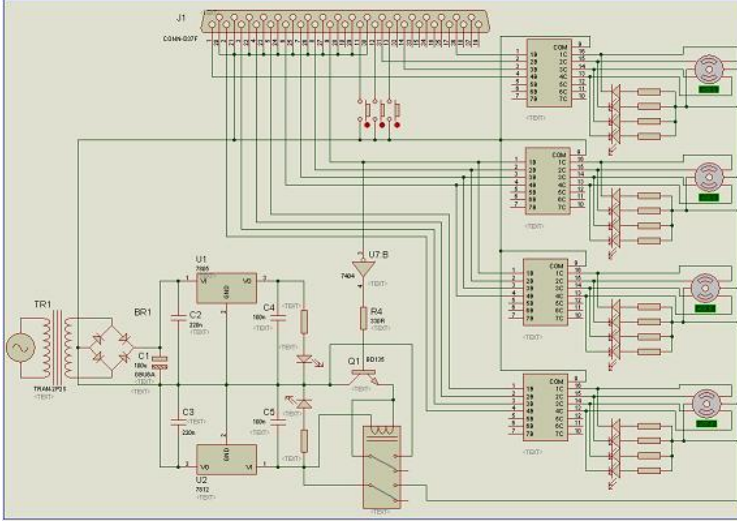
Şekil 2.2 Tasarlanan kartezyen robot sistemi

Mekanik Tasarım ve Montaj İyileştirmeleri: Montaj aşamasında olası mekanik tolerans hataları ve gevşeme risklerini azaltmak amacıyla: Motor bağlantı saplama vidalarında yay kullanılarak, ön yükleme ve titreşim sönümlenmesi sağlanmıştır. Kayışların gerginlik ayarı için kasnakları sabitleyen saplama vidalarında da yay tercih edilmiştir. Başlangıç konumlarının güvenli algılanması için iki adet mikro switch (limit sensör) ve alan kısıtlı olduğundan kalem sürücüsünün yerel kontrolünde bir adet SMD tip switch konumlandırılmıştır. Kalemın yüzeyle eş basınç ile temasını sağlamak üzere, kalem arkasına yay eklenmiştir.

Tahrik Yapısı: Platformda dört adet unipolar hibrit adım motoru kullanılmış; sürücü katmanı olarak ULN2003AN tercih edilmiştir. X ekseninde kalem taşıyıcı kütlelin gerektirdiği torku karşılamak amacıyla iki paralel adım motoru, Y ekseninde bir, Z ekseninde bir motor konumlandırılmıştır. X ve Y eksenleri yarım adım, Z eksen tam adım modunda çalıştırılmış; böylece düzlemsel eksenlerde çözünürlük artırılırken, Z yönünde yeterli düşey tepki hızı korunmuştur.

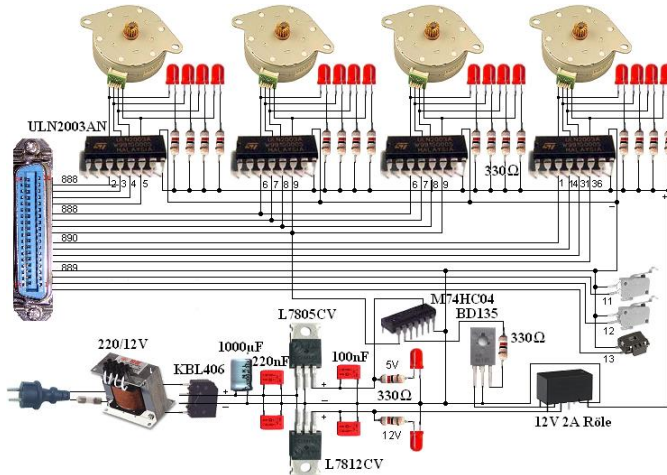


Şekil 2.3 Besleme devresi

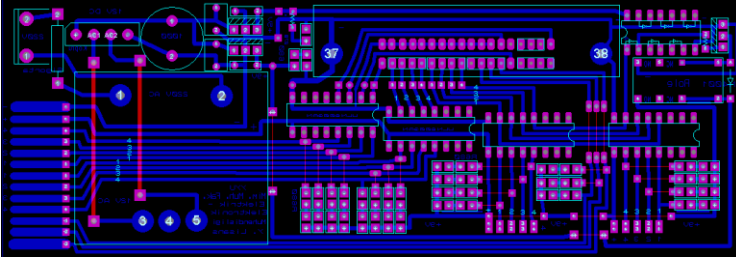


Şekil 2.4 ISIS programı ile tasarlanan elektronik kontrol devresi

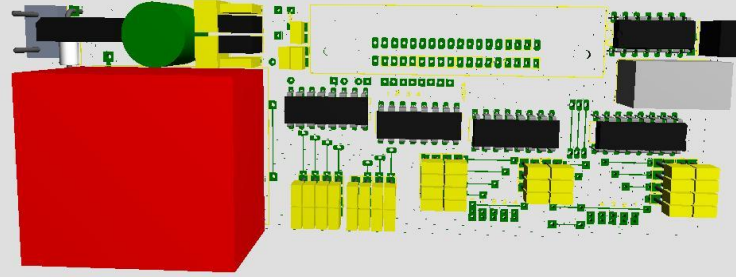
Elektronik Tasarım ve Üretim Süreci: Mekanik kurulum sonrasında Şekil 2.3'te gösterilen güç besleme katı tasarlanmıştır; ardından ISIS ortamında kontrol katı devre şeması modellenmiştir (Şekil 2.4). Kartın 3B gövde yerleşimi Şekil 2.5'te elde edilmiştir. ARES ile baskı devre (PCB) tasarımı yapılmıştır (Şekil 2.6), 3B görselleştirme oluşturulmuştur (Şekil 2.7) ve nihayet PCB üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Son aşamada bileşenler karta lehimlenerek (Şekil 2.9) elektronik modül robota monte edilmiştir. Tasarlanan kart, "akıllı" bir kontrolör olmayıp, bilgisayar ile motor sürücüler arasında köprü işlevi gören bir arayüz devresidir.



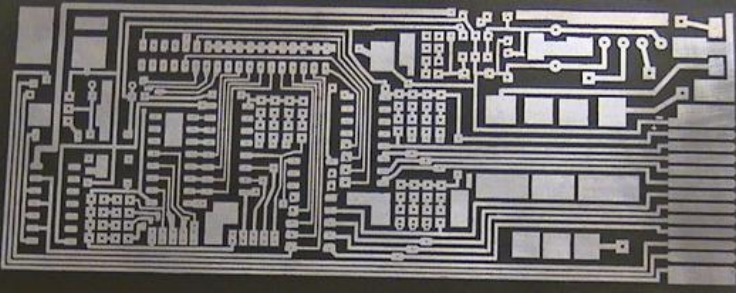
Şekil 2.5 Elektronik kontrol devresinin üç boyutlu şeması



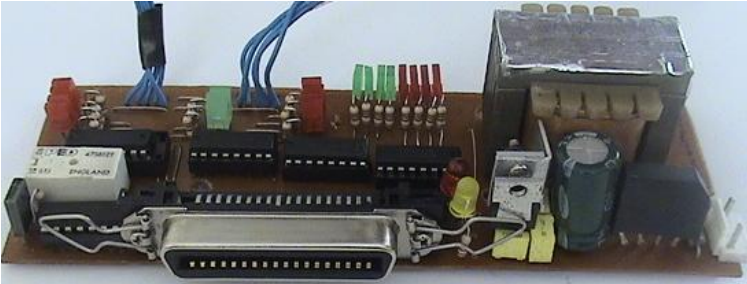
Şekil 2.6 Baskı devre



Şekil 2.7 Baskı devresinin 3D görünümünü

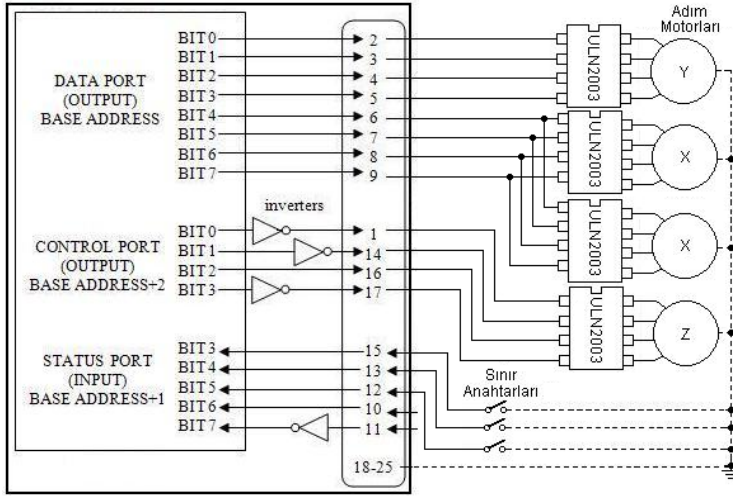


Şekil 2.8 Elektronik kontrol devresinin plaket üzerine çıktısı



Şekil 2.9 Elektronik kontrol devresi

Güç Dağıtımı: Şebeke 220 V AC gerilim, 220/12 V transformatör ile 12 V AC'ye düşürülmüş; KBL406 köprü diyot ile DC'ye doğrultulmuştur. 1000 μ F filtre kondansatörü ile dalgalanma azaltılmış; L7805CV ve L7812CV regülatörleri üzerinden 5 V ve 12 V olmak üzere iki sabit besleme elde edilmiştir. 12 V hattı kontrol/sürücü kademelerinde, 5 V hattı ise güvenlik/lojik devrelerinde kullanılmıştır.



Şekil 2.10 Paralel port, motorlar ve switch anahtarların bağlantısı

Haberleşme ve Yazmaç Eşlemesi: Şekil 2.10'dak gibi PC ile arayüzde paralel port kullanılmış ve yazmaç eşlemeleri aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır:

Data yazmacı (decimal 888):

İlk 4 bit: Y motorunun faz sürüşü

Son 4 bit: X eksenindeki iki motorun faz sürüşü

Control yazmacı (decimal 890 = 888 + 2):

4 bit: Z motorunun faz sürüşü

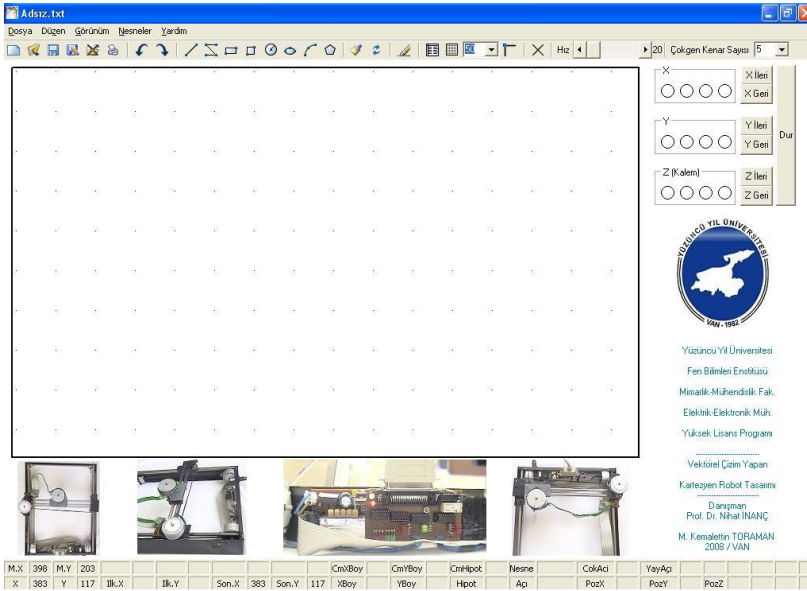
Status yazmacı (decimal 889 = 888 + 1):

3 bit: SA (sınır anahtarları) durumlarının izlenmesi

Bu yapı sayesinde, faz dizilerinin düz/ters sırada uygulanmasıyla yön kontrolü yazılımsal olarak gerçekleştirilmekte; status yazmacı üzerinden SA sinyalleri okunarak homing ve emniyet koşulları doğrulanmaktadır. Böylece, mekanik–elektronik–yazılım bileşenleri tekil bir yürütme hattında bütünleştirilmiş, çizim alanında deterministik, tekrarlanabilir ve ölçekli hareket üretimi sağlanmıştır.

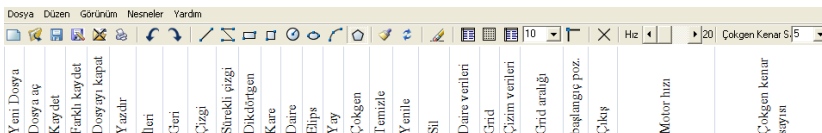
2.2 Vektörel çizim yapan program

Kullanıcı Arayüzü ve Yazılım Özellikleri: Robotun bilgisayar üzerinden denetimi için, çizim sürecini yöneten bir grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) geliştirilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Vektörel çizim yapan program

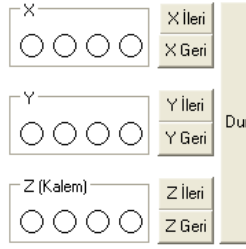
Tüm komutlar menüler aracılığıyla erişilebilir kılınmış (Şekil 2.12); çalışma durumu ve sistem geri bildirimleri durum çubuğu (status bar) üzerinden izlenebilir hâle getirilmiştir (Şekil 2.13). Motorlara giden faz/sürüş sinyallerini görselleştirmek üzere gösterge bileşenleri eklenmiş; gerektiğinde eksenlerin manuel olarak sürülmesine olanak tanıyan kontrol düğmeleri ile operatör etkileşimi desteklenmiştir (Şekil 2.14). Ayrıca yazılıma ilişkin özet bilginin sunulması için bir “Program Hakkında” formu eklenmiştir.



Şekil 2.12 Program menüleri

M.X	314	M.Y	278								CmXBoy	24	CmYBoy	14	CmHipot	27	Nesne	colgen	CokAci	72
X	299	Y	192	Ilk.X	220	Ilk.Y	144	Son.X	299	Son.Y	192	XBoy	79	YBoy	48	Hipot	92	Aci	31	PozX

Şekil 2.13 Status durum çubuğu



Şekil 2.14 Göstergeler ve manüel hareket butonları

- Çizimler vektörel olarak üretilir.
- Üretilen grafikler vektörel (TXT) ve bitmap (BMP) biçimlerinde kaydedilebilir.
- Çizimler için geri/ileri alma (undo/redo) desteği bulunur.
- Izgara (grid) görünürlüğü açılıp kapatılabilir; ızgara adımı kullanıcı tarafından ayarlanabilir.
- Veri tablosu (komut/nesne listesi) aktif / pasif yapılabilir.
- Robot menüler ile sıfır (homing) pozisyonuna getirilebilir.
- Step motorların devir ayarları yapılabilir.
- Çokgenlerin kenar sayısı menüler ile seçilebilir.
- Robot, motorları X, Y, Z eksenlerinde menüler aracılığı ile üç boyutlu hareket ettirilebilir.
- Çizim sırasında tüm çalışma parametreleri status bar üzerinden izlenebilir.
- Çalışma esnasında hangi motora hangi bilginin gönderildiği canlı olarak takip edilebilir.

Port Erişimi ve Sistem Esnekliği: Paralel porta kullanıcı modundan erişim sağlamak üzere io.dll kütüphanesi kullanılmıştır. Programa eklenen düşük seviye giriş/çıkış yordamları sayesinde robotun manuel çalıştırılması ve çevrimiçi ayarlanması mümkün hâle getirilmiş, böylece sistem işletme esnekliği artırılmıştır.

Vektörel Grafik Tercihi: Grafiklerin vektörel tasarlanması, çözünürlükten bağımsızlık ve düşük depolama gereksinimi gibi avantajlar sunar. Vektör temsilde her nesne matematiksel olarak tanımlandığından, yeniden ölçekleme ve yol üretimi sırasında kalite kaybı oluşmaz. Gerek görüldüğünde vektörel veriler bitmap biçimine kolaylıkla dönüştürülebilir; bu yaklaşım hem ekranda yüksek kaliteli önizleme hem de sahada adım komutlarına güvenilir dönüşüm açısından uygundur.

3. PROJENİN ÇALIŞTIRILMASI VE ALINAN SONUÇLAR

Bu çalışmada, kullanım kolaylığı, sürücü devresinin yalınlığı ve kompakt boyutları nedeniyle tahrik elemanı olarak adım motorları tercih edilmiştir. Kullanılan motorların adım açısı $7,5^\circ$ olup, bir tam tur 360° için $(360/7,5)$ 48 adım gerekmektedir. Kalem mekanizmasında motor milinin 1 tam turu 17 mm doğrusal yer değiştirme üretmekte; dolayısıyla adım başına çizim çözünürlüğü $(17/48)$ 0,35 olarak elde edilmektedir.

Yazılım arayüzünde kullanılan Image1 bileşeninin çözünürlüğü 780×480 pikseldir. Çizimler A4 kâğıt üzerinde gerçekleştirilmiş ve ekran-saha eşlemesinde 1 piksel = 0,35 mm ölçek katsayısı kullanılmıştır.

Bu kalibrasyon, ekranda ölçülen uzunlukların fiziksel çizim boyutlarıyla birebir uyuşmasını ve adım motoru tabanlı yürütmenin ölçüsel tutarlılığını güvence altına almaktadır.

Çizim işlemi sırasında, her nesnenin başlangıç-bitiş koordinatları ile (gerekirse) açı ve kenar sayısı gibi parametreler bir stringgrid tablosunda yapılandırılmış biçimde tutulur. “Yazdır” komutu verildiğinde, bu tablo satır satır taranarak ilgili parametreler sırayla robota iletilir ve yürütme kuyruğu (komut akışı) oluşturulur.

Tahrik katmanında, X–Y eksen motorlarının tüm uçlarındaki gerilimin kesilmesi için 888 numaralı yazmaca “0” değeri, Z eksen için ise 890 numaralı yazmaca “11” değeri gönderilmektedir. Komutlar, program içinde tablosal bir veri yapısında tamponlanarak belirlenen sıraya göre motor sürücülerine aktarılır. Motor yönü (sağ/sol dönüş), faz uyarım dizisinin motorlara düz ya da ters sıra ile uygulanmasıyla belirlenir; böylece yön kontrolü ek donanım gerektirmeksizin yazılımsal olarak gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, komut-yürütme ayrışması sayesinde veri bütünlüğünü korurken, faz uyarımlarının deterministik sırayla gönderilmesiyle konumlama tutarlılığını artırır.

```
PortX : array [0..7] of byte = (16, 48, 32, 96, 64, 192, 128, 144); // X Motor
PortY : array [0..7] of byte = (1, 3, 2, 6, 4, 12, 8, 9);           // Y Motor
PortZ : array [0..3] of byte = (10, 9, 15, 3);                   // Z Motor
```

Switch anahtarlarından elde edilen sayısal sinyaller ile, Motorların pozisyonları, portun 889 adresindeki yazmaç üzerinden izlenmektedir. Bu bilgi bit düzeyinde okunarak her bir sınır anahtarının aktif/pasif konumu güvenilir biçimde tayin edilir. Böylece, başlangıç konumu doğrulama ve güvenli çalışma sınırlarının icrası, yazılım tarafından status yazmacındaki bitlerin sürekli sorgulanması ve olay tabanlı durum makineleri ile gerçekleştirilmiş olur. Bu yazmaçtaki bilgi;

- Motorlar başlangıç pozisyonunda değilse 127,
- X başlangıç pozisyonunda ise 111,
- Y başlangıç pozisyonunda ise 95,
- Z başlangıç pozisyonunda ise 63,
- XY başlangıç pozisyonunda ise 79,
- XZ başlangıç pozisyonunda ise 47,
- YZ başlangıç pozisyonunda ise 31,
- XYZ başlangıç pozisyonunda ise 15 olarak değerlendirilir.

Programda, sınır anahtarlarının (SA) durumları ile eksen konum bilgileri tablo tabanlı bir veri yapısında tutulmakta ve çevrimsel olarak denetlenmektedir. Motorlar başlangıç (referans) konumlarına ulaştıklarında ilgili SA kontakları kapanır; bu durum, PortOku tablolarında saklanan beklenen bit örüntüsü ile status yazmacından okunan güncel içerik karşılaştırılarak doğrulanır. Böylece hangi eksenlerin başlangıç konumunda olduğu güvenilir biçimde tespit edilir. Başlangıç konumu doğrulanan eksenler için konum durum değişkenleri PozX, PozY ve PozZ değeri “1” olacak şekilde atanır. Çalışma sırasında bu değişkenler, motorların ileri her adımında (+1), geri her adımında (-1) olarak güncellenir; böylelikle kalem ucu/araç konumu sürekli izlenebilir ve anlık konum bilgisi tutarlı bir şekilde elde edilir.

PortOkuX:TPortOku=[111,79,49,15]; // X – XY – XZ – XYZ
PortOkuY:TPortOku=[95,79,31,15]; // Y – YX – YZ – XYZ
PortOkuZ:TPortOku=[63,47,31,15]; // Z – ZX – ZY – XYZ

Çizim tamamlandıktan sonra “Yazdır” komutu verildiğinde, sistem önce X, ardından Y ve Z motorlarını sırasıyla başlangıç (sıfır) konumlarına getirir. Tüm hedef konumlar bu referans noktalarına göre tanımlanır. Eksenler sıfır konumundan ayrıldıkları andan itibaren, her eksen için gerçekleşen adımlar bilgisayar tarafından sayılarak sayısal konum (enkoder gerektirmeyen açık çevrim izleme) güncellenir.

Çizime başlanırken, kullanıcı tarafından tıklanan ilk noktanın ekran koordinatları okunur ve İlkNokta (X, Y) ifadesine atanır. İmlecin son güncel konumu Son := Point (X, Y) ifadesiyle elde edilerek Son (X, Y) değişkenine yazılır. Ardından iki nokta arasındaki doğrusal ilkeye ait temel büyüklükler aşağıdaki gibi hesaplanır:

```

XBoy := Son.X-Ilk.x ;
YBoy := Son.Y-Ilk.y ;
Hipot := Hypot(XBoy, YBoy) ;
if Hipot < 0.1 then Aci := 0.0
else Aci := RadToDeg (ArcCos (XBoy / Hipot)) ;
if YBoy < 0 then Aci := 360 - Aci ;

```

Bu nicelikler, çizgi için izlenecek yörünge ile eksen bazlı adım oranlarının türetilmesinde kullanılır; böylece kalem ucunun (araç uç-effektörünün) sıfır referansına göre tanımlı, kararlı ve tekrarlanabilir bir şekilde hedef konuma ilerlemesi sağlanır.

R = 5.4mm, r = 2,7mm, $\alpha = 7,5^\circ$ olarak alındığında, adım motorunun bir turdaki adım sayısı:

$$N = \frac{360}{\alpha} = \frac{360}{7,5^\circ} = 48 \text{ adım}$$

olarak bulunur ve step motorunun bir adımdaki aldığı yol:

$$I_n = \frac{2\pi r}{N} = \frac{2 \pi 2,7}{48} = 0,35 \text{ mm}$$

ve step motorunun bir devirde aldığı yol

$$I = 2 \pi r = 2 \pi 2,7 = 17 \text{ mm}$$

değerleri elde edilir.

Çalışmada kullanılan adım motorlarının adım çözünürlüğü adım başına 0,35 mm'dir. Motor milinin bir tam turu (360°) kalem ucunda 17 mm doğrusal yer değiştirmeye karşılık gelmektedir. Ekranda piksel cinsinden ölçülen çizgi/çevre uzunlukları, 1 piksel = 0,35 mm ölçek katsayısı kullanılarak milimetreye dönüştürülür:

$$L_{mm} = L_{px} 0,35 \text{ mm/px}$$

Bu kalibrasyon sayesinde, kullanıcı arayüzünde kullanılan uzunluklar ile robotun ürettiği fiziksel çizim uzunlukları birebir ölçekli olacak şekilde eşlenmektedir. Böylece ekran-saha tutarlılığı korunur ve ölçüsel doğruluk güvence altına alınır.

3.1 Lineer çizgi çizme

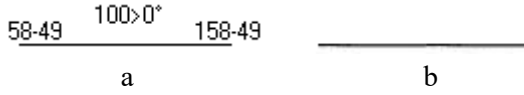
İlk nokta koordinatı ile son nokta koordinat farkı bulunur (XFark, YFark), ve step motor bu fark kadar ilerleyerek çizim tamamlanır (Şekil 3.1).

```
Image1 . Canvas . Pen.Mode := pmNot;  
Image1 . Canvas . MoveTo (Ilk.X, Ilk.Y);  
Image1 . Canvas . LineTo (Gecici.X, Gecici.Y);  
Gecici := Point (Ilk.X, Ilk.Y);
```

Grafik arayüzünde “LineTo” yordamı kullanılarak başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru doğrusal segment oluşturulur. Etkileşimli düzenleme sırasında, geçici izlerin temizlenmesi amacıyla Image1.Canvas.Pen.Mode := pmNot; ifadesiyle önceki çizgi izi tersleme (XOR benzeri) kipinde silinir. Her oluşturulan çizim elemanı (segment/nesne), türü ve parametreleriyle birlikte bir stringgrid yapısına nesne olarak eklenir; bu yapı, “Yazdır” komutu verildiğinde robot yürütme kuyruğunun kaynağını oluşturur.

Yazdırma aşamasında, eksen konumlarının güvenilirliğini sağlamak için motorlar öncelikle başlangıç konumlarına getirilir. Ardından stringgrid’deki nesneler sırayla okunur; sistem, kalemi ilk nesnenin ilk koordinatına konumlandırarak çizime başlar. Her bir çizgi için, iki uç noktadan uzunluk hesaplanır; eksen bazlı adım oranları türetilerek motorlara art arda gönderilir ve böylece çizgi adım adım işlenir. İlk çizim tamamlandıktan sonra süreç aynı yöntemle izleyen nesneler için yinelenir.

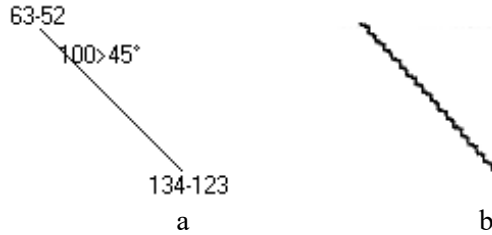
```
for i:= 1 to Adim do begin  
  if MotorD then begin  
    iX := IfThen (iX=7,0,iX+1);  
    PortCikis (888,PortX[iX]);  
    if Dur then begin PortOut (888,0);  
  exit; end;  
  SinirKontrol ('XI');  
  Inc (PozX);  
  StatusBar1 . Panels.Items [21] . Text := IntToStr (PozX);  
end; end;  
MotorD := True;  
PortOut (888,0);
```



Şekil 3.1 Düz çizgi çizimi a. Ekrandaki çizim, b. Robot kartezyen çizimi

3.2 Eğri çizimi interpolasyon

Uygulamanın en kritik bileşeni eğri çizim modülüdür; zira düz (lineer) segment dışındaki tüm geometrik şekillerin üretimi, uygun örnekleme (interpolasyon) stratejilerine dayanır. Bu kapsamda, her bir eğri parçası için başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki koordinat farkları ΔX (XFark) ve ΔY (YFark) hesaplanır; mutlak değerleri karşılaştırılarak büyük ve küçük bileşen belirlenir. Ardından, ΔX ve ΔY küçük bileşene bölünerek, eksen bazında adım ilerleme oranları (X ve Y yönleri için artış miktarları) elde edilir. Oranların tam kat ilişkisi göstermesi durumunda, ek ara nokta üretimine gerek kalmadan, doğrudan bu adım oranları izlenerek örnekleme gerçekleştirilir ve çizim tamamlanır. Bu yaklaşım, sayısal kararlılığı yüksek, hesaplama yükü düşük bir çizim süreci sağlar; ayrıca eğrinin yön değişimine duyarlı adım dağılımı sayesinde, konum güncellemesi düzenli ve tekrarlanabilir bir biçimde yürütülür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Eğri çizimi a. Ekrandaki çizim, b. Robot kartezyen çizimi

```

XFark:=YSon.X - YIlk.X;
YFark:=YSon.Y - YIlk.Y;
AXFark:=Abs(XFark);
AYFark:=Abs(YFark);
Buyuk:=Max(AXFark,AYFark);
Kucuk:=Min(AXFark,AYFark);
AdimX:=Sign(XFark)*(Buyuk div AYFark);
AdimY:=Sign(YFark)*(Buyuk div AXFark);
for i:=1 to Kucuk do begin
  AdimAyarla(AdimX+Sign(AdimX)*F,AdimY,FAdimX,FAdimY);
end;
Procedure TForm1.AdimAyarla(AdimX,AdimY,FAdimX,FAdimY:Integer);

```

```

begin
  YonMotorKontrol('X',AdimX+Sign(AdimX)*FAdimX);
  YonMotorKontrol('Y',AdimY+Sign(AdimY)*FAdimY);
end;
procedure TForm1.YonMotorKontrol(Motor:ShortString;Adim:Smallint);
begin
  if Motor='X' then begin
    if Adim >0 then XIleri(Adim);
    if Adim <0 then Xgeri(Adim);
  end;
  if Motor='Y' then begin
    if Adim >0 then YIleri(Adim);
    if Adim <0 then Ygeri(Adim);
  end;
  if Motor='Z' then begin
    if Adim >0 then ZIleri(Adim);
    if Adim <0 then Zgeri(Adim);
  end; end;
  Procedure TForm1.XIleri(Adim:Smallint);
  var i:Smallint;
  begin
    for i:=1 to Adim do begin
      PortOut(890,11);
      iX:=IfThen(iX=7,0,iX+1);
      PortCikis(888,PortX[iX]);
      if Dur then begin PortOut(888,0);
    end; end;
    SinirKontrol('XI');
    Inc(PozX);
    StatusBar1.Panels.Items[21].Text:=IntToStr(PozX);
  end; end;
  PortOut(888,0);
end;

```

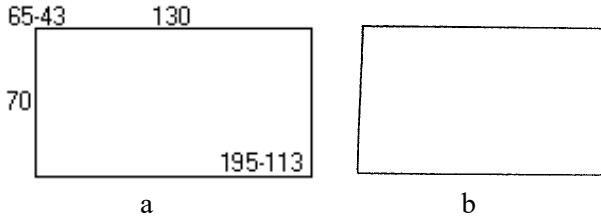
3.3 Dikdörtgen ve kare çizme

Kare çiziminde X kadar Y tarafına doğru çizgi çizilir. Kare veya dikdörtgen çiziminde ise step motorlar X ve Y yönündeki çizgileri çizer, sonra, step motorlar zıt yönde X ve Y tarafına doğru çizgileri çizer (Şekil 3.3).

```

Image1.Canvas.MoveTo(Ilk.X, Ilk.Y);
Image1.Canvas.LineTo(Gecici.X, Ilk.Y);
Image1.Canvas.LineTo(Gecici.X, Gecici.Y);
Image1.Canvas.LineTo(Ilk.X, Gecici.Y);
Image1.Canvas.LineTo(Ilk.X, Ilk.Y);
if nesne ='kare' then
  if Son.Y-Ilk.Y>0 then
    Son.Y:=Ilk.Y+Abs(Son.X-Ilk.X)
  else Son.Y:=Ilk.Y-Abs(Son.X-Ilk.X);
PozisyonAl(YIlk.X, YIlk.Y);
AdimAyarla(XFark, YFark, 0, 0);
AdimAyarla(-XFark, -YFark, 0, 0);

```



Şekil 3.3 Dikdörtgen çizimi a. Ekrandaki çizim, b. Robot kartezyen çizimi

3.4 Daire çizimi ve interpolasyon

Öncelikle dairenin yarıçapı hesaplanır. Ardından, daire üzerinde 36 adet noktanın koordinatları belirlenir. Bu noktalar arasına çizgiler çizilerek daire şekli oluşturulur (Şekil 3.4). Robot tarafından daire çizimi gerçekleştirilirken, öncelikle kalem başlangıç noktasına konumlandırılır. Daha sonra motorlar, her bir adımda bir sonraki noktaya doğru çizgi çizerek toplamda 36 adımda daire çizimini tamamlar (Şekil 3.4).

```

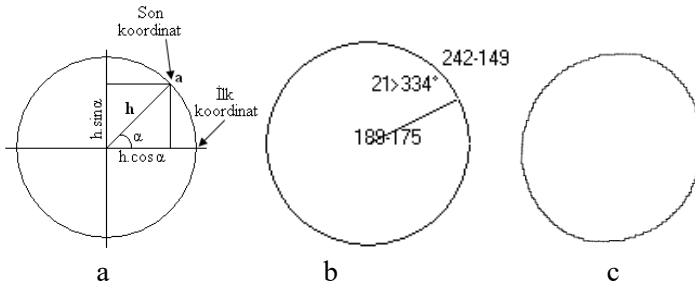
XBoy:=Son.X-Ilk.x;
YBoy:=Son.Y-Ilk.y;
Hipot1:=Hypot(XBoy, YBoy);
for i:=0 to 36 do begin
  HesaplaCiz(i*10, Hipot1, Hipot1);
end;
DNokta.X:=Round (Cos(DegToRad(HAci))*HCap+Ilk.X);
DNokta.Y:=Round (Sin(DegToRad(HAci))*HCap2+Ilk.Y);
if not YazD then Image1.Canvas.LineTo(DNokta.X, DNokta.Y);
PozisyonAl((YIlk.X+Round(YHipot)), YIlk.Y);

```

```

for i:=1 to 36 do begin
  HesaplaYaz(i*10,YHipot,YHipot); end;
Procedure TForm1.HesaplaYaz(HYAci,HYHipot1,HYHipot2:Real);
HXFark,HYFark:Integer;
begin
  HesaplaCiz(HYAci,HYHipot1,HYHipot2);
  HXFark:=DNokta.X-Gecici2.X;
  HYFark:=DNokta.Y-Gecici2.Y;
  CizgiYaz(HXFark,HYFark);
  Gecici2:=Point(DNokta.X,DNokta.Y); end;
Procedure TForm1.HesaplaCiz(HAci,HCap,HCap2:Real);
Begin
  DNokta.X:=Round (Cos(DegToRad(HAci))*HCap+Ilk.X);
  DNokta.Y:=Round (Sin(DegToRad(HAci))*HCap2+Ilk.Y);
  if not YazD then Image1.Canvas.LineTo(DNokta.X,DNokta.Y); end;

```



Şekil 3.4 Daire çizimi, a) Daire çizim koordinatları, b) Ekrandaki çizim, c) Robot kartezyen çizimi

3.5 Elips çizimi ve interpolasyon

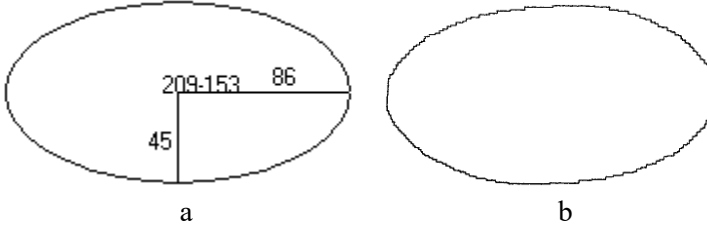
Elips çizimi, temel olarak daire çiziminin genelleştirilmiş hâlidir; fark, eksen yönlerinde kullanılan yarıçap çarpanlarının (ölçeklerin) farklı oluşudur. Daire için X ve Y yönlerindeki yarıçaplar eşit olduğundan aynı çarpan kullanılırken, elipste X ve Y eksenlerine ait yarı ana eksen uzunlukları farklıdır (Şekil 3.5).

```

for i:=0 to 36 do begin
  HesaplaCiz(i*10, Gecici.X-Ilk.X, Gecici.Y-Ilk.Y);
end;
PozisyonAl(Son.X,Ilk.Y);
Gecici2:=Point(Son.X,Ilk.Y);
for i:=1 to 36 do begin

```

```
HesaplaYaz(i*10,Son.X-Ilk.X,Son.Y-Ilk.Y);
end;
```

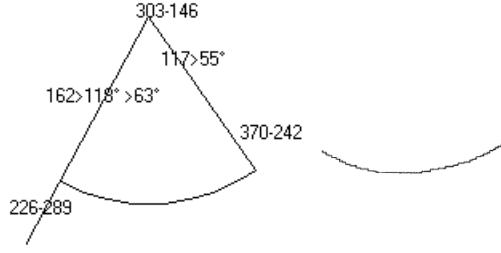


Şekil 3.5 Elips çizimi, a) Ekrandaki çizim, b) Robot kartezyen çizimi

3.6 Yay çizme ve interpolasyon

Yay çizimi, başlangıç noktasından itibaren açısal parametre artışlarıyla örnekleme yapılarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada, başlangıç açısı θ_0 ile bitiş açısı θ_1 arasında $\Delta\theta = 5^\circ$ sabit adımıyla ara noktalar üretilmiş; her bir ardışık nokta çifti doğrusal giriş ile birleştirilerek yay konturu elde edilmiştir. Robot ile yay çizmek için, kalem önce başlangıç noktasına getirilir. Sonra, step motorlar her 5'er derece sonra yeni koordinatlara çizgi çizerek çizimi tamamlar (Şekil 3.6).

```
if Aci1>Aci then Aci:=360+Aci;
if Aci1<Aci then begin
  Tur:=Round(GeciciAci-Aci1) div 5;
  DegisenAci:=Aci1;
  Image1.Canvas.MoveTo(Son.X,Son.Y);
  for i:=0 to Tur do begin
    HesaplaCiz(DegisenAci,Hipot1,Hipot1);
    if GeciciAci-DegisenAci<10 then DegisenAci:=GeciciAci
    else DegisenAci:=DegisenAci+5;
  end;
end;
PozisyonAl(Son.X,Son.Y);
Gecici2:=Point(Son.X,Son.Y);
Tur:=Round(YAci-YAci1) div 5;
YDegisenAci:=YAci1;
for i:=0 to Tur do begin
  HesaplaYaz(YDegisenAci,YHipot1,YHipot1);
  if YAci-YDegisenAci<10 then YDegisenAci:=YAci
  else YDegisenAci:=YDegisenAci+5;
end;
```

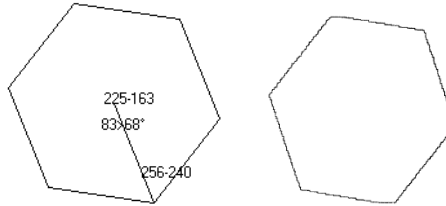


Şekil 3.6 Yay çizimi, a) Ekrandaki çizim, b) Robot kartezyen çizimi

3.7 Çokgen çizimi ve interpolasyon

Çokgen üretimi, kenar sayısına (n) bağlı açısal örnekleme ile gerçekleştirilir. ComboBox üzerinden n değerini seçilerek ilk koordinat ile son koordinatlar arasına çizgi çizilerek çizim tamamlanır (Şekil 3.7).

```
Kenar:=StrToInt(ComboBox2.Text);
CokAci:=RoundTo(360/Kenar,-2);
Kenar:=Kenar+1;
Hesap; Etiket;
Image1.Canvas.MoveTo(Gecici.X,Gecici.Y);
for i:=1 to Kenar do begin
  HesaplaCiz(Aci1,Hipot1,Hipot1);
  Aci1:=Aci1+CokAci;
end;
Cokgen2;
Gecici:=Point(Son.X,Son.Y);
Aci1:=Aci;
Hipot1:=Hipot;
```



Şekil 3.7 Çokgen çizgi, a) Ekrandaki çizim, b) Robot kartezyen çizimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, bilgisayar destekli vektörel çizim yapabilen üç eksenli bir kartezyen robotun tasarım ve gerçekleştirilmesine ilişkin bütünlük bir yaklaşım sunmuş; mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin birlikte çalışmasıyla A4 boyutunda çizim performansı elde edilmiştir. Başlıca bulgular ve değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

Adım motoru seçimi ve sürüş tekniği: Adım açısının küçülmesi, çizim hassasiyetini belirgin biçimde artırmaktadır. Bu kapsamda kullanılan ULN2003AN entegrasyonu, adım motoru sürücüsü olarak basit yapısı, düşük maliyeti ve kolay programlanabilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Motorların yarım adım modunda çalıştırılmasıyla çözünürlük artırılmış; pratik denemelerde en uygun darbe aralığı 20 ms olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda kayma veya adım kaçırma gözlenmemiştir.

Geometrik çizim kalitesi: Daire, elips ve yay gibi eğrisel geometrilere, fark açısının (segment açısı) küçültülmesi çizim kalitesini yükseltmektedir. Özellikle çap büyüdükçe çokgen yaklaşımındaki kenar sayısının artırılması, kontur düzgünlüğünü iyileştirmektedir.

Veri temsili ve dosya yönetimi: Bitmap temsiller, vektörel ifadelere kıyasla daha yüksek depolama gereksinimine sahiptir. Bu nedenle modern grafik yazılımlarının çoğu veriyi vektörel biçimde saklamaktadır (ör. AutoCAD, 3D Studio Max, Macromedia Flash). Geliştirilen sistemin vektör tabanlı komut setiyle uyumu, bellek ve bant genişliği açısından verimlilik sağlamıştır.

Donanım güvenliği ve yalıtım: Bilgisayar ile elektronik kontrol kartı arasındaki paralel port haberleşmesinde, olası arızalara karşı arayüzün yalıtılması amacıyla 4N25 optokuplörlerin kullanılması tavsiye edilir. Bu yaklaşım, gerilim sıçramaları ve topraklama farklarından kaynaklanabilecek hasar riskini azaltır.

Mekanik rijitlik ve titreşim: Yüksek hızlarda gözlenen titreşimlerin azaltılması için gövde malzemesinin yeterli sertlikte seçilmesi, bağlantı noktalarında kaynak/punto/vidalama kalitesinin artırılması ve kinematik elemanların (kayış-kasnak, lineer yataklar) hassas hizalanması gerekmektedir. Bu önlemler hem tekrar edilebilirliği hem de çizgi kalitesini destekler.

Esneklik ve çok amaçlı kullanım potansiyeli: Geliştirilen platform, kalem ucu yerine farklı takımların entegrasyonu ile çok amaçlı sistemlere dönüştürülebilir. Olası uygulamalar arasında optik okuma, alevle kaynak / kesme, cam veya tekstil kesimi, baskı devresi delme, üç boyutlu yüzey işleme ve hafif yük taşıma sayılabilir. Bu yönüyle çalışma, robot kol uygulamalarına giden yolda ölçeklenebilir bir temel sunmaktadır.

Yazılım entegrasyonu ve birlikte çalışabilirlik: Eğri çiziminde AutoCAD'in segmentleme yaklaşımı izlenmiştir. İleri sürümlerde, AutoCAD benzeri CAD

yazılımlarıyla çift yönlü veri alışverişini destekleyen arayüzlerin (ör. DXF/SVG içe-dışa aktarma) eklenmesiyle daha karmaşık çizimlerin otomasyonu mümkün olacaktır.

Kablosuz iletişim ve geleceğe yönelik geliştirmeler: Sistem, ilerleyen sürümlerde Bluetooth, Wi-Fi veya RF tabanlı kablosuz haberleşme modülleri ile genişletilerek sahada kullanım kolaylığı sağlayabilir. Ayrıca hız profillemesi (hızlanma-yavaşlama eğrileri), mikro-adımlama, kapalı çevrim konum doğrulama (enkoder geri beslemesi) ve titreşim sönümleme algoritmalarının eklenmesi, hassasiyet ve verimi daha da artıracaktır.

Prototipleme durumu: Tüm değerlendirmeler model ölçekli bir robot üzerinde gerçekleştirilmiş olup, mevcut mimari esas alınarak imkânlar dâhilinde endüstriyel nitelikte bir prototipin üretilmesi mümkündür.

Genel olarak, önerilen mimari; düşük maliyetli bileşenlerle hassas konumlama, tekrar edilebilir çizim ve modüler genişletilebilirlik sağlamaktadır. Belirlenen 20 ms darbe aralığı ve yarım adım sürüşü, mevcut mekanik düzenek ve rijitlik koşullarında en uygun performans-kararlılık dengesini sunmuştur. Sistemin CAD birlikte çalışabilirliği, kablosuz iletişim ve ileri kontrol teknikleriyle zenginleştirilmesi, endüstriyel ölçekte kullanım potansiyelini artıracaktır.

Bu bölümün yazımında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde tamamlanmış “Bilgisayar destekli vektörel çizim yapan kartezyen robot tasarımı ve programlanması” konulu yüksek lisans tezinden istifade edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Arslan, M. (1998). *Bilgisayar kontrollü baskı devre delgi cihazına ait ek donanım yapımı ve uygun bir yazılım geliştirimi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye.
- Bayrak, A. (2007). *Beş eksenli bir robot kolunun simülasyonu ve kontrolü* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Çengelci, B., & Çimen, H. (2005). Endüstriyel robotlar. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2005(2), 69–78.
- Ersöz, H. (2007). *Endüstriyel robotlar ve uygulama alanları* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Görgün, H. (1998). *Step motor kullanılarak ploter uygulamasının gerçekleştirilmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Koca, H. (2007). *Robot manipülatör denetimi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Oysu, C. (2004). *Termal kesme işlemleri için üç eksenli kartezyen robot tasarımı* (BAPB Proje No. 2004/019) [Araştırma raporu]. Kocaeli Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye.
- Özyalçın, İ. (2006). *Kartezyen robot tasarımı* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, Türkiye.
- Sciavicco, L., & Siciliano, B. (1996). *Modeling and control of robot manipulators*. McGraw-Hill.
- Ünlü, M. (1997). *Bilgisayar kontrollü cam kesme tezgahı* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.

7. Bölüm

Endüstriyel Robotik Sistemlerin İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerindeki Etkileri: Avantajlar, Riskler ve Gelecek Perspektifleri

Mustafa HAMAMCI¹, İsmail SOYHAN²

ÖZET

Endüstriyel devrimlerin getirdiği teknolojik dönüşümler, günümüzde robotik sistemlerin üretim süreçlerinden hizmet sektörüne kadar geniş bir alanda kullanılmasını sağlamıştır. Bu gelişmeler, verimliliği ve üretim kapasitesini artırırken, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında yeni fırsatlar ve zorluklar ortaya çıkarmıştır. Robotik ürünlerin işyerlerinde benimsenmesi, insan çalışanların tehlikeli ortamlardan uzaklaştırılması, tekrarlayan ve fiziksel yıpratıcı işlerin otomasyonu gibi önemli avantajlar sunmakta; ancak bu süreç, teknik arızalar, yeni risk türleri ve insan-robot etkileşiminin doğurduğu sorunlar gibi dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Avantajlar arasında; tehlikeli ortamlarda insan çalışanların maruziyetinin azalması, tekrarlayan ve ergonomik risk taşıyan işlerin otomasyonu, iş kazalarının minimize edilmesi ve uzun vadede çalışan sağlığının korunması öne çıkmaktadır. Ayrıca, robotların yüksek hassasiyetle çalışması, üretim verimliliğini artırarak operasyonel sürekliliği desteklemektedir. Bununla birlikte, dezavantajlar kapsamında teknik arızaların yol açabileceği kazalar, insan-robot etkileşiminden kaynaklanan yeni riskler, yüksek kurulum ve bakım maliyetleri, veri güvenliği endişeleri ve etik tartışmalar gibi unsurlar ele alınmıştır.

Teknolojinin hızla geliştiği bir çağda, robotik sistemlerin İSG perspektifinden dengeli bir şekilde analiz edilmesi, hem çalışan refahını hem de sürdürülebilir üretimi desteklemek adına kritik öneme sahiptir. Çalışma, robotik sistemlerin İSG'ye entegrasyonunda dikkate alınması gereken kritik faktörleri vurgularken, mevzuat eksikliklerine ve çözüm önerilerine de yer vermektedir.

Anahtar kelimeler: Robotik teknolojiler, iş sağlığı ve güvenliği, otomasyon, risk yönetimi, insan-robot işbirliği.

¹ Dr. Öğr. Üyesi; Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. mustafa.hamamci@igdir.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-9482-3117.

² Yüksek Lisans Öğrencisi; Iğdır Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. soyhan0187@gmail.com, ORCID No: 0009-0003-2227-589X.

1. Giriş

Teknolojik ilerlemelerin en önemli yansımalarından biri olan robotik sistemler, endüstriyel üretimden hizmet sektörüne kadar geniş bir alanda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) paradigmalarını kökten değiştirmektedir. Bu teknolojiler, yüksek hassasiyet, hız ve tekrarlanabilirlik sunarak üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra, çalışanların tehlikeli ortamlardan uzaklaştırılması, tekrarlayan görevlerin otomasyonu ve ergonomik risklerin minimize edilmesi gibi kritik avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojik entegrasyon yeni risk türlerini de beraberinde getirmektedir. Teknik arızalar, insan-robot etkileşiminden kaynaklanan beklenmedik durumlar, siber güvenlik açıkları ve psikososyal etkiler gibi dezavantajlar, mevcut İSG politikalarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Robotik teknolojinin tarihsel gelişimi 20. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. İlk endüstriyel robotlar, insanları tehlikeli görevlerden koruma misyonuyla tasarlanmış olsa da, günümüzde yapay zeka ve gelişmiş sensör teknolojileriyle desteklenen sistemler, insanlarla iş birliği yapabilen (cobotlar) ve karmaşık karar alma yetisine sahip bir düzeye ulaşmıştır. Sektörel bazda incelendiğinde, otomotiv endüstrisinde montaj hatlarında kullanılan robotlar, iş kazalarını %60'a varan oranlarda azaltırken, lojistik depolarında ağır yük taşıyan otonom robotlar, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte, yazılım hatalarından kaynaklanan ani duruşlar veya veri ihlalleri gibi yeni riskler ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma, robotik sistemlerin İSG üzerindeki çok boyutlu etkilerini dengeli bir yaklaşımla analiz ederek, teknolojinin insan refahını gözetken bir çerçevede kullanımına katkı sunmayı amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, robotik sistemlerin sunduğu fırsatlar (tehlike maruziyetinin azaltılması, verimlilik artışı) ve ortaya çıkardığı tehditler (yeni risk profilleri, etik ve hukuki sorunlar), kapsamlı bir literatür taraması, sektörel vaka analizleri ve mevzuat değerlendirmeleri yoluyla incelenecektir. Ayrıca, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki uygulama farklılıklarına dikkat çekilerek, küresel standartlara uyum için öneriler geliştirilecektir. Sonuç olarak, robotik teknolojilerin İSG'deki rolü, yalnızca verimlilik odaklı değil, aynı zamanda çalışanların fiziksel ve zihinsel sağlığını merkeze alan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Bu dengenin kurulması, sürdürülebilir ve insan odaklı bir endüstriyel geleceğin temelini oluşturmaktadır.

2. Robotik Sistemlerin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Robotik, makine mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, bilgisayar bilimleri ve yapay zeka gibi farklı disiplinleri bir araya getiren multidisipliner bir bilim dalıdır. Bu alan, otonom veya yarı otonom olarak belirli görevleri yerine getirebilen, programlanabilir mekanik sistemler olan robotların tasarımı, üretimi, operasyonu ve uygulanması üzerine odaklanır. Robotlar, önceden tanımlanmış komut setlerini izleyebileceği gibi, sensörler aracılığıyla çevresel verileri işleyerek karmaşık durumlara adapte olabilme yeteneğine de sahiptir. Endüstriyel üretim hatlarından cerrahi operasyonlara, uzay keşiflerinden günlük ev işlerine kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulan robotik sistemler, temel olarak üç ana bileşenden oluşur:

- **Mekanik Sistemler:** Bu bileşenler, robotun fiziksel yapısını, hareket kabiliyetini ve manipülatörlerini (kollar, tekerlekler, bacaklar vb.) oluşturan donanımsal altyapıyı ifade eder.
- **Elektronik Sistemler:** Robotun sensörlerini, aktüatörlerini (motorlar), kontrol kartlarını ve güç kaynaklarını içeren bu bileşenler, robotun çevresiyle etkileşimini ve hareketlerini yönetir.
- **Yazılım ve Kontrol Sistemleri:** Robotun davranışlarını, karar alma süreçlerini ve görev yürütme algoritmalarını yöneten merkezi sinir sistemidir. Yapay zeka, makine öğrenmesi ve görüntü işleme gibi gelişmiş algoritmalar bu katmanda yer alır.

Robotik teknolojilerin geleceği, insan-robot etkileşiminin artması, otonom sistemlerin geliştirilmesi ve robotların günlük yaşamda daha yaygın hale gelmesiyle şekillenecektir. Yapay zeka ve makine öğrenmesi alanındaki gelişmeler, robotların daha akıllı ve bağımsız hale gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca, biyomimetik (doğadan esinlenen) robotik, insan vücuduyla uyumlu esnek robotlar ve mikro/nano robotlar gibi yeni teknolojiler de ön plana çıkmaktadır.

Robotik alanının kökleri, insanlığın mekanik cihazlarla iş gücünü hafifletme çabalarına kadar uzanmaktadır. Robotların evrimi, insanlık tarihindeki teknolojik ve bilimsel dönüm noktalarıyla paralel bir seyir izlemiştir:

Antik ve Orta Çağ: İskenderiyeli Ctesibius'un su saatleri ve otomatik müzik aletleri (MÖ 3. yy) ile El-Cezeri'nin Kitab-ül Hiyel'de tanıttığı su gücüyle çalışan makineleri bu alanın öncü örnekleridir.

Sanayi Devrimi: Buhar gücü ve mekanik üretim, otomatik makinelerin yaygınlaşmasını sağlamış; Jacquard'ın delikli kartlı dokuma tezgâhı (1801), bilgisayar ve programlanabilir robotların temelini atmıştır.

20. Yüzyıl: Robotik bağımsız bir bilim dalına dönüşmüş; Karel Čapek'in 1921'de "robot" kavramını ortaya atmasıyla kavram yaygınlaşmıştır. 1961'de

General Motors'un üretim hattında kullandığı Unimate, ilk endüstriyel robot olarak seri üretimde devrim yaratmıştır.

21. Yüzyıl: Yapay zekâ, sensör teknolojileri ve biyomimetik gelişmeleriyle robotlar; sanayiden sağlık, lojistik ve uzay araştırmalarına kadar pek çok alanda kritik görevler üstlenmektedir.

2.1. Endüstri 4.0 Bağlamında Robotik Sistemler

Endüstriyel üretim hatlarından cerrahi operasyonlara, uzay keşiflerinden günlük ev işlerine kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulan robotik sistemler, Endüstri 4.0 (Dördüncü Sanayi Devrimi) olarak adlandırılan modern üretim paradigmasının en kritik bileşenlerinden biridir.

Endüstri 4.0, siber-fiziksel sistemler, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve bulut bilişim gibi teknolojileri kullanarak üretim süreçlerini dijitalleştiren ve otomasyon seviyesini en üst düzeye çıkaran bir dönüşüm sürecidir. Bu yeni sanayi devrimi, üretimde akıllı fabrikaların (smart factories) oluşumunu sağlamakta, makinelerin, ürünlerin ve sistemlerin birbirleriyle gerçek zamanlı iletişim kurmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, robotik sistemler artık sadece fiziksel görevleri yerine getiren statik araçlar olmaktan çıkıp, akıllı fabrikaların sinir sisteminin bir parçası haline gelmiştir.

Veri Entegrasyonu ve Akıllı Üretim: Endüstri 4.0'da robotlar, sensörler aracılığıyla topladıkları verileri analiz ederek üretim süreçlerini optimize eder, beklenmedik durumlara anında tepki vererek kesintisiz akışı sağlar.

İşbirlikçi Robotlar (Cobotlar): Geleneksel robotlardan farklı olarak insanlarla aynı ortamda güvenle çalışabilen cobotlar, tekrarlayan ve riskli görevleri üstlenerek çalışanların daha karmaşık işlere odaklanmasına imkân tanır.

Otonom ve Akıllı Sistemler: Yapay zekâ ve makine öğrenmesiyle donatılan robotlar, çevresel koşullara göre karar alabilir; otonom taşıma veya kalite kontrol gibi süreçleri insan müdahalesi olmadan gerçekleştirebilir.

Öngörücü Bakım: Robotik sistemlerin durum verileri analiz edilerek arızalar önceden tahmin edilir, bu da duruşları azaltarak verimliliği artırır ve bakım maliyetlerini düşürür.

Endüstri 4.0 ile birlikte robotik teknolojiler, üretimden lojistiğe, sağlıktan perakendeye kadar birçok sektörde devrim yaratmaktadır. Bu dönüşüm, yalnızca verimlilik artışı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda daha güvenli, esnek ve sürdürülebilir bir endüstriyel gelecek inşa etmektedir. Endüstri 4.0'ın temelinde yer alan akıllı robotik sistemler, işletmelerin rekabet gücünü artırırken, çalışanların iş kalitesini ve güvenliğini de yükseltmektedir.

3. Robotik Teknolojilerin Endüstride Kullanımı

Endüstriyel robotlar, modern üretim ve lojistik süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Tekrarlayan, tehlikeli veya yüksek hassasiyet gerektiren görevleri yerine getirebilen bu programlanabilir makineler, işletmelerin verimliliğini artırma, maliyetleri düşürme ve ürün kalitesini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır. Robotik teknolojilerin endüstriyel alandaki yaygınlaşması, sadece üretim hatlarını değil, aynı zamanda malzeme taşıma, kalite kontrol, montaj, kaynak ve boyama gibi çeşitli süreçleri de kapsamaktadır. Bu bölümde, endüstriyel robotik sistemlerin temel özellikleri, farklı robot türleri ve bunların çeşitli endüstriyel sektörlerdeki kullanım alanları, robotik otomasyonun endüstriyel süreçlerin gelişimindeki rolü ve gelecekteki potansiyeli incelenecektir.

3.1. Robotik Sistemlerin Temel Özellikleri

Endüstriyel robotlar, insan operatörlerin yeteneklerini tamamlayan veya aşan bir dizi temel özelliğe sahiptir. Bu özellikler, robotların endüstriyel ortamlarda etkin bir şekilde çalışmasını ve otomasyon süreçlerinin verimliliğini artırmasını sağlar.

Programlanabilirlik: Endüstriyel robotlar, kullanıcı arayüzleri veya özel diller aracılığıyla programlanabilir ve gerektiğinde kolayca güncellenebilir.

Tekrarlanabilirlik: Robotlar görevleri yüksek hassasiyetle defalarca yerine getirerek kalite kontrol ve standart üretimde insan hatalarını minimize eder.

Hız ve Hassasiyet: İnsanlardan daha hızlı ve hassas çalışarak üretim sürelerini kısaltır, mikron seviyesinde montaj gibi zor işlemleri gerçekleştirebilir.

Çok Yönlülük: Farklı araçlarla donatılabilen robotlar, aynı üretim hattında program değişiklikleriyle farklı görevleri üstlenebilir.

Çalışma Ortamına Uygunluk: İnsan için riskli ortamlarda güvenli biçimde çalışarak iş güvenliğini artırır ve 24/7 üretimde kesintisiz performans sağlar.

Sensör Entegrasyonu: Görsel, kuvvet veya lazer sensörleriyle çevresini algılayabilir, nesne tanıma ve kalite kontrol gibi görevleri akıllıca yerine getirebilir.

Ağ Bağlantısı ve Veri Toplama: Fabrika ağlarına bağlanarak üretim verilerini toplar, süreçleri gerçek zamanlı izler ve optimizasyon imkânı sunar.

3.2. Endüstriyel Robot Türleri ve Kullanım Alanları

Endüstriyel otomasyonun farklı ihtiyaçlarına cevap verebilmek için çeşitli robot türleri geliştirilmiştir. Her bir robot türü, kendine özgü kinematik yapısı, hareket kabiliyeti ve taşıma kapasitesi ile belirli uygulama alanlarına daha uygun hale gelir.

Artiküle Robotlar (Mafsal Kollu): İnsan koluna benzer yapıları ve çoklu mafsalları sayesinde geniş çalışma alanına ve karmaşık hareket kabiliyetine sahiptir. En yaygın endüstriyel robot türüdür. Başlıca Kullanımlar, Kaynak (özellikle otomotivde), montaj, malzeme taşıma, paletleme, makine besleme.

SCARA Robotlar: Yatay düzlemde hızlı ve hassas, dikeyde rijit hareket eder; genellikle 4 serbestlik derecesine sahiptir. Başlıca Kullanımlar, Küçük parça montajı, elektronik bileşenlerin yerleştirilmesi (pick and place), vidalama.

Kartezyen Robotlar: X, Y, Z eksenlerinde doğrusal hareket eden, yüksek taşıma kapasitesine sahip robotlardır. Başlıca Kullanımlar, Paletleme, paketleme, uzun mesafe malzeme taşıma, kesme ve delme işlemleri.

Delta Robotlar: Paralel kolları sayesinde hafif ve çok hızlıdır; yüksek hassasiyetli pick and place için idealdir. Başlıca Kullanımlar, Gıda ve ilaç endüstrisinde hızlı toplama-yerleştirme, sıralama/ayıklama, hafif montaj.

Silindirik Robotlar: Döner ve doğrusal eksenlerle silindirik bir çalışma alanına sahiptir. Başlıca Kullanımlar, Makine besleme, basit kaynak, sınırlı montaj işlemleri.

İşbirlikçi Robotlar (Cobotlar): Sensörleri sayesinde insanlarla güvenli biçimde yan yana çalışır; ergonomik riskleri azaltır. Başlıca Kullanımlar, Montaj desteği, kalite kontrol, paketleme, hafif malzeme taşıma, makine besleme.

Mobil Robotlar (AMR'ler): Sensör ve haritalama teknolojileriyle bağımsız hareket edebilen robotlardır; iç lojistikte esneklik sağlar. Başlıca Kullanımlar, Fabrika/depolarda malzeme transferi, envanter yönetimi, e-ticaret lojistiği, hastane ve otellerde servis görevleri.

3.3. Robotik Otomasyonun Gelişimi

Robotik otomasyonun endüstriyel süreçlere entegrasyonu, son altmış yılda önemli bir evrim geçirmiştir. Başlangıçta basit ve tekrarlayan görevleri yerine getiren sabit robotlar kullanılırken, teknolojik gelişmelerle birlikte daha karmaşık, esnek, akıllı ve işbirlikçi robot sistemleri ortaya çıkmıştır.

İlk Nesil (1960-1970'ler): Sabit konumlu, hidrolik/pnömatik tahrikli ve basit programlanabilen robotlardır. Özellikle otomotiv sektöründe kaynak ve boyamada kullanılmıştır.

İkinci Nesil (1970-1980'ler): Mikroelektronik ve sensör gelişmeleriyle dokunma, kuvvet ve basit görme sensörleri entegre edilmiş; montaj ve malzeme taşıma gibi daha karmaşık görevler mümkün olmuştur.

Üçüncü Nesil (1980-2000'ler): Mikroişlemci ve yazılım destekli kontrol sistemleriyle daha akıllı ve otonom hale gelmiş, yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamalarıyla çevresel koşullara uyum sağlayabilmiştir.

Dördüncü Nesil (2000’ler–Günümüz): IoT, bulut bilişim, büyük veri ve YZ entegrasyonu sayesinde bağlantılı, işbirlikçi ve mobil robotlar yaygınlaşmıştır. Cobotlar insanlarla güvenli çalışabilmekte, AMR’ler ise lojistik süreçleri optimize etmektedir.”

Geleceğin Robotik Otomasyonu: Robotik otomasyonun geleceği, yapay zeka, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve bilgisayarlı görü gibi alanlardaki hızlı ilerlemelerle şekillenecektir. Gelecekteki endüstriyel robotların, karmaşık problemleri çözebilme, deneyimlerinden öğrenerek yeteneklerini geliştirebilme ve insanlarla daha doğal ve sezgisel bir şekilde etkileşim kurabilme yeteneklerine sahip olması beklenmektedir. Proaktif bakım, uzaktan teşhis ve kendi kendini yapılandırma gibi özellikler yaygınlaşacaktır. Ayrıca, robotların farklı endüstriyel sistemlerle (örneğin, ERP, MES) tam entegrasyonu sağlanacak ve tamamen otonom üretim tesislerinin sayısı artacaktır.

4. ROBOTİK ÜRÜNLERİN İSG AÇISINDAN AVANTAJLARI

Endüstriyel iş süreçlerinde robotik teknolojilerin kullanımı, verimlilik ve kalite artışının yanı sıra iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında da önemli avantajlar sunmaktadır. Robotik ürünlerin devreye alınması, çalışanların maruz kaldığı riskleri azaltarak daha güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturulmasına katkıda bulunur. Bu açıklama, robotik sistemlerin İSG üzerindeki olumlu etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi, farklı tehlike türlerine karşı sunduğu çözümleri ve ergonomik iyileştirmelerdeki rolünü kapsamlı bir şekilde ele almayı amaçlamaktadır.

Robotik sistemlerin endüstriyel ortamlara entegrasyonu, geleneksel iş güvenliği yaklaşımlarına kıyasla proaktif ve mühendislik odaklı çözümler sunar. Robotlar, doğaları gereği tekrarlayan, tehlikeli ve ergonomik açıdan riskli görevleri insanlardan daha güvenli bir şekilde yerine getirebilirler. Bu durum, iş kazalarının azalmasına, meslek hastalıklarının önlenmesine ve genel olarak daha sağlıklı bir iş gücünün oluşmasına katkıda bulunur (Jones, 2023). Robotik otomasyonun İSG üzerindeki çok yönlü faydaları, modern iş güvenliği yönetim sistemlerinin önemli bir bileşeni haline gelmesini sağlamıştır.

4.1. Robotik Ürünlerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Katkıları

Robotların iş sağlığı ve güvenliğine katkısı birkaç temel faktöre dayanmaktadır. Öncelikle, tehlikeli ortamlarda (yüksek sıcaklık, radyasyon, toksik maddeler, patlayıcı atmosferler) görev yaparak çalışanların risklere maruz kalmasını önlerler (Doe, 2023). Ayrıca yorulmadıkları ve dikkatleri dağılmadığı için insan hatalarından kaynaklı kazaları azaltırlar (International Federation of Robotics, 2024). Ergonomik tasarım ve programlama sayesinde ağır kaldırma,

eğilme ve bükülme gibi kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilecek işleri üstlenerek çalışanların fiziksel yükünü hafifletirler. Son olarak, sensör ve güvenlik sistemleriyle donatılan robotlar potansiyel tehlikeleri algılayıp otomatik durma veya güvenli manevra yaparak iş kazalarını önler.

4.1.1. Tehlikeli İşlerde İnsan Faktörünün Azaltılması

Birçok endüstriyel sektörde, çalışanların sağlığı ve güvenliği açısından ciddi riskler taşıyan işler bulunmaktadır. Bu tür tehlikeli işlerde insan faktörünün azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması, robotik teknolojilerin en önemli avantajlarından biridir (Siciliano & Khatib, 2008).

Yüksek Riskli Ortamlar: Nükleer santraller, kimya tesisleri veya patlayıcı madencilik alanlarında robotlar, insan operatörlerin yerini alarak güvenliği artırır; örneğin radyasyonlu alanlarda uzaktan kumandalı robotlar maruziyeti azaltır (Villani et al., 2018).

Tehlikeli Maddeler: Boya püskürtme, kaynak veya kimyasal işlemler sırasında oluşan zararlı gaz ve partiküller, robotlar sayesinde çalışanlardan uzak tutulur (European Commission, 2020).

Tekrarlayan ve Tehlikeli Manuel İşler: Ağır veya keskin malzemelerin taşınması gibi tehlikeli işler, robotlar aracılığıyla güvenli şekilde yapılabilir, yaralanma riskini azaltır (Peshkin et al., 1999).

4.1.2. Ergonomik İyileştirmeler ve Kas-İskelet Sistemi Hastalıklarının Önlenmesi

Endüstriyel işlerde sıkça karşılaşılan ergonomik risk faktörleri, kas-iskelet sistemi hastalıklarının (KİSH) en önemli nedenlerinden biridir. Tekrarlayan hareketler, aşırı güç kullanımı, uygun olmayan duruşlar, titreşim ve uzun süreli statik pozisyonlar gibi faktörler, çalışanların sağlığını olumsuz etkileyebilir. Robotik sistemlerin kullanımı, bu ergonomik riskleri önemli ölçüde azaltarak KİSH oluşumunun önlenmesine yardımcı olur (Boston Consulting Group, 2015).

Tekrarlayan görevler (montaj, paketleme) çalışanlarda bilek, omuz ve boyun rahatsızlıklarına yol açabilirken, robotlar bu işleri yüksek doğruluk ve tutarlılıkla üstlenerek ergonomik stresi azaltır. Benzer şekilde, ağır yüklerin elle taşınması bel ve sırt sorunlarına neden olurken, robotlar ve cobotlar bu işleri güvenle gerçekleştirerek kas-iskelet sistemi hastalıkları riskini düşürür (NIST, 2022).

Uygun olmayan duruşlar çalışanlarda omurga ve eklem sorunlarına yol açabilirken, robotlar esnek hareket kabiliyetleriyle bu görevleri üstlenir veya ergonomik iş istasyonlarına entegre edilerek çalışanların sağlığını korur.

4.1.3. Ağır Yük Taşıma ve Tekrarlı İşlerde Robotik Desteğin Etkisi

Ağır yük taşıma ve tekrarlı işler, endüstriyel ortamlarda çalışanların sağlığı ve güvenliği açısından önemli risk faktörleridir. Robotik sistemlerin bu tür görevlerde kullanılması hem iş kazalarının önlenmesine hem de meslek hastalıklarının azaltılmasına önemli katkılar sağlar.

Ağır Yük Taşıma: İnsanların kaldırabileceğinden ağır malzemeler, bel ve kas-iskelet rahatsızlıklarına yol açabilir. Robotlar ve cobotlar, özellikle lojistik, otomotiv ve inşaat sektörlerinde bu yükleri güvenli şekilde taşır, ergonomik riskleri azaltır.

Tekrarlı İşler: Montaj, paketleme veya makine besleme gibi tekrarlayan görevler, KİSH riskini artırır. Robotlar bu işleri yorulmadan ve yüksek hassasiyetle yaparak çalışanların bilek, el, kol ve omuz ağrılarını önler; otomotiv, elektronik ve gıda sektörlerinde yaygındır.

4.1.4. Maruziyetin Azaltılması (Kimyasal, Biyolojik, Fiziksel Tehlikeler)

Endüstriyel işlerde çalışanlar, çeşitli kimyasal, biyolojik ve fiziksel tehlikelere maruz kalabilirler. Robotik sistemlerin kullanımı, çalışanların bu tehlikelere maruziyetini önemli ölçüde azaltarak daha güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı sağlar.

Kimyasal Tehlikeler: Solvent, asit ve baz gibi maddeler solunum ve cilt sorunlarına yol açabilir; robotlar bu işlemleri insan müdahalesi olmadan gerçekleştirerek maruziyeti önler.

Biyolojik Tehlikeler: Gıda, sağlık ve atık yönetimi sektörlerinde biyolojik ajanlara maruziyet riski vardır; robotlar steril ortamda çalışarak enfeksiyon riskini azaltır ve hijyen standartlarını artırır.

Fiziksel Tehlikeler: Gürültü, titreşim, radyasyon, aşırı sıcak/soğuk ve yüksek basınç gibi etmenler sağlık sorunlarına yol açabilir; robotlar bu tehlikeli ortamlarda çalışarak veya uzaktan işlem yaparak riskleri minimize eder.

Robotik ürünlerin endüstriyel iş süreçlerine entegrasyonu, iş sağlığı ve güvenliği açısından önemli ve çeşitli avantajlar sunmaktadır. Tehlikeli işlerde insan faktörünün azaltılması, ergonomik iyileştirmeler, ağır yük taşıma ve tekrarlı işlerde robotik destek, kimyasal, biyolojik ve fiziksel tehlikelere maruziyetin azaltılması gibi faktörler, robotik teknolojilerin çalışanların sağlığını ve güvenliğini korumadaki kritik rolünü açıkça göstermektedir. İşletmelerin robotik otomasyonu benimsemesi, sadece verimlilik ve rekabet avantajı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda daha güvenli, sağlıklı ve sürdürülebilir bir çalışma ortamı oluşturulmasına da katkıda bulunur.

4.2.

4.3. İş Kazalarının Önlenmesinde Robotik Sistemlerin Rolü

Endüstriyel robotik, iş kazalarını önleme konusunda insan kapasitesinin ötesinde bir etkiye sahiptir. Özellikle tehlikeli, tekrarlayan veya yüksek riskli görevlerde insan çalışanların yerini alarak kaza oranlarını düşürür ve güvenliğini artırır. 2023 verilerine göre, robotik entegrasyonu olan fabrikalarda iş kazaları %45-60 oranında azalmıştır (ILO, 2022).

Uluslararası Robotik Federasyonu (IFR) verilerine göre, robotik sistemlerin yaygınlaştığı ülkelerde iş kazalarında %25'e varan azalma gözlemlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Robot kullanım yoğunluğu ve entegrasyonunun sektörel etkisi

Sektör	Robotik Kullanım Yoğunluğu	İş Kazası Azalması	Verimlilik Artışı
Otomotiv/İmalat	Yüksek	%30'a kadar	Çok yüksek
İnşaat	Orta (artıyor)	Orta düzeyde	Orta
Metal/Ağır Sanayi	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Tarım	Orta	Orta düzeyde	Yüksek
Sağlık	Orta	Yüksek	Orta
Enerji	Düşük (ama kritik alanlarda)	Yüksek	Orta

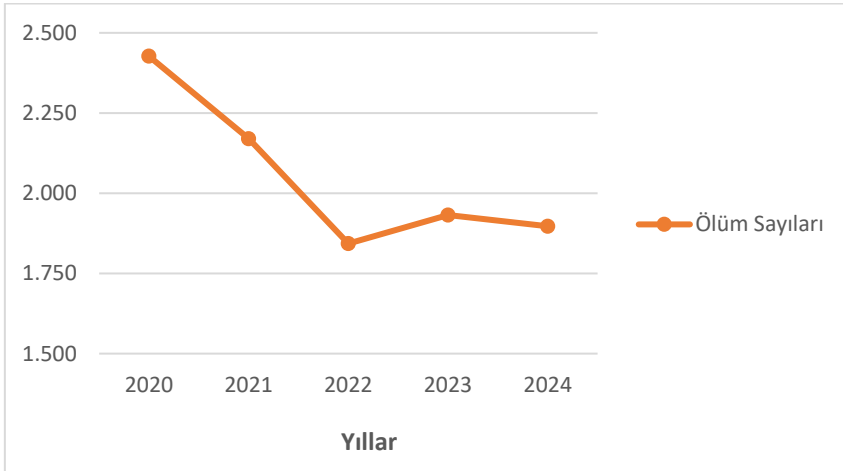
Türkiye'de ise SGK ve İŞİG Meclisi verileri, otomasyonun yaygınlaştığı sektörlerde iş kazalarının azaldığını, ancak veri sınırlılıkları nedeniyle tüm sektörlerde net bir analiz yapılamadığını göstermektedir. Robotik entegrasyonun farklı sektörlerdeki etkisi, hem iş güvenliği hem de verimlilik açısından çarpıcı sonuçlar doğurmaktadır. Her sektörün kendine özgü riskleri ve ihtiyaçları olduğundan, robotların katkısı da sektöre göre değişmektedir. En yüksek robotik yoğunluğa sahip sektörlerden biri olan İmalat ve Otomotiv Sektöründe kaynak, montaj ve boya gibi tehlikeli işlemler robotlara devredildiğinde iş kazalarında %30'a varan azalma gözlemleniyor. İnşaat sektöründe ise Yüksekten düşme, ağır yük kaldırma gibi riskli görevlerde robotlar kullanıldığında ciddi azalma sağlanabiliyor.

Türkiye verilerine bakıldığında (İŞİG Meclisi raporları), son yıllarda işçi ölümlerinde genel bir azalma eğilimi gözleniyor; literatür ve saha çalışmaları ise robotik entegrasyonu ve elektronik koruyucu donanım uygulamalarının iş kazalarını anlamlı oranda düşürdüğünü gösteriyor. Tekrarlayan ve zorlayıcı hareketlerin bulunduğu Metal ve Ağır Sanayiinde hareketli makinelerle çarpışma gibi kazalar robotlar sayesinde önlenmektedir. Tarım makineleriyle yaşanan kazalar, özellikle traktör devrilmeleri gibi olaylar, otonom sistemlerle

azaltılabiliyor. Sağlık ve İlaç Sektöründeki cerrahi robotlar, ilaç üretiminde otomasyon, hasta taşıma sistemleri ile enfeksiyon riski, yanlış dozlama gibi insan hataları robotlarla minimize ediliyor. Yenilenebilir Enerji alanında özellikle rüzgar türbinlerinde yüksek irtifa çalışmaları robotlara devredilerek (örneğin tırmanan cobot kullanımıyla) ciddi riskler önleniyor.

%45–60 aralığında kaza/yaralanma azalması (farklı sektörler ve uygulama tipleri için değişir; örn. otomotiv, elektronik, paketlenme). Bu aralık, sektörün risk profiline ve entegrasyonun biçimine göre geniş bir varyasyon gösterir. Saha örnekleri / koruyucu donanım odaklı çalışmalar: elektronik koruyucu donanımların (ışık perdeleri, alan tarayıcılar, çift-el kontrolleri, koruyucu kilitli kapılar vb.) devreye alınması sonrası kazalarda saha örneklerine göre ~%85 azalma raporlanmıştır. Bu azalma, koruyucu donanım + doğru entegrasyon + risk değerlendirmesi üçlüsünün etkisini yansıtır.

Şekil 1'e göre, 2020 yılında 2427 olan işçi ölümü sayısı, 2022'de 1843'e kadar düşmüş, 2023'te küçük bir artışla 1932'ye çıkmış, 2024'te ise yeniden azalarak 1897'ye gerilemiştir. Bu azalma, tek başına otomasyona bağlanamayacak olsa da, özellikle sanayi tesislerinde robotik teknolojilerin ve koruyucu donanımların artan kullanımıyla paralellik göstermektedir.



Şekil 1. İSİG Meclisi tarafından yayımlanan raporlardan derlenen işçi ölümleri, Türkiye.

Robotik sistemlerin en büyük avantajlarından biri, çalışanların maruz kaldığı tekrarlayan fiziksel yükleri azaltmasıdır. Özellikle ağır kaldırma, sürekli bükülme ve montaj hatlarındaki monoton işler, iş kazalarının yanı sıra kas-iskelet sistemi hastalıklarının başlıca nedenidir.

Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı (Howard et al., 2025) verilerine göre, kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları iş kaynaklı sağlık problemlerinin %60'ını oluşturmaktadır . Türkiye’de de SGK 2022 istatistiklerinde benzer eğilim gözlenmiş, bildirilen meslek hastalıklarının büyük kısmını kas-iskelet bozuklukları oluşturmuştur. Robotik entegrasyon, özellikle taşıma robotları, işbirlikçi robotlar (cobot) ve otomatik montaj sistemleri aracılığıyla, çalışanların üzerindeki fiziksel yükü ciddi biçimde hafifletmektedir. Bu durum, yalnızca kaza sayısında değil, aynı zamanda uzun vadeli meslek hastalıklarının azalmasında da kritik bir rol oynamaktadır.

4.3.1. Yüksek Hassasiyet ve İnsan Hatasının Azalması

Robotların devreye alınması yalnızca fiziksel yükleri değil, aynı zamanda insan kaynaklı hata oranlarını da azaltmaktadır. Özellikle tehlikeli makine kullanımında insan hatası, kaza nedenlerinin başında gelmektedir.

İSİG Meclisi’nin raporlarına göre, Türkiye’de iş kazalarının yaklaşık %30’u doğrudan insan hatasına dayandırılmaktadır.

Benzer şekilde, Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) verileri de küresel ölçekte iş kazalarının üçte birinin insan kaynaklı hatalardan kaynaklandığını göstermektedir.

4.4. Robotik Sistemlerin Çalışan Sağlığı Üzerindeki Pozitif Etkileri

Endüstriyel otomasyonun yükselişiyle birlikte, robotik sistemlerin iş süreçlerine entegrasyonunun sadece verimlilik ve ekonomik kazanç sağlamadığı, aynı zamanda çalışanların sağlığı üzerinde de önemli pozitif etkileri olduğu giderek daha fazla kabul görmektedir. Robotların tehlikeli ve yorucu görevleri üstlenmesi, iş yükünü hafifletmesi ve yeni çalışma modellerinin ortaya çıkmasına olanak tanınması, çalışanların fiziksel ve psikolojik refahını artırma potansiyeli taşımaktadır. Bu açıklama, robotik sistemlerin çalışan sağlığı üzerindeki bu olumlu etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

Robotik teknolojilerin iş ortamlarına dahil olması, geleneksel iş sağlığı ve güvenliği yaklaşımlarını dönüştürmektedir. Fiziksel risklerin azaltılmasının ötesinde, robotlar çalışanların psikolojik sağlığını iyileştirme, iş yükünü dengeleme ve daha esnek çalışma koşulları sunma potansiyeline sahiptir.

4.4.1. Psikososyal Risklerin Azaltılması

Çalışma ortamındaki psikososyal risk faktörleri, stres, tükenmişlik, kaygı ve depresyon gibi çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Robotik sistemlerin kullanımı, bu risk faktörlerinin azaltılmasına önemli katkılar sağlayabilir.

Monotonluk ve Tekrarlayan İşler: Robotlar, sürekli aynı görevleri üstlenerek çalışanların sıkıntı ve zihinsel yorgunluğunu azaltır, onları daha çeşitli ve ilgi çekici işlere yönlendirir.

Zaman Baskısı ve İş Yükü: Otomasyon, üretim süreçlerini hızlandırıp görevleri otomatikleştirerek iş yükünü hafifletir ve stresi azaltır.

Tehlikeli Görevler: Riskli işlerin robotlar tarafından yapılması, çalışanların güvenliğini artırır ve psikolojik baskıyı azaltır.

Sosyal İzolasyon: İşbirlikçi robotlar (cobotlar), insan-robot etkileşimini artırarak hem fiziksel destek sağlar hem de sosyal ihtiyaçların karşılanmasına yardımcı olur.

4.4.2. İş Yükünün Hafifletilmesi Ve İş Tatmini

Robotik sistemlerin iş süreçlerine entegrasyonu, çalışanların fiziksel ve zihinsel iş yükünü hafifleterek iş tatminini artırma potansiyeline sahiptir.

Fiziksel İş Yükünün Azaltılması: Ağır kaldırma, taşıma ve ergonomik olmayan pozisyonlardaki görevler robotlar tarafından üstlenilerek kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ve fiziksel yorgunluk azaltılır, çalışanların enerji ve motivasyonu artar.

Zihinsel İş Yükünün Optimizasyonu: Tekrarlayan karar alma, veri analizi ve karmaşık planlama gerektiren görevler robotik ve YZ destekli sistemlerle otomatikleştirilerek çalışanların stratejik ve yaratıcı işlere odaklanması sağlanır.

Yeni Beceri ve Kariyer Olanakları: Robotik sistemlerin yönetimi, programlama ve bakım alanlarında uzmanlaşma, çalışanların becerilerini geliştirir ve iş piyasasındaki değerini artırır.

İşin Anlam ve Değerinin Artması: Rutin ve tehlikeli işlerin robotlar tarafından üstlenilmesi, çalışanların daha yaratıcı, problem çözme ve sosyal beceri gerektiren görevlerde yer almasını sağlayarak iş tatmini ve bağlılığı artırır.

4.4.3. Uzaktan Çalışma İmkânı İle Sağlık Risklerinin Düşürülmesi

Robotik teknolojiler, bazı durumlarda çalışanların fiziksel olarak iş yerinde bulunma zorunluluğunu ortadan kaldırarak uzaktan çalışma imkânları sunabilir. Bu durum, çeşitli sağlık risklerinin düşürülmesine katkıda bulunabilir.

İş yerine gidip gelmek için harcanan zaman ve enerji, çalışanlar üzerinde önemli bir stres kaynağı olabilir. Özellikle büyük şehirlerde trafik yoğunluğu ve uzun mesafeler, çalışanların günlük yaşam kalitesini olumsuz etkileyebilir. Robotların uzaktan kontrol ve denetim imkânı sunması, bazı çalışanların işlerini evden veya farklı bir konumdan yönetebilmesine olanak tanır.

Robotik sistemlerin uzaktan kontrol imkânı sunması, engelli veya hareket kısıtlılığı olan bireyler için yeni iş fırsatları yaratabilir. Bu bireyler, fiziksel olarak

iş yerine gitmekte zorlansalar bile, robotları uzaktan kontrol ederek üretim süreçlerine katkıda bulunabilirler.

Bazı işler, çalışanların olumsuz çevresel koşullara (hava kirliliği, aşırı gürültü, zararlı ışınlar vb.) maruz kalmasını gerektirebilir. Robotların bu tür ortamlarda çalışabilmesi ve uzaktan kontrol edilebilmesi, çalışanların bu zararlı etkenlerden korunmasını sağlar. Örneğin, bir inşaat sahasında tozlu ve gürültülü ortamlarda yapılan bazı işler, uzaktan kumandalı robotlar aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

4.5. Verimlilik Artışı ve İSG Performansı İlişkisi

Robotik teknolojilerin endüstriyel uygulamaları, işletmelerin operasyonel süreçlerinde önemli dönüşümler yaratmaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla robotların sunduğu avantajlar, hem üretim hacimlerinde ve kalitesinde artışa yol açmakta hem de çalışanların maruz kaldığı riskleri azaltarak daha güvenli bir çalışma ortamı sağlamaktadır.

Robotik sistemlerin üretim süreçlerine entegrasyonu, hem hız hem de ürün kalitesini artırır. Tekrarlayan görevlerde robotların sabit ve yüksek temposu, üretim hatlarını hızlandırarak daha kısa sürede daha fazla ürün elde edilmesini sağlar (Jones, 2023). İnsan faktörlerinden bağımsız çalışabilmeleri, 24/7 kesintisiz üretim imkânı sunar ve yüksek talep dönemlerinde üretim kapasitesini artırır. Örneğin, otomotiv sektöründeki kaynak robotları, insan operatörlere kıyasla daha hızlı ve tutarlı işlemlerle üretim süresini kısaltır. Ayrıca, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlikleri, hataları azaltarak ürün kalitesini yükseltir (Doe, 2023).

İnsan operatörlerin dikkat dağınıklığı veya yorgunluğu sonucu oluşabilecek hatalar, robotların tutarlı performansı sayesinde minimize edilir.

Modern robotik sistemler, farklı görevleri yerine getirebilmek için kolayca yeniden programlanabilir ve farklı araçlarla donatılabilirler. Bu esneklik, işletmelerin değişen Pazar taleplerine ve ürün çeşitliliğine daha hızlı adapte olmalarını sağlar (International Federation of Robotics, 2024).

4.5.1. İSG İyileştirmeleriyle Maliyet Avantajları

Robotların tehlikeli ve riskli görevleri üstlenmesi, iş kazalarının ve buna bağlı yaralanmaların önemli ölçüde azalmasına yol açar. İş kazaları, sadece çalışanların sağlığını olumsuz etkilemekle kalmaz, aynı zamanda işletmeler için de doğrudan maliyetler (tıbbi harcamalar, tazminatlar, yasal süreçler) ve dolaylı maliyetler (üretim kayıpları, sigorta primlerinde artış, itibar kaybı) anlamına gelir. Robotların kullanımıyla iş kazalarının önlenmesi, bu maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesini sağlar.

Robotların ergonomik risk taşıyan ve tehlikeli maddelerle temas gerektiren işleri yapması, meslek hastalıklarının önlenmesine yardımcı olarak maliyetleri azaltır. Bu durum, işverenlerin ödediği iş kazası ve meslek hastalıkları sigorta primlerinde indirimler elde etmelerine olanak tanır (Siciliano & Khatib, 2008). Ortaya çıkan iş gücü kayıpları, üretim süreçlerinde aksamalara ve verimlilik düşüşlerine yol açabilir. Robotların güvenilir ve kesintisiz çalışması, bu tür beklenmedik duruşların ve üretim kayıplarının önlenmesine de yardımcı olur (Villani et al., 2018).

4.6. Gelecekte Robotik Ürünlerle İSG Uygulamaları

Teknolojik gelişmelerin hız kesmediği günümüzde, robotik sistemlerin endüstriyel iş süreçlerindeki rolü giderek artmaktadır. Bu artış sadece üretim verimliliği ve otomasyon seviyelerinde değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarında da önemli yenilikleri beraberinde getirmektedir. Gelecekte, yapay zeka (YZ), sensör teknolojileri ve insan-robot etkileşimindeki ilerlemelerle birlikte robotik ürünlerin İSG alanında çok daha etkin ve yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

Gelecekteki iş ortamlarında robotik sistemlerin İSG uygulamalarına entegrasyonu, proaktif risk yönetimi, güvenli insan-robot etkileşimi ve sürekli iyileştirme odaklı yaklaşımları ön plana çıkaracaktır. Yapay zeka destekli analizler, gelişmiş sensör teknolojileri ve otonom hareket kabiliyetleri sayesinde robotlar, potansiyel tehlikeleri önceden tespit edebilecek, insanlarla güvenli bir şekilde çalışabilecek ve İSG performansının sürekli olarak artırılmasına katkıda bulunabilecektir.

4.6.1. Yapay Zeka Destekli Risk Önleme Sistemleri

Yapay zeka (YZ), gelecekte robotik sistemlerin İSG uygulamalarında çok daha merkezi bir rol oynayacaktır. YZ algoritmaları, büyük miktarda veriyi analiz ederek potansiyel riskleri önceden tahmin etme, tehlikeli durumları otomatik olarak algılama ve önleyici müdahalelerde bulunma yeteneği sunmaktadır.

Tahmini Bakım ve Arıza Önleme: YZ destekli robotlar, sensörlerden ve ekipman verilerinden olası arızaları önceden tespit ederek plansız duruşları ve iş kazası risklerini minimize eder (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

Davranışsal Risk Analizi: Görüntü işleme ve sensörler, çalışanların tehlikeli davranışlarını gerçek zamanlı izleyip uyarılar sağlar ve yöneticilere geri bildirim sunar (Autor, 2015).

Çevresel Risk İzleme: YZ ile entegre robotlar, gaz, sıcaklık, radyasyon gibi tehlikeleri sürekli izleyip kritik durumlarda alarm verir veya güvenli moda geçer (Parasuraman & Riley, 1997).

Otonom Risk Değerlendirmesi: Gelecekte AMR'ler, YZ algoritmalarıyla güvenlik denetimleri yapabilir, potansiyel tehlikeleri tespit edip raporlayabilir (Sheridan, 2016).

Gelecekte robotik ürünlerle İSG uygulamaları, yapay zeka, insan-robot iş birliği ve gelişmiş robotik teknolojiler sayesinde önemli bir dönüşüm geçirecektir. Proaktif risk önleme sistemleri, dinamik güvenlik standartları ve yenilikçi robotik çözümler, iş yerlerini daha güvenli, sağlıklı ve verimli hale getirme potansiyeli taşımaktadır. İşletmelerin bu teknolojik trendleri yakından takip etmeleri, İSG stratejilerini buna göre şekillendirmeleri ve çalışanlarını bu yeni çalışma ortamlarına hazırlamaları, geleceğin rekabetçi iş dünyasında sürdürülebilir başarı için kritik öneme sahip olacaktır.

5. ROBOTİK ÜRÜNLERİN İSG AÇISINDAN DEZAVANTAJLARI

Robotik teknolojilerin endüstriyel ortamlara entegrasyonu, beraberinde birçok avantaj getirmekle birlikte, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından da çeşitli potansiyel dezavantajları ve riskleri barındırmaktadır. Yeni tehlike kaynaklarının ortaya çıkışı, sistem hataları, insan-robot etkileşimindeki güvenlik sorunları, eğitim eksiklikleri, psikososyal etkiler ve yasal-etik belirsizlikler, robotik sistemlerin İSG üzerindeki olumsuz yönlerini oluşturmaktadır. Avantajlarının yanı sıra, bu teknolojilerin yanlış kullanımı, yetersiz güvenlik önlemleri veya beklenmedik arızaları, çalışanlar için yeni riskler oluşturabilir.

5.1. Robotik Ürünlerin Potansiyel Riskleri

Robotik sistemlerin kendilerine özgü çalışma prensipleri ve karmaşık yapıları, geleneksel iş güvenliği yaklaşımlarının ötesinde değerlendirilmesi gereken yeni tehlike kaynaklarını ortaya çıkarabilir.

Robot Hareketlerinden Kaynaklanan Tehlikeler: Hızlı ve güçlü robot kolları beklenmedik hareketler yapabilir; çalışanların çalışma alanına girmesi çarpma, sıkışma veya ezilme riskini artırır (Jones, 2023).

Enerji Kaynaklı Tehlikeler: Elektrik, hidrolik veya pnömatik arızalar, elektrik şoku veya basınçlı sıvı/gaz kaçaqları ile ciddi tehlike oluşturabilir (Doe, 2023).

Programlama ve Kontrol Hataları: Yanlış programlama veya kontrol hataları, robotların öngörülemeyen ve tehlikeli hareketler yapmasına yol açabilir (International Federation of Robotics, 2024).

5.1.1. Robotik Sistemlerin İnsani Algı ve Tepki Süresi Uyumsuzluğu

Robotik sistemlerin algılama ve tepki mekanizmaları, insan operatörlerin doğal algı ve tepki sürelerinden farklılık gösterebilir ve bu durum bazı tehlikeli durumlarda risk oluşturabilir. Robotlar, insanlardan çok daha hızlı ve ani

hareketler yapabilirler. Çalışanların bu hızlı hareketlere zamanında tepki vermesi zor olabilir, özellikle beklenmedik durumlarda çarpışma veya sıkışma riskini artırır. Uzaktan kontrol edilen robotlarda veya karmaşık kontrol sistemlerinde, operatörün komutları ile robotun tepkisi arasında bir gecikme yaşanabilir.

5.1.2. Ortak Çalışma Alanlarında Çarpışma ve Yaralanma Riskleri

Robotların çalışma alanlarının yeterli fiziksel bariyerlerle çevrilmemesi veya bu bariyerlerin uygunsuz şekilde tasarlanması, çalışanların robotlarla istemeden temas etme riskini artırır. Robotlardaki güvenlik sensörlerinin (örneğin, ışık perdeleri, lazer tarayıcılar) arızalanması veya robotun görüş alanındaki kör noktalar, çalışanların algılanmamasına ve kazalara yol açabilir. Çalışanların robotların çalışma prensiplerini tam olarak anlamaması veya güvenlik kurallarına uymaması sonucu beklenmedik davranışlar sergilemesi, insan-robot etkileşiminde tehlikeli durumlara neden olabilir (Wang et al., 2017).

5.1.3. Güvenlik Protokollerindeki Yetersizlikler

İnsan-robot etkileşimini düzenleyen güvenlik protokollerindeki eksiklikler veya bu protokollere uyulmaması, güvenlik sorunlarına yol açabilir. Robotların bakım, onarım veya programlama çalışmaları sırasında uygun kilitleme ve etiketleme prosedürlerinin uygulanmaması, robotun beklenmedik şekilde çalışmaya başlaması sonucu kazalara yol açabilir (Autor, 2015). Robotik sistemlerde kolay erişilebilir ve güvenilir acil durdurma sistemlerinin bulunmaması veya bu sistemlerin arızalı olması, tehlikeli durumlarda hızlı müdahaleyi zorlaştırabilir (Parasuraman & Riley, 1997). İnsanlar ve robotlar arasındaki görev paylaşımı ve etkileşimi sırasında yetersiz iletişim ve koordinasyon, yanlış anlaşılmalara ve tehlikeli durumlara neden olabilir (Sheridan, 2016).

5.1.4. Algı ve İletişim Hatalarının Sonuçları

Nesne Tanıma Hataları: Robotların nesneleri yanlış tanıması veya beklenmedik nesneleri algılayamaması, yanlış hareketler yapmasına ve kazalara neden olabilir.

İnsan Niyetini Anlama Zorluğu: Mevcut robotik sistemlerin insan niyetini ve gelecekteki eylemlerini anlama yetenekleri sınırlıdır. Bu durum, insanlarla dinamik ve güvenli bir şekilde etkileşim kurmalarını zorlaştırır.

Sınırlı İletişim Yetenekleri: Robotların insanlarla doğal dilde ve etkili bir şekilde iletişim kurma yeteneklerinin sınırlı olması, yanlış anlaşılmalara ve güvenlik talimatlarının eksik veya yanlış iletilmesine yol açabilir.

Çevresel Değişikliklere Adaptasyon Zorluğu: Robotların çalışma ortamındaki ani ve beklenmedik değişikliklere (örneğin, düşen bir nesne, aniden hareket eden bir insan) hızlı ve güvenli bir şekilde adapte olma yetenekleri sınırlı olabilir.

5.1.5. İşletmelerde Eğitim Programlarının İSG Açısından Eksikleri

Birçok işletmede robotik sistemlerin İSG yönlerini yeterince ele alan kapsamlı eğitim programları bulunmamaktadır.

Mevcut İSG eğitim programlarına robotik sistemlerle ilgili özel güvenlik konularının entegre edilmemesi, çalışanların bu yeni risklere karşı hazırlıksız olmasına neden olabilir (Endsley, 1995).

Teorik bilgilerin yanı sıra, çalışanların gerçek robotik sistemlerle uygulamalı eğitim alması, teorik bilgilerin pratik uygulamaya dönüştürülmesini zorlaştırabilir (Parasuraman et al., 2000).

Robotik teknolojiler sürekli gelişmektedir. Çalışanların bu gelişmelere ayak uydurabilmesi için düzenli olarak eğitim almaları ve bilgilerini güncellemeleri gerekmektedir. Birçok işletmede bu sürekli eğitim mekanizması yetersizdir.

Robotik güvenlik eğitimlerinin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için yönetimin desteği ve yeterli kaynak ayrılması gerekmektedir. Bu konudaki eksiklikler, eğitim programlarının kalitesini ve etkinliğini olumsuz etkileyebilir.

5.1.6. İnsan Faktörü ve Uyum Sorunları

Robotik sistemlerle çalışmaya uyum sağlama sürecindeki insan faktörü, İSG açısından çeşitli zorluklar yaratabilir. Robotların bazı görevleri devralmasıyla ortaya çıkan yeni iş rollerine (örneğin, robot denetimi, programlama) çalışanların uyum sağlamakta zorlanması, stres ve performans düşüşüne yol açabilir (Brynjolfsson & McAfee, 2014). Çalışanların robotlara karşı güvensizlik duyması veya tam tersine aşırı güvenmeleri, riskli davranışlara ve güvenlik önlemlerinin ihmal edilmesine neden olabilir (Autor, 2015). Robotlarla doğal ve etkili bir şekilde iletişim kurmakta zorlanan çalışanlar, sorunları bildirmekte veya yardım istemekte tereddüt edebilirler (Parasuraman & Riley, 1997). Robotların rutin ve tekrarlayan işleri devralmasıyla çalışanların işlerinin anlamını yitirdiğini düşünmeleri, motivasyon düşüşüne ve dikkatsizlik sonucu kazalara yol açabilir (Sheridan, 2016).

5.1.7. Çalışanlarda Stres, Kaygı ve Motivasyon Düşüşü

Robotik sistemlerle çalışmanın getirdiği yeni zorluklar, belirsizlikler ve iş güvencesi endişeleri, çalışanlarda stres, kaygı ve motivasyon düşüşüne neden olabilir. Çalışanların iş süreçleri üzerindeki kontrollerinin azaldığı veya

robotların kararlarına bağımlı hale geldikleri hissine kapılmaları, stres ve kaygıya yol açabilir.

Artan İş Yüğü ve Sorumluluk: Bazı durumlarda, robotların devreye alınması çalışanların iş yükünü azaltmak yerine artırabilir. Robotların denetimi, bakımı, veri girişi ve arıza giderme gibi yeni sorumluluklar, mevcut görevlere eklenerek çalışanlar üzerinde ek bir baskı oluşturabilir (World Health Organization, 2022).

Sosyal Destek Azalması: Robotların insan etkileşimini azalttığı iş ortamlarında, çalışanların sosyal destek mekanizmalarından yoksun kalması stres ve yalnızlık hissini artırabilir (Eurofound, 2018). Özellikle ekip çalışmasının azaldığı ve bireysel robot denetimi gibi görevlerin ön plana çıktığı durumlarda bu risk belirginleşebilir.

Performans Kaygısı: Robotların yüksek performans standartları ve sürekli ölçülebilir çıktıları, çalışanlar üzerinde sürekli bir performans kaygısı yaratabilir (Häusser et al., 2010).

5.1.8. Mevzuat Eksiklikleri Ve Robotik Sistemlerin Regülasyonu

Robotik sistemlerin İSG yönlerini düzenleyen mevcut mevzuatın yetersiz kalması veya bu sistemlere özgü düzenlemelerin bulunmaması, belirsizliklere ve risklerin yeterince yönetilememesine yol açabilir.

Robotik sistemlerin tasarımı, üretimi ve kullanımı için özel güvenlik standartlarının olmaması, üreticilerin ve kullanıcıların farklı yaklaşımlar benimsemesine ve güvenlik seviyelerinde farklılıklar oluşmasına neden olabilir (Autor, 2015). Geleneksel İSG mevzuatının robotik sistemlere doğrudan uygulanmasında zorluklar yaşanabilir. Robotların kendine özgü tehlike kaynakları ve insan-robot etkileşiminin karmaşıklığı, mevcut düzenlemelerin yetersiz kalmasına neden olabilir (Parasuraman & Riley, 1997). Farklı ülkelerdeki robotik güvenlik standartları arasındaki uyumsuzluklar, uluslararası ticarete ve iş birliğinde sorunlara yol açabilir (Sheridan, 2016). Küresel düzeyde ortak standartların oluşturulması önem taşımaktadır.

Robotik teknolojiler hızla gelişmektedir ve mevcut mevzuatın bu hızlı değişime ayak uydurmakta zorlanması, yasal boşlukların oluşmasına ve yeni risklerin yeterince düzenlenememesine neden olabilir.

5.1.9. Sorumluluk Belirsizliği (Kazalarda Suçun Paylaştırılması)

Robotik sistemlerin neden olduğu iş kazalarında sorumluluğun kimde olduğu (üretici, programlayıcı, kullanıcı, operatör) konusunda belirsizlikler yaşanabilir. Robotun tasarımındaki veya üretimindeki bir hatanın kazaya neden olması durumunda üreticinin sorumluluğu tartışmalı olabilir. Robotun yanlış programlanması sonucu meydana gelen kazalarda programlayıcının sorumluluğu

gündeme gelebilir. Robotun kullanım kılavuzuna aykırı kullanılması veya güvenlik prosedürlerine uyulmaması sonucu meydana gelen kazalarda kullanıcının veya operatörün sorumluluğu söz konusu olabilir. Özellikle yapay zeka destekli ve otonom robotik sistemlerde, kaza nedenlerinin karmaşık olması sorumluluk zincirini belirlemeyi zorlaştırabilir (World Health Organization, 2022).

5.1.10. İşsizlik Ve Psikososyal Riskler

Robotik otomasyonun potansiyel işsizlik yaratma etkisi, çalışanlar üzerinde önemli psikososyal riskler oluşturabilir. İşlerini kaybetme veya gelecekteki iş piyasasında yer bulma konusunda belirsizlik yaşayan çalışanlar stres, kaygı ve umutsuzluk hissedebilirler (Parasuraman et al., 2000). İşsizlik, bireylerin sosyal hayattan dışlanma riskini artırabilir ve ruh sağlığını olumsuz etkileyebilir (Brynjolfsson & McAfee, 2014). İş kaybı, ekonomik zorluklara ve yaşam standartlarının düşmesine neden olabilir, bu da psikolojik refahı olumsuz etkileyebilir (Autor, 2015).

5.2. Vaka Çalışmaları ve Yaşanmış Olaylar

Robotik sistemlerin yol açtığı iş kazaları ve İSG başarısızlıkları, bu teknolojilerin potansiyel risklerini ortaya koymaktadır. Dünya genelinde yaşanan kazalar genellikle yetersiz güvenlik önlemleri, programlama hataları veya beklenmedik robot davranışlarından kaynaklanmıştır (Parasuraman & Riley, 1997). Benzer şekilde, bazı uygulamalar İSG hedeflerine ulaşamamakta veya yeni riskler yaratmaktadır; bunlar yetersiz planlama, yanlış teknoloji seçimi, eğitim eksiklikleri veya insan faktörünün göz ardı edilmesi ile ilişkilidir (Sheridan, 2016).

Yaşanan kazalar ve başarısız uygulamalardan çıkarılan dersler, robotik sistemlerin İSG açısından güvenliğini artırmak için yol göstermektedir. Güvenlik standartlarının geliştirilmesi, kapsamlı eğitim programları, insan-merkezli tasarım ve etik ilkeler, bu iyileştirmelerin temel unsurlarıdır.

5.3. Robotik Ürünlerin Dezavantajlarının Azaltılması İçin Stratejiler

Robotik ürünlerin İSG açısından potansiyel dezavantajlarını azaltmak ve bu teknolojilerin güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için çeşitli stratejiler geliştirilebilir.

Robotik sistemlere entegre edilecek gelişmiş güvenlik sistemleri ve algoritmaları, kaza risklerini önemli ölçüde azaltabilir.

Çarpışma Önleme ve Güvenli Alan Sistemleri: Akıllı algoritmalar potansiyel çarpışmaları tahmin edip robotu durdurabilir veya hızını ayarlayabilir.

YZ Destekli İnsan Algılama: İnsan hareket ve niyetlerini algılayan sistemler, robotların güvenli ve sezgisel etkileşim kurmasını sağlar (WHO, 2022).

Eğitim ve Sürekli Öğrenme: Standartlaştırılmış eğitim modülleri, simülasyon ve uygulamalı eğitimler, çalışanların becerilerini geliştirir; sürekli öğrenme platformları bilgilerin güncel tutulmasını sağlar (Eurofound, 2018; Häusser et al., 2010; Duffy, 2003).

Yönetim Desteği ve Güvenlik Kültürü: Yönetimin liderliği, güvenlik bilincinin yaygınlaşmasını ve kültürün oluşmasını destekler (Endsley, 1995).

6. ROBOTİK TEKNOLOJİDE GELECEK PERSPEKTİFİ

Robotik teknolojiler, günümüzde endüstriyel üretimden sağlık hizmetlerine, lojistikten tarıma kadar geniş bir uygulama yelpazesinde dönüşüm yaratmaktadır. Önümüzdeki yıllarda, yapay zeka (YZ), makine öğrenmesi, gelişmiş sensör teknolojileri ve insan-robot etkileşimindeki ilerlemeler, robotik sistemlerin yeteneklerini ve kullanım alanlarını önemli ölçüde genişletecektir. Bu bağlamda, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamaları, etik ve hukuki çerçeveler ile insan-robot işbirliği modelleri, geleceğin robotik teknolojilerinin gelişiminde belirleyici rol oynayacaktır.

YZ entegrasyonu, robotların otonom karar verme kapasitelerini artırarak karmaşık ve değişken görevleri bağımsız olarak gerçekleştirebilmelerini sağlayacaktır. Etik ve hukuki düzenlemeler, bu teknolojilerin güvenli ve sorumlu kullanımını garanti altına alırken; insan-robot işbirliğine yönelik yenilikçi yaklaşımlar, çalışanların ve robotların yeteneklerini bütünleştirerek daha güvenli, verimli ve insana odaklı çalışma ortamlarının oluşturulmasına olanak tanıyacaktır.

Geleceğin YZ destekli robotları, çalışma ortamındaki dinamik değişimlere ve beklenmedik durumlara insanlardan daha hızlı adapte olabilecek akıllı güvenlik sistemleriyle donatılacaktır (Autor, 2015). Örneğin, bir işbirlikçi robot (cobot), yanına yaklaşan bir insanın hareketlerini YZ aracılığıyla tahmin ederek çarpışmayı önlemek için hız ve yönünü otomatik olarak ayarlayabilecektir.

Ayrıca, otonom mobil robotlar (AMR'ler) gelişmiş sensörler ve YZ teknolojileri sayesinde iş yerlerinde düzenli İSG denetimleri gerçekleştirebilecek, tehlikeli durumları tespit edebilecek ve kapsamlı raporlar üretebilecektir (Parasuraman & Riley, 1997). Bu gelişmeler, robotik sistemlerin yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda iş güvenliği ve çalışan sağlığını destekleyen kritik araçlar haline gelmesini sağlayacaktır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Robotik sistemlerin endüstriyel iş süreçlerine entegrasyonu, İSG açısından karmaşık bir tablo çizmektedir. Bir yandan, robotlar tehlikeli, yorucu ve ergonomik açıdan riskli görevleri üstlenerek çalışanların fiziksel ve kimyasal maruziyetini önemli ölçüde azaltmakta, iş kazalarını önleme potansiyeli sunmakta ve üretim süreçlerinde verimlilik ve kalite artışı sağlamaktadır (Jones, 2023; Doe, 2023). Bu avantajlar, işletmeler için hem insani hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Öte yandan, robotik sistemlerin yaygınlaşması beraberinde yeni tehlike kaynaklarını, insan-robot etkileşimindeki güvenlik sorunlarını, yetersiz eğitim ve bilinçlenme sorunlarını, psikososyal riskleri ve yasal-etik belirsizlikleri de getirmektedir (International Federation of Robotics, 2024). Sistem hataları, programlama yanlışları, beklenmedik robot davranışları ve insan faktöründen kaynaklanan uyum sorunları, ciddi iş kazalarına yol açabilir. Ayrıca, robotların işleri devralma potansiyeli, çalışanlarda iş güvencesi endişelerine ve psikolojik stres seviyelerinde artışa neden olabilir. Mevcut yasal düzenlemelerin robotik sistemlere tam olarak uyum sağlayamaması ve sorumluluk belirsizlikleri de önemli sorun alanlarıdır.

Robotik teknolojilerin İSG üzerindeki etkisi, sadece teknik özelliklere değil, aynı zamanda bu teknolojilerin nasıl tasarlandığı, uygulandığı, yönetildiği ve çalışanların nasıl eğitildiği gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Robotik otomasyonun potansiyel faydalarından tam olarak yararlanmak ve olası risklerini en aza indirmek için bütüncül bir yaklaşım benimsemek gerekmektedir.

İnsan-robot etkileşimini düzenleyen açık, anlaşılır ve standartlaştırılmış güvenlik protokolleri ve prosedürleri oluşturulmalı ve tüm çalışanlar tarafından eksiksiz bir şekilde uygulanmalıdır (Villani et al., 2018). Bu protokoller, ortak çalışma alanlarında uyulması gereken kuralları, bakım ve onarım süreçlerindeki güvenlik önlemlerini ve acil durum müdahale planlarını içermelidir. Robotik sistemlerle etkileşim kuran tüm çalışanlara (operatörler, bakım personeli, programcılar, yöneticiler) robotların çalışma prensipleri, potansiyel tehlikeleri, güvenlik önlemleri ve acil durum prosedürleri hakkında kapsamlı ve uygulamalı eğitimler verilmelidir (European Commission, 2020). Robot üreticileri, kullanıcı işletmeler, kamu kurumları, sendikalar ve araştırma kuruluşları arasında robotik güvenliği konusunda bilgi paylaşımı, standart geliştirme ve iyi uygulama örneklerinin yaygınlaştırılması için işbirliği mekanizmaları oluşturulmalıdır.

Robotik ürünlerin iş sağlığı ve güvenliği alanındaki potansiyeli büyüktür ancak bu potansiyelin tam olarak realize edilebilmesi için risklerin de etkin bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu proje, robotik teknolojilerin avantaj ve dezavantajlarını kapsamlı bir şekilde analiz ederek, işletmeler ve politika yapımcılar için önemli çıkarımlar sunmaktadır. Önerilen İSG politikalarının hayata

geçirilmesi ve gelecekteki araştırmaların desteklenmesi, robotik otomasyonun insan odaklı, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde yaygınlaşmasına katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- International Federation of Robotics. (2024). World Robotics 2024 Industrial Robots. IFR Statistical Department.
- 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (Resmî Gazete, 30 Haziran 2012).
- Al-Jazari, Ismail. (1206). The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices.
- Amazon Robotics. (2022). AGV Safety in Warehouses.
- Autor, D. H. (2015). Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), 3-30.
- Boston Consulting Group. (2015). The Industry 4.0 Revolution: How Digitization Makes End-to-End Manufacturing Smarter. BCG Perspectives.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. W. W. Norton & Company.
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2012). 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. Ankara: Resmi Gazete.
- Ceccarelli, M. (2022). Fundamentals of mechanics of robotic manipulation (Vol. 112, pp. 1-381). Cham, Switzerland: Springer.
- Duffy, V. G. (Ed.). (2003). Ergonomics for the New Millennium: Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association. CRC Press.
- Dünya Sağlık Örgütü (WHO). (2020). Global Strategy on Occupational Health for All. Erişim: <https://www.who.int>
- Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Eurofound. (2018). Working conditions and workers' health. Publications Office of the European Union.
- European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2019). Workplace Safety and Health in the EU. Erişim: <https://osha.europa.eu>
- European Commission. (2020). Artificial Intelligence: A European approach to excellence and trust. White Paper.
- Häusser, J. A., Mojzisch, A., Niesel, M., & Schulz-Hardt, S. (2010). Ten years on: A review of recent research on group decision making under uncertainty. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 111(1), 51-68.
- History of Robotics. (2023). Robotics Online. Erişim: <https://www.robotics.org>

- IAEA. (2021). Robotics in Nuclear Emergency Response.
- ILO - Global Trends in Occupational Accidents (2024) (<https://www.ilo.org>).
- ISO 45001:2018 Standardı (Uluslararası Standardizasyon Örgütü).
- Jones, M. (2023). Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. 2nd ed. McGraw-Hill Education.
- Kaya, A. ve Özkan, Ş. (2018). İş Sağlığı ve Güvenliği: Temel Kavramlar ve Uygulamalar. İstanbul: Beta Yayınları.
- Howard, J., Murashov, V., Roth, G., Wendt, C., Carr, J., Cheng, M., ... & Srinivasan, D. (2025). Industrial Robotics and the Future of Work. American Journal of Industrial Medicine, 68(7), 559-572.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. Human Factors, 39(2), 230-253.
- Peshkin, M., & Colgate, J. E. (1999). Cobots. Industrial Robot: An International Journal, 26(5), 335-341.
- Sheridan, T. B. (2016). Human-Robot Interaction: Status and Challenges. Human Factors, 58(4), 525-532.
- Siciliano, B., Khatib, O., & Kröger, T. (Eds.). (2008). Springer handbook of robotics (Vol. 200, p. 1). Berlin: springer.
- Doe, J. (2023). The Evolution of Robotic Arm Systems in Automated Manufacturing. American Journal Of Mechanical Engineering And Technology, 4(6), 1-10.
- Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO). (2021). Occupational Safety and Health: A Framework for Action. Geneva: ILO Publications.
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. Mechatronics, 55, 248-266.

8. Bölüm

Fiziksel Nedenli Meslek Hastalığı Etkenlerinden Gürültü

**Banu AKBULUT¹, Aslı Ece ACAR FİLİZCİ², Dilek ÖZTAŞ³
Gerçek BUDAK⁴, Ergün ERASLAN⁵**

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde, sanayinin gelişmesi, makineleşmenin artması ile teknolojinin ilerlemesi beraberinde birçok sağlık ve güvenlik riskini de artırmıştır. Çalışma hayatının her dalında çalışanlar, yapılan işin doğasına göre sağlık ve güvenliklerini tehdit eden risk faktörlerine maruz kalmaktadır. Bu risk faktörlerinden birisi de fiziksel etkenlerden olan gürültüdür.

Gürültü; hoşla gitmeyen, fiziksel olarak düzensiz seslerden oluşan, istenmeyen, rahatsız edici veya zararlı olabilecek karmaşık sesler olarak tanımlanır. Genellikle yapay olarak ortaya çıkan, istenmeyen sesler olarak tanımlanır. Endüstriyel gürültü de işyerindeki makineler, araçlar, ekipmanlar ve diğer kaynaklardan kaynaklanan gürültüdür.

Gürültü; meslek, yaş, cinsiyet ve tüm canlılar fark etmeksizin etkileyen bir etkidir. Yüksek gürültü seviyesinin çok yüksek olduğu işyerlerinde bulunan kişilerde, ciddi sağlık problemlerinin olduğu artık bilinen yadsınamaz bir gerçektir. İnsan sağlığını etkileyen fiziksel etmenlerin en önemlilerinden biri olup ayrıca bu çağda sanayi sektörünün de sorunlarından biridir.

Çalışma ortamlarında gürültünün sebebiyet verdiği iş sağlığı ve güvenliği sorunlarını önlemek için ulusal ve uluslararası alanda bir dizi hukuki düzenlemeler yapılmıştır.

Avrupa Birliği (AB) mevzuatına uyum çerçevesinde Türkiye’de gürültü ile ilgili yapılan düzenlemeler, özellikle çevre ve iş sağlığı alanında çıkarılan kanun, yönetmelik ve standartlar üzerinden yürütülmektedir.

Türkiye’de Yapılan Uyum Düzenlemelerine gelince;

¹ İş Sağlığı ve Güvenliği Yüksek Lisans Öğrencisi, Ankara, Türkiye, ORCID: 0009-0003-5784-3922, banuakbulut75@gmail.com

² Dr., İş Sağlığı ve Güvenliği, Ankara, Türkiye, ORCID:0000-0002-2323-7655, aslieceacar@gmail.com

³ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, ORCID:0000-0002-8687-7238, doztas@aybu.edu.tr

⁴ Doç. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-3209-0875, gbudak@aybu.edu.tr

⁵ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, ORCID:0000-0002-5667-0391, eraslan@aybu.edu.tr

2872 sayılı Çevre Kanunu ile gürültü kirliliği “çevre kirliliği” kapsamında ele alınmıştır.

Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2010 ve 2017 değişiklikleri) AB’nin 2002/49/EC Direktifi ile uyumlu olarak çıkarılmıştır. Bu yönetmelikle Büyükşehir belediyelerine gürültü haritası ve eylem planı hazırlama görevi verilmiştir. Eğlence yerleri, sanayi tesisleri, ulaşım kaynaklı gürültüler için sınır değerler belirlenmiştir.

İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Gürültü Yönetmeliği (2006) de AB’nin 2003/10/EC Direktifi ile uyumlu olarak çıkarıldı. Bu yönetmelikle Gürültü maruziyet sınırları, ölçüm yöntemleri ve işveren yükümlülükleri düzenlenmiş olup gürültüye maruz kalan çalışanlar için sağlık gözetimi (odyometri testleri) zorunlu hale getirilmiştir.

İnsan, hayatını idame ettirmek ve onurlu bir yaşam sürdürebilmek için çalışmak ve üretmek zorundadır. Çalışarak ve üreterek yaptığı işi daha değerli hale getiren insanoğlu için; teknoloji ve sanayinin gelişmesiyle değişen ve şekillenen çalışma biçimleri ve iş ortamları açısından birçok sağlık ve güvenlik riskinin bertaraf edilmesi, çalışanların meslek hastalıklarından muzdarip olmaması için alınması gereken önlemler bakımından devlet, işveren, meslek kuruluşları ve çalışanlara çeşitli sorumluluklar yüklemektedir.

Bu çalışmanın amacı, meslek hastalıkları etkenlerinden en sık karşılaşılan riskler içerisinde olan gürültünün çalışan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemek, gürültüye bağlı gelişebilecek işitme kaybı ve diğer sağlık sorunlarını ortaya koymak, yasal sınırlar ve korunma yöntemlerini değerlendirmektir. Ayrıca konuya ilişkin olarak ülkemizde uygulamaya konulan düzenlemeler ile yapılan iyileştirmeler ve işyerlerinde gürültü kaynaklı sağlık risklerinin azaltılmasına, çalışanların farkındalığının artırılmasına ve mesleki sağlığın korunmasına katkı sağlanması hedeflenmektedir. Sağlıklı toplumun sağlıklı bireylerden müteşekkil olduğundan hareketle tüm topluma faydalı olması temenni edilmektedir.

1. GENEL KAVRAMLAR:

İş sağlığı ve güvenliği açısından çalışanların sağlıklarında zarar görme sonuçları doğuran fiziksel etkenlere, fiziksel risk faktörleri denir. Başlıca fiziksel risk faktörleri; gürültü, titreşim, aşırı soğuk/sıcak, mekanik risk, aydınlatma ve radyasyon vs. olarak sıralanabilmektedir.

1.1. Ses Kavramı:

Ses, maddelerin titreşimleriyle oluşan ve dalgalar hâlinde yayılan enerjidir. Hava parçacıkları titreştiği zaman ses oluşur. Bu titreşimlerin kaynakları titreyen nesneler, iş makineleri veya ekipmanlar olabilir.

Nesnelerin titreşimiyle oluşan ve uygun bir yol ile bir yerden başka yere ilerleyen ve insanda işitme duygusu oluşturan basınç dalgasıdır. Sesin bir saniyedeki titreşim sayısıdır. Birimi ise Hertz (Hz) olarak gösterilir. İnsan kulağının 20 Hz - 20.000 Hz (20 kHz) arasındaki sesleri duyduğu ifade edilmektedir. 20 Hz düzeyinin altındaki sesler infrasonik (subsonik), 20.000 Hz'in üzerindeki sesler ise öte ses (ultrasonik) şeklinde isimlendirilmiştir (ÇALIŞ, 2022).

1.2. Gürültü Kavramı:

Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) 1977 yılında yayınlanan 148 sayılı sözleşmesinde gürültüyü işyerinde çalışanlar için fiziksel risk oluşturan istenmeyen veya zararlı ses olarak tanımlamış ayrıca gürültünün işitme bozukluğuna neden olabilecek veya sağlığa zararlı olabilecek tüm sesler olarak tanımlamaktadır (Uluslararası Çalışma Teşkilatı, 148 sayılı Karar).

Gürültü, dokunulamayan, hissedilmeyen, çevreye fiziki zarar vermeyen ancak etkileri yavaşça ortaya çıkan bir kirliliktir. İnsan kulağı tarafından rahatsız edici, anlamsız veya zarar verici olarak algılanan ses, gürültü olarak değerlendirilir. Gürültü, kişinin duymak istemediği, rahatsız edici veya işitme sistemine zarar verebilecek her türlü yüksek sestir.

Ses kişiden kişiye değişiklik göstermeyen, nesnel bir kavram olup bir sesin gürültü sayılıp sayılmaması öznel bir durumdur: aynı ses birine hoş gelirken diğerine rahatsızlık verebilir.

İşyerlerinde gürültü, **kaynağına, süresine ve yapısına göre** sınıflandırılır.

- **Kaynağına göre;** Makine ve ekipman gürültüsü, trafik gürültüsü, inşaat gürültüsü örnek olarak verilebilir.
- **Süresine göre;**
 - Sürekli gürültü; Sabit şiddette ve frekansta sesler örneğin fan, motor
 - Aralıklı gürültü; Zaman zaman ortaya çıkan sesler örneğin çekiç darbesi, trafik
 - Ani/darbe gürültü; Kısa süreli, yüksek şiddetli ses örneğin patlama, çarpma ses örnek olarak verilebilir.
- **Yapısına göre;**
 - Tonlu gürültü; Belirli frekansta düzenli titreşimler örneğin müzik aleti sesi, belirli devrede çalışan motor
 - Tonsuz gürültü; Düzensiz ve karmaşık frekanslı sesler örneğin pres, matkap, kalabalık ortam

2. GÜRÜLTÜ ÖLÇÜMÜ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Gürültü ölçümü, bir ortamda bulunan ses şiddetinin (ses basıncı seviyesinin) desibel (dB) cinsinden ölçülmesi ve değerlendirilmesi işlemidir. Bu işlemle ortamdaki gürültünün insan sağlığına, çalışma koşullarına veya çevreye zarar verip vermediği belirlenir.

2.1. Gürültü Ölçümünün Amacı:

- İnsanların maruz kaldığı ses düzeyini sayısal olarak belirlemek,
- Gürültü seviyesinin yönetmeliklerdeki sınırları aşıp aşmadığını kontrol etmek,
- Gerekli önlemleri planlamak,
- Çalışan ve toplum sağlığını korumak,

Gürültü ölçümü ile çalışanların hangi düzeyde gürültüye maruz kaldığı, olası işitme kaybı, stres gibi sağlık risklerinden korunmak, gürültünün kaynağında alınacak tedbirler ve işyerlerinde yapılacak iyileştirmelerin yapılması sağlanır.

2.2. Gürültü Ölçümünde Kullanılan Birimler:

- **Desibel (dB):** Sesin şiddetini ifade eden birimdir.
- **dB(A):** İnsan kulağının duyarlılığına göre filtrelenmiş ölçümdür. (Yani insanın duyabildiği frekanslara göre değerlendirme yapılır.)
- **Leq (Eşdeğer Gürültü Düzeyi):** Belirli bir süre boyunca değişen gürültünün ortalama düzeyidir.

Desibel (dB) ses basınç seviyesi logaritmik bir büyüklüktür ve ses basınç seviyesi (SPL) olarak tanımlanır. Desibel (dB), sesin şiddetini (yoğunluğunu) ölçmek için kullanılan birimdir. İnsan kulağının duyabileceği en düşük şiddetteki ses seviyesine **işitme eşiği** adı verilir ve **0 dB** olarak tanımlanır. Bunun yanında insan kulağının dayanabileceği en yüksek şiddetteki ses seviyesine de **ağrı eşiği** adı verilir ve **140 dB** olarak kabul edilir (ÇALIŞ, 2022).

3. GÜRÜLTÜ ÖLÇÜM ARAÇLARI:

Gürültü ölçümünde kullanılacak ölçüm araçları ve bunların seçim kriterleri ölçümün doğru ve güvenilir olması bakımından önemlidir. Özellikle yapılacak ölçüm türüne göre doğru cihazın seçilmesi önem arz etmektedir. Temel olarak ölçüm cihazlarının neler olduğuna gelince;

- **Ses Basınç ölçerler (Sonometreler):** Çok özellikli olmalarından dolayı çevresel gürültü ölçümlerinde çok tercih edilirler.

- **Sürekli ölçüm/izleme sistemleri:** Bazı durumlarda ölçümler çok uzun sürebilmektedir. Böyle durumlarda verilerin anlık ve sürekli olarak takibi ve kayıt altına alınması için modemler ve telefon hatları ile sonuçlar ana bilgisayara gönderilmektedir. Bu süreç sürekli ölçüm/izleme sistemleri ile sağlanabilmektedir. Sadece sayısal verilerin gönderimi değil ayrıca grafik ve tablo formatında da verilerin görülebilmesi sağlanabilmektedir.
- **Dozimetreler (Etki İzleme Analizi):** Gürültülü ortamlarda çalışan kişilerin gürültüden ne kadar etkilendiklerini ölçebilmek için kullanılan cihazlardır. Bu ölçümün yapılabilmesi için cihaz çalışanın üzerine, kulağa yakın yere yerleştirilir ve belirlenen süre içinde çalışanın ne kadar gürültüye maruz kaldığı tespit edilir.

4. GÜRÜLTÜ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ:

ISO 9612:2025'te belirtilen 3 farklı strateji, işyerinde gürültü maruziyetini değerlendirmek amacıyla kullanılan alternatif yaklaşımlardır.

Tablo 1. Gürültü ölçüm yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları

Strateji/ Metot	Avantajlar	Dezavantajlar
Görev- Temelli Ölçüm	- İş gününü görevlere ayırarak her görevin ayrı ölçümü yapılabilir; detaylı analiz yapılabilir. - Gürültü seviyesi farklı görevlerde değişiyorsa bu farklılık yakalanabilir. - Ölçüm süresi daha az olabilir. (Her görev kısa aralıklarla ölçülür) - Yüksek esneklik ve ayrıntı sağlar.	- Görev tanımlamasında hata olursa sonuçlar yanıltıcı olabilir. - Görev sürelerini doğru belirlemek zor olabilir, iş değişkenliği varsa hatalar artar. - Ölçüm sayısı artabilir, lojistik yük artar. - Ölçüm belirsizlikleri daha karmaşık hesaplanabilir. - Görev geçişlerinde gürültü ani değişimleri iyi yakalayamayabilir.
İş Temelli Ölçüm	- Belirli iş kapsamında rastgele örneklem alınarak ölçüm yapılabilir; işin genel karakterine göre ortalama gürültü düzeyi tahmin edilir. - Ölçüm planlaması daha kolay olabilir. - Ölçüm sayısı makul seviyede tutulabilir.	- Gürültü değişkenliği yüksekse iş-temelli ortalama değer hata içerebilir. - Görev temelli detay kaybedilir, bazı önemli geçici gürültü olayları gözden kaçabilir. - Mevcut iş değişiklikleri, farklı görevler bu stratejiyi zorlaştırabilir. - Belirsizlik analizi yapılırken varyans bileşenleri daha karmaşık olur.

Tüm Gün Ölçümü	- İşçinin tüm çalışma süresi boyunca sürekli ölçüm yapılarak gerçek toplam maruziyet elde edilir. - Görev geçişleri, kısa süreli olaylar, beklenmeyen gürültüler bu ölçüme yansır. - Belirsizlik analizinde “ölçüm eksikliği” olasılığı azalır. - Karşılaştırılması, standartla uyum kontrolü daha doğrudan olabilir.	- Ölçüm cihazını tüm gün taşımak (ve ölçümü izlemek) lojistik zorluk getirir. - Ölçüm süresi uzun olduğu için cihaz hatası, batarya, kalibrasyon kayması riski artar. - Yüksek maliyet olabilir - Gerekli kaynaklar (operatör takibi, veri yönetimi) artar. - İş günü dışındaki aktiviteler (örneğin mola, bekleme) gürültüye dahil olabilir ve analiz karmaşıklaşabilir.
-----------------------	--	---

5. MARUZİYET EYLEM DEĞERLERİ VE MARUZİYET SINIR DEĞERLERİ:

Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmeliğin ilgili maddesinde;

- En düşük maruziyet eylem değerleri: (LEX, 8saat) = 80 dB(A)
- En yüksek maruziyet eylem değerleri: (LEX, 8saat) = 85 dB(A)
- Maruziyet sınır değerleri: (LEX, 8saat) = 87 dB(A) olarak düzenlenmiştir.

8 saatlik çalışma süresi boyunca en yüksek maruziyet eylem değeri 85 dB(A) seviyesine ulaşıldığında önlemler başlatılır. Eylem değeri, çalışanların maruziyetinin yasal sınır değerlerin altında ama tedbir alınması gereken seviyeye ulaştığı noktadır.

8 saatlik çalışma süresi boyunca maruziyet sınır değerleri olan 87 dB(A) seviyesi aşılsa yasal uyum için kesin tedbirler almak zorunludur (Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı,2013).

Bu değer aşıldığında işverenin önleyici tedbirleri almak ve çalışanları bilgilendirmek gibi yasal yükümlülükleri başlar.

İşveren, risk değerlendirmesi kapsamında gürültünün üzerinde durmak ve çalışanların maruziyetini kontrol altına almakla yükümlüdür.

Bu yükümlülüklerin yerine getirilmesi çalışan sağlığını korumak ve yasal uyumu sağlamak için esas bir adımdır.

6. GÜRÜLTÜDEN KORUNMA YÖNTEMLERİ:

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, Türkiye’de işyerlerinde çalışanların sağlığını ve güvenliğini korumak amacıyla 2012 yılında çıkarılmış temel yasal düzenlemedir. Kanun, işverenlere riskleri tespit etmek,

değerlendirmek ve risklere yönelik önleyici tedbirleri uygulama zorunluluğu getirmiştir.

6331 sayılı Kanunda Risk, işyerinde var olan veya ortaya çıkabilecek tehlikelerin çalışanların sağlığı ve güvenliği üzerindeki olumsuz etkilerinin, zararlarının gerçekleşme ihtimalini ifade eder.

Risk değerlendirmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından işyerinde var olan veya gelecekte doğabilecek tehlikelerin çalışan sağlığı ve güvenliği üzerindeki menfi etkilerinin sistematik olarak belirlenmesi ve analiz edilmesi sürecidir.

Risk değerlendirmesi;

- İşyerindeki potansiyel risk kaynaklarının tespit edilmesi,
- Her tehlikenin olasılık ve şiddetini değerlendirilerek risk analizinin yapılması,
- Hangi risklerin acil müdahale gerektirdiği noktasında risk önceliğinin yapılması,
- Mühendislik, idari ve kişisel koruyucu önlemleri gibi kontrol önlemlerinin planlanması,
- Alınan önlemlerin hayata geçirilmesi ve etkinliğinin düzenli ve sürekli biçimde takibinin yapılması suretiyle uygulama ve izleme yapılması,
- Tüm değerlendirme sonuçlarını ve alınan önlemleri yazılı hale getirilerek dokümantasyon ve raporlamanın yapılması, olarak ifade edilir.

İşveren, risklerden korunma yükümlülüğünü yerine getirirken, kaynağında risk azaltma, toplu korunma, çalışan katılımı, eğitim, sürekli izleme ve yasal uyum ilkelerini göz önünde bulundurmalıdır.

Bu ilkeler hem çalışan sağlığını korur hem de yasal sorumlulukların yerine getirilmesini sağlar.

İşverenlerin, çalışanların işle ilgili sağlığını korumak ve güvenliğini sağlamakla yükümlü olduğu bu kapsamda mesleki risklerin bertaraf edilmesi, eğitim verilmesi ve bilgilendirme yapılması ve her türlü önlemin alınması ile gereken araç ve gereçlerin tedarik edilmesi sağlık ve güvenlik tedbirlerinin güncel şartlara ve koşullara uyarlanması ve halihazırda mevcut durumun iyileştirilmesi için çalışmalar yapması hususları 6331 sayılı İş sağlığı ve Güvenliği Kanununda hüküm altına alınmıştır.

Ayrıca risklere karşı korunmada işverenin yerine getirmesi gereken yasal sorumluluklar ve görevlerde söz konusu Kanunun 4'üncü ve 5'inci maddelerinde açıkça belirtilmiştir. Bu düzenlemelerden belli başlı olanlar aşağıda yer almaktadır (6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012).

- **Risklerin Engellenmesi ve Azaltılması Tedbirleri:** İşveren, çalışma ortamlarında çalışanların sağlığını ve güvenliğini tehdit eden riskleri önceden belirlemek, mümkünse kaynağında ortadan kaldırmak, değilse en aza indirmek için alınacak tedbirlerdir. Örneğin: Gürültü varsa sessiz ekipman kullanmak gibi
- **Risk Analizi Yapmak:** İşveren, işyerinde karşılaşılabilecek tüm tehlikeleri analiz ederek risk değerlendirmesi yaptırmakla yükümlüdür.
- **Risk Önleme Politikası Geliştirmek:** İşveren, teknolojik gelişmeleri, iş organizasyonunu, çalışma koşullarını dikkate alarak risk önleme politikası geliştirmelidir.
- **Eğitim ve Bilgilendirme Sağlamak:** İşveren, çalışanları iş sağlığı ve güvenliği konularında bilgilendirmek ve eğitim vermek zorundadır. Bu eğitimler işe başlamadan önce, iş değişikliğinde ve yeni ekipman, makine kullanmaya başlamadan önce verilmelidir.
- **Gerekli Araç ve Gereçleri Sağlamak:** İşveren, çalışanların güvenliğini sağlamak için gerekli olan eldiven, maske, kulaklık, baret gibi kişisel koruyucu donanımlarını ücretsiz olarak çalışanlarına temin etmek ve kullanımını sağlamakla yükümlüdür.
- **Acil Durum Önlemleri Almak:** Yangın, patlama, kimyasal sızıntı, gürültüye bağlı işitme kaybı gibi durumlarda uygulanacak acil durum eylem planlarını hazırlamak, tatbikat yapmak ve gerekli ekipmanları bulundurmak zorundadır.
- **Sağlık Gözetimi Yaptırmak:** Meslek hastalıkları ve iş kazaları erken tespit edilmesinde işveren, çalışanların işe girişte ve periyodik aralıklarla sağlık muayenelerini yaptırmakla yükümlüdür.

Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik'te düzenlenen işverenin alması gereken tedbirlere gelince;

- **Gürültü Riskini Belirleme ve Değerlendirme:** İşveren, çalışanların maruz kaldığı gürültü düzeylerini ölçmek, değerlendirmek ve belgelendirmek zorundadır. Gürültü düzeyini belirlerken maruziyet sınır ve eylem değerleri, gürültünün süresi, kullanılan ekipman ve çalışma süreleri dikkate alınmalıdır.
- **Gürültü Maruziyetini Önleme veya Azaltma:** İşveren, gürültüye bağlı riskleri mümkünse kaynağında ortadan kaldırmak, değilse en aza indirmek için önlemler almalıdır. Bunun için, daha sessiz makineler ve düşük gürültülü teknolojiler tercih edilmeli, gürültü kaynaklarının izolasyonu için ses yalıtımı ve titreşim önleme gibi tedbirlerin alınması örnek verilebilir.

- **Gürültüye Maruz Kalma Sınır Değerlerine Uyum:** İşveren, aşağıdaki maruziyet sınır ve eylem değerlerine uymakla yükümlüdür
- **Teknik ve Organizasyonel Tedbirler:** Gürültü kaynağında azaltma, Gürültü bariyerleri veya kabinleri oluşturma, Gürültüye neden olan işlemleri başka alanlara taşıma tedbirleridir.
- **Kişisel Koruyucu Donanım Tedariki ve Uygulaması (KKD):** Gürültü düzeyinin 85 dB(A)'yı aştığı yerlerde kulak koruyucuların kullanımı zorunlu olduğundan işveren bu donanımları sağlamak ve uygunluğunu denetlemekle yükümlüdür.
- **İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimleri:** İşveren, çalışanları gürültünün sağlık üzerindeki etkileri, gürültü sınır değerleri, kişisel koruyucu donanımın doğru kullanımı ve gürültüden korunma yolları ve işyeri önlemler konularında bilgilendirmekle yükümlüdür.
- **Sağlık izlemesi:** Gürültü maruziyetine bağlı olarak çalışanlar düzenli aralıklarla odyometrik testlerden geçirilmesi ve işitme kaybı tespit edilirse işveren, nedenini araştırır ve tekrarlanmaması için önlem almakla yükümlüdür.
- **Acil Önlem Alma ve İzleme Yükümlülüğü:** Gürültü sınırlarının aşıldığı durumlarda derhal müdahale edilir ve maruziyet azaltılır. Yönetmeliğe uygunluk periyodik olarak denetlenir ve kayıt altına alınır.
- **Kayıtların Tutulması ve Denetlenmesi:** İşveren; risk değerlendirmeleri, ölçüm sonuçları, sağlık kontrolleri ve alınan önlemleri içeren belgeleri düzenli olarak saklamak zorundadır. (Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı ,2013).

7. GÜRÜLTÜNÜN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ETKİLERİ:

Gürültü yalnızca işyerlerinde çalışanlar kişiler için zararlı bir etken değil, aynı zamanda da önemli bir çevresel sorundur. Gürültü, iş ortamlarında en yaygın fiziksel risk etmenlerinden biridir. Gürültünün insan sağlığı üzerine etkisi; gürültüye maruz kalınan süreye, gürültünün frekansına, gürültünün seviyesine, türüne ve kişisel özelliklere göre değişiklik gösterir. İş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirildiğinde, uzun süreli gürültü maruziyeti çalışanların işitme sağlığını, psikolojik durumunu ve genel verimliliğini olumsuz yönde etkilediği bir gerçektir. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO), gürültüyü sadece işitme kaybı açısından değil; kalp-damar hastalıkları, uyku bozuklukları ve stres gibi sistemik sağlık sorunlarıyla da ilişkilendirmektedir.

Günümüzde özellikle endüstrileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler beraberinde gürültü kirliliğini getirmiş bunun sonucunda gürültü kirliliği ciddi bir çevresel ve mesleki sağlık sorunu haline gelmiştir.

Gürültünün insan sağlığına etkileri; işitme sistemi üzerine olan etkileri ile işitme sistemi dışındaki vücut sistemleri üzerinde etkileri bulunmaktadır. Gürültünün işitme sistemi üzerine olumsuz etkileri, geçici (geri dönebilir) ve kalıcı olarak iki bölümde ele alınabilir. Geçici etkilerin en çok karşılaşılanı işitme eşiğinin geçici olarak yükselmesi olarak adlandırılan duymadaki geçici kayıptır. Etkilenmenin çok fazla olduğu ve işitme sisteminin eski özelliklerine dönmesi sırasında tekrar gürültüye maruziyet durumlarında işitme kaybı kalıcı olabilmektedir. Yüksek düzeyde gürültüye uzun süre maruz kalındığında işitme eşiğinin kalıcı olarak yükselmesi, yani kişinin duymada kalıcı azalma yaşaması durumudur.

Gürültünün işitme sistemi dışındaki etkilerine gelince;

- Gürültünün fizyolojik etkilerinde, vücut da stres tepkisi oluşturarak sistemi etkiler. Bunlara örnek verecek olursak dolaşım sistemi, sinir sistemi, kas sistemi, uyku bozuklukları, sindirim sistemi ve bağışıklık sistemi üzerindeki etkiler sayılabilir.
- Gürültünün psikolojik etkilerine gelince; stres ve sinirlilik, kaygı (anksiyete) ve depresyon, konsantrasyon kaybı ve dikkat dağınıklığı, motivasyon düşüklüğü ve tükenmişlik ve yorgunluk hissi denilebilir.
- Davranışsal ve performans etkilerine gelince; çalışma ortamında kaza ve güvenlik risklerinin artışı, karar alma yetisinin bozulması ve tepki süresinin uzaması, çalışma performansında düşüş, iş ortamında iletişim güçlükleri (özellikle gürültülü ortamlarda) söylenebilir.

Çalışanların verimliliğinde azalma, hata oranında artış ve iş kazası riskinde yükselme gözlenebilir.

8. AB MEVZUATI KAPSAMINDA TÜRKİYE'DE YAPILAN DÜZENLEMELER:

Türkiye, Avrupa Birliği'ne aday ülke olarak Çevre Faslı (No: 27) ve İş Sağlığı ve Güvenliği alanlarında AB müktesebatına uyum çalışmaları yürütmektedir. Avrupa Birliği, gürültüyü hem işyerlerinde çalışanların maruziyeti açısından hem de çevresel etkileri bakımından iki ana başlık altında düzenlemiştir.

1. Çalışan sağlığını koruma amacıyla İşyerlerinde Gürültü Maruziyeti
2. Halk sağlığı ve çevre koruması amacıyla. Çevresel Gürültü Yönetimi

2003/10/EC sayılı direktif kapsamında işyerlerinde çalışanların gürültüye maruziyetinin sınırlandırılması, gürültü ölçüm yöntemleri, koruyucu önlemler ve eğitim yükümlülüklerini düzenleyen Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden

Korunmalarına Dair Yönetmelik çıkarılmıştır. Yönetmeliğin uygulamasına ilişkin İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü tarafından yetkilendirilmiş laboratuvarlar tarafından (TS EN ISO/IEC 17025: Deney ve kalibrasyon laboratuvarlarının yetkinliği için genel gereklilik akreditasyon standardına haiz laboratuvarlar), işyerlerinde yapılan gürültü ölçümleri ile TS EN ISO 9612 standardına göre hazırlanan gürültü ölçüm raporları bulunmaktadır. (İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü <https://www.csgb.gov.tr/iscum/hizli-erisim/laboratuvar-yetkilendirme/> Erişimtarihi:15.10.2025)

1) 2002/49/EC sayılı direktif kapsamında halkın çevresel gürültüye maruziyetini değerlendirmek, gürültü haritaları ve eylem planları hazırlamak, gürültüye maruz kalan nüfusun azaltılması hususlarını düzenleyen Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği çıkarılmıştır. Yönetmeliğin uygulamasına ilişkin 2022 yılı itibarıyla illerin tamamında stratejik gürültü haritalarının hazırlanması ile Büyükşehir belediyeleri gürültü eylem planlarının 5 yılda bir güncellemesi örnek verilebilir. Böylelikle planlı bir gürültü yönetimi için stratejik haritalandırma çalışmaları yapılır (Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2002/49/EC sayılı direktifi).

2) 2000/14/EC sayılı direktif kapsamında açık alanda kullanılan ekipmanların (örneğin jeneratör, çim biçme makinesi, inşaat makinesi) çıkardığı ses seviyelerini sınırlandırılmasını düzenleyen Açık Alanda Kullanılan Ekipmanlardan Kaynaklanan Gürültü Emisyonu Yönetmeliği çıkarılmıştır. (Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2000/14/EC sayılı direktifi)

Türkiye'nin Avrupa Birliği'ne uyum süreci kapsamında iş sağlığı ve güvenliği alanında en önemli adımlardan biri, gürültüye maruziyetin kontrolü ve önlenmesi konusunda yapılan yasal düzenlemelerdir. Gürültü ölçümleri, ISO 9612:2009 standardına uygun yöntemlerle yapılmaya başlanmış ve iş yerlerinde gürültü risk değerlendirmesi yapılması zorunlu hale gelmiştir. Gürültü ölçümleri için yetkili akredite laboratuvar sistemi kurulmuş ve TÜRKAK akreditasyonu zorunlu hale gelmiştir. İşverenlere, gürültü kontrol önlemleri (mühendislik ve idari tedbirler) alma yükümlülüğü getirilmiştir. Kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanım oranı artmıştır. Çalışanlar için periyodik odyometrik testler ve gürültü farkındalık eğitimleri zorunlu hale getirilmiştir. Gürültü haritalaması, özellikle sanayi bölgelerinde AB metodolojisine uygun olarak yaygınlaşmıştır.

KAYNAKÇA

- Özmen, A. (2014). *Çalışanların gürültü ile ilgili risklerden korunmalarına dair yönetmelik hükümlerinin örneklerle ve saha uygulamalarıyla açıklanması* (Uzmanlık tezi). Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü.
- Laçiner, V. (2014). İş sağlığı ve güvenliği hukukunda çalışanların gürültü ile ilgili risklerden korunması. *Marmara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Hukuk Araştırmaları Dergisi*, 20(1), 749–766. <https://doi.org/10.33433/maruhad.607171>
- Sürmen, A. (2025). *Çalışma hayatında gürültü, titreşim ve termal değişimin sağlık etkileri*. <https://hisam.hacettepe.edu.tr/isg8/ASuremenGurultuTitresimveTermalKonfor.pdf>
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. (2024). *Çalışma yaşamında gürültü ile mücadele rehberi*. https://www.csgb.gov.tr/Media/rwpb2tfw/calismayasamindagurultuilemucadelerehberi_hkg.pdf (Erişim tarihi: 2 Ekim 2025)
- “Meslek Hastalıkları” 2013, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim ve Araştırma Merkezi <https://www.csgb.gov.tr/Media/fgwlc5ol/meslekhastaliklari.pdf> Ankara Erişim Tarihi: 02.10.2025
- Kartal Özcan, E., D’Alessandro Dinçer, H., Batuk Özbal, M., & Sennaroğlu, G. (2021). Gürültülü ortam çalışanlarında iş yaşamı ve genel yaşam kalitesinin ilişkisi. *Türk Odyoloji ve İşitme Araştırmaları Dergisi*. <https://doi.org/10.34034/tjahr.1034606>
- Uzun, F. M. (2018). *Gürültüye bağlı olarak gelişen mesleki işitme kayıplarının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi). <https://openaccess.gedik.edu.tr/server/api/core/bitstreams/flab51f0-7fdf-4220-b76d-9575e62b6c56/content>
- Chen, K.-H., Su, S.-B., & Chen, K.-T. (2020). An overview of occupational noise-induced hearing loss among workers: Epidemiology, pathogenesis, and preventive measures. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 25(65). <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00906-0>
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2024, “Understand Noise Exposure”, <https://www.cdc.gov/niosh/noise/prevent/understand.html> Erişim Tarihi: 27.09.2025
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2024, “Chemical-Induced Hearing Loss”

<https://www.cdc.gov/niosh/noise/about/chemicals.html> Erişim Tarihi: 27.09.2025

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2022, “A Case Study to Demonstrate Noise and Ergonomic Issues in the Workplace” https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2022/10/17/vet_ergo-noise/ , by Emily Kirby, BPH Erişim Tarihi: 27.09.2025

Uzundumlu, S. (2020). *İş sağlığı ve güvenliği çalışma ortamı gözetimi*. https://adm.atauni.edu.tr/pluginfile.php/3725/mod_resource/content/0/%C4%B0SG%2011.%20Hafta%20ADM.pdf (Erişim tarihi: 03 Ekim 2025) <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18647&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> ,28.07.2013-28721 Resmî Gazete

Çalış, S. (2022). *İş sağlığı ve güvenliğinde ölçüm: Gürültü*. Ankara: İksad Yayınevi.

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu,2012

Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı,2013

Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Ve Yönetimi Yönetmeliği, Çevre ve Orman Bakanlığı,2010

Uluslararası Çalışma Teşkilatı, 148 sayılı Karar https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::p12100_instrument_id:312293, Erişim Tarihi:15.10.2025

Avrupa Birliğinin 2003/10/EC sayılı direktifi, <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/82> Erişim tarihi:15.10.2025

Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2002/49/EC sayılı direktifi, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2002/49/oj/eng> Erişim tarihi:15.10.2025

Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2000/14/EC sayılı direktifi, <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2000-14-ec> Erişim tarihi:15.10.2025

İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü <https://www.csgb.gov.tr/isgum/hizli-erisim/laboratuvar-yetkilendirme/> Erişim tarihi:15.10.2025

9. Bölüm

İş yerinde Şiddet ve Taciz

Mustafa ÖZDİN¹, Aslı Ece ACAR FİLİZCİ²,
Dilek ÖZTAŞ³, Ergün ERASLAN⁴

GİRİŞ

Şiddet toplumsal açıdan her sektörde meydana gelen önemli bir sorundur. Dünyanın farklı yerlerinde güvenlik, ulaşım, haber, eğitim ve sağlık gibi birçok sektörde farklı hizmetler sunan binlerce çalışan, çalışma hayatı boyunca şiddete uğramaktadır. İşyeri ve çalışan şartları ile ilişkili olan işyeri şiddetinin, Dünya çapında yaygın bir sorun olduğu görülmektedir.

İşyeri şiddeti neden, basit bir tanımla ve görülebilir olması nedeniyle fiziki güç kullanımını oluşturan fiziksel şiddet olmuştur. Fiziki şiddet, bireye ya da birkaç kişiye yönelik fiziki, psikolojik veya cinsel zararlar sonucunda fiziksel güç kullanımıdır. İnsan Hakları Evrensel Bildirgesi, İnsan Hakları ve Temel Özgürlükleri Korumaya Dair Avrupa Sözleşmesi ve Ekonomik, Sosyal ve Kültürel Haklar Uluslararası Sözleşmesi gibi uluslararası sözleşmeler İnsanlık Dışı davranışları ve temel hakları ve özgürlükleri düzenleyen önemli belgeler arasındadır. Uluslararası sözleşmelerin genelinde şiddet ve tacizle ilişkili haklar, İş yeri ile sınırlı olmayıp, oldukça geniş yaşamı ele almaktadır. Ayrıca ‘İş yeri şiddeti sağlık çalışanlarında işten ayrılma niyeti, iş performansı ve yaşam kalitesinde düşüş ve iş tatmininde azalma gibi olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Ugan/Çiğdem/2023).

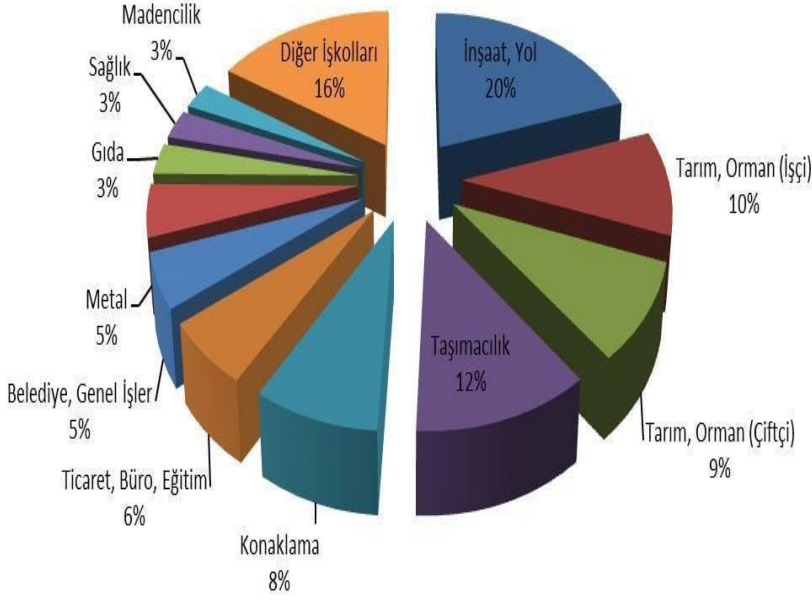
¹ İş Sağlığı ve Güvenliği Yüksek Lisans Öğrencisi, Ankara, Türkiye, ORCID:0009-0009-0674-4653, t.b.u.g.r.a2012@@gmail.com

² Dr., İş Sağlığı ve Güvenliği, Ankara, Türkiye, ORCID:0000-0002-2323-7655, aslieceacar@gmail.com

³ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, ORCID:0000-0002-8687-7238, doztas@aybu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, ORCID:0000-0002-5667-0391, eraslan@aybu.edu.tr

2023 / İş Cinayetlerinin İşkollarına Göre Dağılımı



Şekil 1: 2023 İş cinayetlerinin iş kollarına göre dağılımı
(Kaynak: İSİG Meclisi)

Temel Yaşam hakları içinde bulunan çalışma hakkının canlı bir şekilde faydalanılmak istenmesi ve dünya geneli ve ülkemiz yöneticilerin işyerinde şiddet ve taciz değişik kapsamlarda üstünde durması gereken oldukça geniş kapsamlı konudur. Bu doğrultuda; eşitlik ilkesi ve ayrımcılık yasağı, iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması, adil ve huzurlu bir çalışma ortamının oluşturulması, işçinin fiziksel ve ruhsal bütünlüğünün korunması, çalışma barışının temin edilmesi ile farklı meslek grupları ve çalışma biçimlerine göre değişkenlik gösterebilen risk unsurlarının dikkate alınması, işyerinde şiddet ve tacizin önlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken başlıca faktörler arasındadır (Demirkaya Seher 2021).

ABD Ulusal Suç Mağduriyeti Araştırması (NCVS) verilerine göre, 1993–1999 yılları arasında, 12 yaş ve üzeri bireylerin iş yerinde veya görev başında maruz kaldığı şiddet olaylarının yıllık ortalaması 1,7 milyon olarak tespit edilmiştir. Ölümcül olmayan şiddet vakalarına ek olarak, her yıl yaklaşık 900 işle bağlantılı cinayet meydana gelmiştir. Bu yedi yıllık dönemde işyeri şiddeti, toplam şiddet suçlarının yaklaşık %18’ini oluşturmuştur. Avrupa’da 2005 yılında

yapılan bir çalışmada ise, iş yerinde fiziksel şiddetle karşılaşan çalışan oranları; Hollanda'da %10, Fransa ve Birleşik Krallık'ta %9, İrlanda'da ise %8 olarak raporlanmıştır. Aynı araştırmaya göre iş yerinde cinsel tacize maruz kalma oranı, Çek Cumhuriyeti ve Avrupa genelinde %10, Norveç'te %7, Türkiye ve Hırvatistan'da %6, Danimarka, İsveç, Litvanya ve İngiltere'de ise %5 düzeyindedir (Seyran Fatih 2021)

Özellikle çalışma hayatı içerisindeki kadınlar cinsiyet kalıpları nedeniyle çeşitli sıkıntılar ile karşılaşabilmektedir. Sosyal Güvencesi olmayan işlerde kayıt dışı olarak çalışan kadın çalışanlar şiddete daha fazla maruz kaldıkları gözlenmektedir.

Bu çalışmanın amacı iş yerlerinde şiddet ve taciz ile ilgili oranlar ve hangi meslek gruplarının daha fazla şiddete uğradığı bu durumla nasıl mücadele edilmesi gerektiğine dair uygulamaları, yasal haklar ile ilgili bilgiler sunulmaktadır.

İŞ YERİNDE ŞİDDET VE TACİZ

Şiddet üzerinde genel bir tanım olmamakla birlikte çalışma ortamlarında görülen ve zarar verme amacı taşıyan saldırgan davranışlardır. İş yerlerinde ölçülebilir olmasından dolayı fiziksel şiddet temel alınmaktadır. Fakat çalışma ortamında meydana gelen her türlü tehditkâr davranışlar veya onur kırıcı sözlerde şiddet kavramını oluşturmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) şiddeti “Kişinin kendisine, başka bir kişiye veya bir grup veya topluluğa karşı, yaralama, ölüm, psikolojik zarar, gelişme geriliği veya yoksunlukla sonuçlanan veya sonuçlanma olasılığı yüksek olan, tehdit altında veya fiili olarak kasıtlı şekilde fiziksel güç veya güç kullanımı’ olarak belirtilmiştir WHO,1996).”

İşyerinde şiddeti tanımlamada yıldırma (mobbing), zorbalık, taciz, duygusal istismar, kötü davranma, psikolojik terör, cinsel saldırı, işyeri travması gibi pek çok farklı kavramı kullanılmaktadır. Çalışma hayatındaki güç unsurları da şiddetin ortaya çıkmasında ve artmasında başlıca sebeplerindendir. Bu durumda yetki makam ve bulunan ortamın güç unsurları tarafının lehine olduğundan dolayı yetkinin kötüye kullanımı ve zorbalık şiddetin kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Çalışma yaşamında şiddet ve taciz dikey ve yatay ilişkilerde görülebilmektedir. Üçüncü kişilerde şiddet ve tacizin tarafı olarak ortaya çıkmaktadır. Şiddet ve taciz iş yeri ortamında değil aile ortamında 'da gerçekleşmektedir. Çalışma yaşamında şiddet ve taciz yalnızca alışılan/bilinen durumlara yönelinmesi bir çok sorununda gözden kaçmasına neden olduğu gözlenmiştir.

Mobbing kavramı, 1980’li yılların sonlarına doğru Alman iş psikoloğu Heinz Leymann tarafından literatüre kazandırılmıştır. Leymann, bu olguyu; bir veya birkaç çalışanın, çoğunlukla birden fazla kişi tarafından uzun süreli ve sistematik

biçimde psikolojik baskı, dışlama veya duygusal zarar verici davranışlara maruz bırakılması şeklinde tanımlamıştır. Bu tür davranışlar genellikle günlük olarak tekrar eder ve birkaç ay boyunca devam eder (Leymann,1996:167-168).



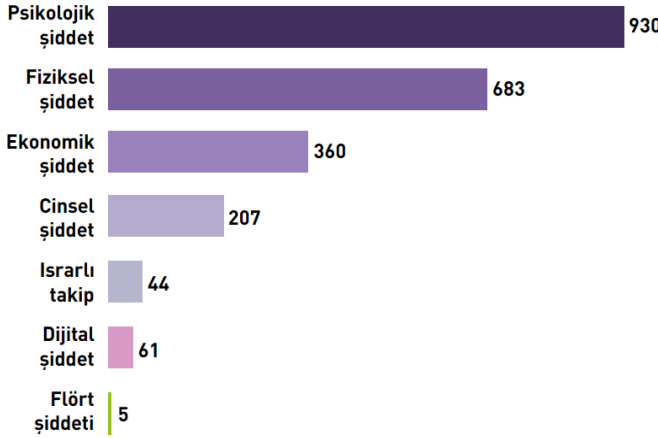
Şekil 2: Silahlı Şiddet Raporu (Kaynak: Umut Vakfı)

Özyeğin Üniversitesi ve Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) ile Mayıs-Temmuz 2024 tarihleri arasında 3 bin 7 kişinin katılımı ile gerçekleştirilen “İş Yerinde Şiddet ve Taciz Algıları ve Deneyimler” araştırmasının sonucu göre, Türkiye’deki çalışanların yüzde 75’inden fazlası çalışma hayatları içerisinde en az bir kez iş yerinde şiddete maruz kalmaktadır. Yine bu araştırmanın sonucuna göre psikolojik şiddet çalışanlarının yarısından fazlasının maruz kaldığını göstermektedir. Kadın çalışanlar arasında en çok cinsel şiddete maruz kaldığı görülmekte iken erkek çalışanlar ise sıklıkla fiziksel şiddet uygulandığı belirtilmektedir. Yine bu araştırmanın sonucuna göre kadın çalışanlar giyim ve dış görünümüne erkekler ise köken ve inancına göre ayrımcılığa uğradıkları görülmektedir. Ankete katılanları büyük bir kısmı ise iş yerinde şiddet ile ilgili yeterli farkındalık ve bilgilendirmenin yapılmadığını göstermektedir. Bu anket sonucu bizlere iş yerinde şiddet ve taciz konusunda caydırıcı önlemlerin olmamasını ve çalışanların bu konuda bilgilerinin bulunmadığını göstermektedir. Bilhassa ülkemizde kadınlar iş yerinde veya sosyal hayatlarında uğradıkları

fiziksel veya psikolojik şiddeti dile getirememektedir. Bu durumun temel etkeni toplumun bakış açısı, toplum baskısı ve adalet sisteminin yeterince kendilerine karşı koruyucu kurallar uygulanmaması ve cezaların caydırıcı nitelikte olmadığına düşünülmesidir.

Şiddet Biçimleri:

2021 yılında ilk defa başvuranlardan maruz kaldığı şiddet biçimini bildiğimiz kadın sayısı: 1066



Şekil 3: 2021 Yılında Kadın çalışanların maruz kaldığı şiddet biçimi (Kaynak: Mor Çatı Kadın Sığınma Vakfı)

İş yerlerinde çalışanların birbirleri ile iletişim ve davranışlarında saygı kurallarına uygun davranmamaları psikolojik şiddetin en yaygın olduğu durumlardır. İşyerinde cinsel taciz, sınır ve kapsamı tam olarak bulunmasa da daha kanıtlanabilir bir kavram olarak görülmektedir ve Çoğu zaman soruşturma ve yargılamalara konu olabilmektedir.

İş yerinde şiddet uygulanan kişilerde en fazla endişe, sinirlilik hali, korku ve hayal kırıklığı gözlenmektedir. Korku durumu çalışanların ileride yaşayacakları şiddet durumu düşüncesi nedeniyle olumsuz etkilenmektedirler. “İşyerinde psikolojik şiddete maruz kalma riski bazı sektörler ve meslek gruplarında daha yüksektir. En çok görüldüğü yerler ise; kâr amacı gütmeyen örgütler, sağlık sektörü ve yükseköğrenim kurumlarıdır”. Bu konuda ülkemizde özellikle sağlık çalışanları açısından şiddet ön plana çıkmaktadır. Sağlık çalışanlarına yönelik şiddetin neden olduğu sonuçları yedi kategoride sınıflandırmışlardır: fiziksel, psikolojik, duygusal, işin işleyişi, hastalarla ilişki/bakım kalitesi, sosyal/genel

etki ve mali sonuçlar. Bunlardan psikolojik (örneğin, travma sonrası stres, depresyon) sonuçlar, olumsuz duygusal (örneğin, öfke, korku) sonuçlar ve işin işleyişi (örneğin, hastalık izni, iş tatmini) üzerindeki etkisi, işyerinde şiddetin en sık görülen etkileridir (Lanctôt ve Guay (2014)

Son yıllarda eğitim kurumlarında öğretmenlere ve akademik personele yönelik saldırgan tutumların artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Toplumların gelişiminde kritik rol oynayan eğitimciler, hem bireylerin hem de ulusların geleceği açısından en değerli meslek gruplarından biri olarak kabul edilmektedir. Ancak bazı bireyler, kamu kurumlarından bekledikleri hizmeti alamadıklarını düşündüklerinde, yaşadıkları memnuniyetsizliği şiddet yoluyla ifade etmeye yönelebilmekte ve bu durumu uğradıkları haksızlığı telafi etmenin bir aracı olarak görebilmektedir (Debarbieux, 2003). Öğrencilerden eğitimcilere karşı şiddet eğilimini son dönemlerde arttığı ve yaralanma ve ölüm olaylarının olduğu görülmektedir. Öğretmenlere uygulanan şiddette kişinin sosyal durumu incelendiğinde eğitim seviyesinin düşük olduğu aile içi bağlarında sıkıntı yaşayan kişilerin olduğu gözlenmiştir. Özel sektör çalışanlara ve kamu çalışanları mukayese edildiğinde ise kamu çalışanlarının daha fazla şiddet mağduru oldukları gözlenmiştir.

Teknolojinin hızla yayılması ile çalışanların mesai saatleri dışında da işveren/Yönetici tarafından ulaşılabilir olması yaygın hale gelmiştir. Özellikle eğitim sektöründe öğrenci ailelerinin de öğretmenlerin özel hayatlarına ayırması gereken vakitleri yok sayarak, iletişim kurmak isteyerek kendisinin çocuğu için ilgi beklemektedir. Bu Durum ise Özel ve iş yaşamı arasında karışıklığa ve strese neden olduğundan dolayı ‘Ulaşılmama hakkı’ ile ilgili çalışmalar başlatılmıştır. Bazı Avrupa Devletleri (Fransa, Belçika, İspanya, İtalya, Yunanistan ve Portekiz) Mesai sonrası aramayı kısıtlama getirmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesi Öğretim Görevlileri Prof. Dr. Esin Can, Dr. Ayşe Merve Urfa Yılmaz ve İstanbul Gelişim Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölüm Başkanı Dr. Öğr. Üyesi Nazlı Yüceol, çalışanların “ulaşılamama hakkına dair algılarını ölçmek için “Ulaşılamama Hakkı Algısı Ölçeği” geliştirdi. Çalışma sonucuna göre çalışanlar sürekli ulaşılabilir olmaktan memnun olmadıkları iş yerine olan bağlılıklarını zedelenildiği tükenmişlik sendromunun ortaya çıkardığı iş ve özel yaşam arasında saygı duymayan işlerde performans düşüklüğü görülmüştür.

Ulaşılmama hakkı uygulandığında ise performansın, üretme ve verimliliğin arttığı ispatlanmıştır. Ülkemizde ’de bu konu kapsamında atılacak adımlar motivasyonu artırarak aile içi sıkıntıları azalmasına ve başarıya etki edeceği görülmektedir.

SONUÇ

Şiddet ile mücadele yöntemlerinde özellikle mağdur olan kişinin arkadaşları ve ailesi ile olan ilişkilerinin devam ettirmesi önem taşımaktadır. Gerekli görülmesi halinde profesyonel yardım alınma konusunda destek sağlanmalıdır. Çaresizliği ön plana çıkarmak kişiler içine kapanmasını sağlamaktan başka bir çare sağlamayacaktır. İş yerlerinde Şiddetin her türlüşü sadece yapılan kişiyi değil aile ve toplumun genelinde etkilemektedir. Çalışma yaşamında şiddet ile ilgili olarak kapsamlı ve etkili politikalar geliştirmek, eğitim programları belli aralıklar ile çalışanları bilgilendirmek, etkili raporlama sistemleri oluşturmak, güvenlik önlemlerini çalışan haklarını ihlal etmeden oluşturmak, düzenli risk değerlendirmeleri ile personelin kimliğini gizli tutularak sorunları yerinde ve zamanında tespiti yapmak , iletişim kanalları ve sağlıklı bir çalışma ortamının devamı önleyici tedbirler uygulayarak kuruluşlar, işyerinde şiddet riskini önemli ölçüde azaltabilirler.

Uluslar arası çalışma örgütü (ILO)’nün günümüzde temel amaçlarından biriside çalışma hayatı boyunca çalışma şartlarını yükseltmek insan yaşam ve onuruna uygun fırsatları teşvik etmek, insanların sosyal konumunu güçlendirmek ve çalışma koşullarını daha iyi hale getirmeyi hedeflemektir.

ILO’nun zorla çalıştırma ve çocuk işçiliğine ilişkin sözleşme ve tavsiyeleri, iş yerinde şiddet ve taciz gibi olguları da dolaylı biçimde kapsayan bir içeriğe sahiptir. Özellikle 129 sayılı Zorla Çalıştırma Sözleşmesi incelendiğinde, şiddetin kimi durumlarda bireyleri çalışmaya zorlamak için bir araç olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Çocuk işçiliğiyle ilgili düzenlemelerde ise şiddet ve taciz açıkça belirtilmemiş olmakla birlikte, çocukların fiziksel ve zihinsel sağlığını korumaya yönelik hükümler ön plandadır. Bu da dolaylı olarak şiddetin ve sömürünün önlenmesini amaçlamaktadır (ILO, 2016a:)

İşçinin korunması iş hukukunda genellikle işverenin görevleri arasında yer alan gözetim borcu kapsamında yer almaktadır. İş veren çalışanın sağlığını ve üçüncü kişilerden koruması ile sorumludur. İşverenin işçiyi koruma görevi ülkemizde İş sağlığı ve güvenliği kanunu ile yasal hale getirilerek iş yerinde şiddeti azaltarak verimliliğinde artırılması hedeflemiştir.

“TBK m. 112’ye göre borcunu hiç veya gereği gibi yerine getirmeyen borçlu, kendisine hiçbir kusurun yüklenemeyeceğini ispat etmediği sürece, alacaklının bundan doğan zararını gidermekle yükümlüdür. İşçilerin işyerinde şiddet ve taciz karşısında korunmasını düzenleyen TBK m. 417’de bu durumlara maruz kalan işçilerin haklarına ilişkin bir hüküm bulunmamaktadır (Kaplan, 2011: 50).”

Şiddet ve tacize maruz kalan çalışanlar maddi ve manevi haklarını alabilmektedirler. Bunun yanında 4857 sayılı iş kanunda Madde 5’de yer alan Eşit İşlem Borcu ile “İşveren, çalışanlara eşit davranmak zorundadır” hükmü amirdir.

Çalışan kanunda yer alan bu madde ile şiddet ve tacize maruz kalma durumunda eşitlik ilkesine aykırılıktan davranmasından dolayı ayrıca bir dava konusu olabilmektedir.

KAYNAKÇA

- Çiçek, B., & Çoban, R. (2024). İşyeri nezaketsizliğinin çalışan sessizliğine etkisinde ruminasyonun aracı rolü. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 24(4), 1429–1452. <https://doi.org/10.18037/ausbd.1518793>
- Demirkaya, S. (2023). Çalışma hayatında şiddetin yeni görünümü: Dijital şiddet. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 10(100), 2629–2649. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10028911>
- Demirkaya, S., & Güler, C. (2021). Çalışma yaşamında işçinin kişilik haklarının korunması bağlamında ILO'nun 190 sayılı şiddet ve taciz sözleşmesinin değerlendirilmesi. *Çalışma ve Toplum*, 4(71), 2753–2796. <https://doi.org/10.54752/ct.1155487>
- Dursun, S., & Özdemir, E. (2024). Türkiye'de iş yerinde kadına yönelik şiddetin yaygınlığı ve etkisi: Kesitsel bir anket çalışması. *KADEM Kadın Araştırmaları Dergisi*, 10(1), 305–332. <https://doi.org/10.21798/kadem.2024.154>
- Gökçe, A. (2023). Çalışma hayatında şiddet: Kayıt dışı çalışan kadınlar üzerine bir araştırma. *The Journal of International Scientific Researches*, 8(1), 64–82. <https://doi.org/10.23834/isrjournal.1200236>
- Işıkay, Ç., & Taslak, S. (2021). İşyeri nezaketsizliği: Ulusal literatür üzerine bir içerik analizi. *OPUS International Journal of Society Researches*, 18(39), 521–552. <https://doi.org/10.26466/opus.839745>
- Kambur, B. (2025). Sağlık çalışanlarında şiddet görme korkusu ile tükenmişlikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Güncel Sağlık Yönetimi*, 3(1), 12–23.
- Kanık, L. (2023). Akademisyenler ve psikolojik yıldırma: Sistematik bir derleme araştırması. *IBAD Sosyal Bilimler Dergisi*, 11, 249–279.
- Umut Vakfı <https://umut.org.tr/umut-vakfi-turkiye-silahl-siddet-haritasi-2023/>
- Pala Dağoğlu, N. (2022). Sağlık çalışanlarının yaşadığı iş yeri şiddeti. *Sağlık ve Yaşam Bilimleri Dergisi*, 4(2), 252–259. <https://doi.org/10.33308/2687248X.202242255>
- Pekmezcan, Y. (2024). İşyerinde nezaketsizliğin nedenleri ve sonuçları açısından bir inceleme. *Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(48), 227–241. <https://doi.org/10.35343/kosbed.1591758>
- Seyran, F. (2021). İşyeri şiddeti çalışmalarının bibliyometrik analizi. *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 17(36), 2868–2889. <https://doi.org/10.26466/opus.885707>
- Taşdemir, D. (2025). İş sağlığı ve güvenliği bakış açısıyla “iş yerinde şiddet”. *Business & Management Studies: An International Journal*, 13(1), 442–455. <https://www.bmij.org/index.php/1/article/view/2457>

- Tiftik, C. (2021). Akademisyenler ve psikolojik yıldırma: Sistematik bir derleme araştırması. *IBAD Sosyal Bilimler Dergisi*, 11, 249–279.
- Uğan, Ç., & Akbolat, M. (2023). Şiddete maruz kalmanın iş performansına etkisinde şiddet görme korkusunun aracı rolü. *Örgütsel Davranış Çalışmaları Dergisi*, 3(1), 25–37. <https://obstudies.org/index.php/obs/article/view/21>
- Usluoğulları, F. H., & Yurtseven, N. T. (2023). İşyerinde hekimlere yönelik şiddetin değerlendirilmesi ve hekimler üzerindeki etkileri. *Adli Tıp Bülteni*, 28(2), 135–144. <https://adlitipbulteni.com/index.php/atb/article/view/1634>
- Yalçın, H. (2023). Sağlık çalışanlarına şiddet ve şiddet oranları. *Aydın Sağlık Dergisi*, 9(3), 117–130.
- Yener, Ş. (2023). Şiddet, şiddet türleri ve okulda öğretmene yönelen şiddet. *İçtimaiyat*, 7(1), 278–294. <https://doi.org/10.33709/ictimaiyat.1184117>
- İş sağlığı ve güvenliği meclisi <https://www.isigmeclisi.org/is-cinayetleri-raporlari>
- <https://morcati.org.tr/wp-content/uploads/2022/05/Mor-Cati-2021-Yili-Faaliyet-Raporu.pdf>

10. Bölüm

Elektromanyetik Kalkanlamada Yapı Malzemeleri Araştırmaları

Nazım Çağatay DEMİRAL¹, Muhammed MALKOÇ²

Özet

Bu kitap bölümü, yapı malzemelerinde elektromanyetik kalkanlamanın mühendislik, malzeme bilimi ve elektromanyetik teori perspektiflerinden bütüncül biçimde ele alındığı kapsamlı bir derleme niteliğindedir. Metin, hem frekans temelli (0.3–1.5 GHz, 8.2–12.4 GHz, <1 GHz HEMP) mühendislik pencerelerini hem de malzeme–mimari ilişkilerini sistematik biçimde tanımlamaktadır. Elektromanyetik girişimin (EMI) akıllı binalar, veri merkezleri ve kritik altyapılar üzerindeki etkileri, yapı malzemelerinde kalkanlama gereksinimini ön plana çıkarmaktadır. Bölüm, kalkanlama etkinliğinin (SE) fiziksel temelini oluşturan yansıma, soğurma ve çoklu yansıma bileşenlerinin yanı sıra, frekans, malzeme sabitleri, kalınlık, çok katmanlı mimariler ve donatı ızgarası gibi değişkenlerin SE üzerindeki etkilerini tartışmaktadır.

Literatür taraması, karbon fiber, grafen, metal tozu ve boş cam küre (HGM) gibi katkıların çimento matrisli sistemlerde iletkenlik ve dielektrik kayıpları artırarak kalkanlama performansını güçlendirdiğini göstermektedir. Özellikle karbon fiber takviyeli çimentolarda perkolasyon ağlarının oluşumu, 1 GHz civarında 65 dB’e, X-band frekanslarında ise 45 dB’e kadar SE değerleri sağlamaktadır. Metalik dolgu ve ferrit katkılar, düşük frekanslarda manyetik kayıpları artırarak HEMP gibi manyetik alan baskın senaryolarda etkili olmaktadır.

Sonuç olarak çalışma, elektromanyetik kalkanlamayı yalnızca bir malzeme seçimi değil, frekans, geometri, katmanlanma, nem-kür koşulları ve ölçüm belirsizlikleriyle birlikte ele alınması gereken bütünlük bir tasarım problemi olarak tanımlamaktadır. Bu yönüyle, yapı mühendisliğinde elektromanyetik güvenlik tasarımına rehberlik edebilecek özgün ve disiplinler arası bir referans sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik kalkanlama, Yapı malzemeleri, Karbon fiber takviyeli çimento, Kalkanlama etkinliği, Yüksek irtifa elektromanyetik darbe.

¹ Arş. Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. cagatay.demiral@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5927-7299

² Arş. Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü. muhammed.malkoc@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8346-2475

1. Giriş

Elektromanyetik girişim (EMI) kaynaklı sorunlar; akıllı binalar, veri merkezleri, hastaneler ve kritik altyapılarda çalışan elektronik sistemlerin güvenli işletimi için yapı malzemelerinde kalkanlama (SE) gereksinimini hızla artırmaktadır (Choi vd., 2025). Bu bağlamda, frekans penceresinin doğru seçimi kritik önem taşımaktadır; çünkü baskın kuplaj mekanizmaları ve yapı malzemelerinin (beton örtü, donatı ızgarası ve işlevsel dolgu bileşenleri) etkinliği frekansa keskin biçimde bağlılık göstermektedir (Hyun vd., 2014).

Bu bölüm ve izleyen temel ilkeler, iki yaygın mühendislik penceresini referans almaktadır:

(i) 0.3–1.5 GHz aralığı, koaksiyel fiktür (ASTM D4935 tipi) ile yapı malzemelerinin planarlı örneklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesinde endüstri standardı haline gelmektedir (Choi vd., 2025; Jang, Shin, Song ve Park, 2022).

(ii) 8.2–12.4 GHz (X-band) aralığı ise dalga kılavuzu ölçümleriyle özellikle radar ve algılama uygulamalarına dönük yüksek frekanslı zarfı hedeflemektedir (Choi vd., 2025; Chen vd., 2024).

Ayrıca, yüksek irtifa elektromanyetik darbe (HEMP) senaryolarında baskın spektral gücün 1 GHz'in altında bulunması nedeniyle, donatı geometrisi ve aralığı gibi düşük frekans davranışını belirleyen parametreler kritik hâle gelmektedir (Hyun vd., 2014). Buna paralel olarak, saha ölçümleri ve ölçekli deney düzenekleri için 600 MHz–1.5 GHz frekans aralığına odaklanan beton blok tabanlı sistem optimizasyonlarının da literatürde yer aldığı görülmektedir (Jang vd., 2022).

Yapı malzemelerinde iki ana kalkanlama bileşeni bulunmaktadır: (a) beton örtünün dielektrik kayıp ve kalınlık etkisi, yüksek frekanslarda artan soğurma davranışını belirlemektedir; (b) donatı ızgarası ise düşük frekanslarda açıklık ve periodisite ile tanımlanan ağ kesme (cut-off) davranışı sayesinde geçirimi baskılamaktadır (Hyun vd., 2014). Son yıllarda karbon esaslı dolguların (CF, CNT, grafen vb.) beton matrislere katılmasıyla perkolasyon ağlarının oluşturulmakta olduğu ve bu sayede 1 GHz civarında ve X-band frekanslarında SE değerlerinin yükseltilmekte olduğu deneysel olarak gösterilmektedir (Choi vd., 2025; Chen vd., 2024).

Bu kitap bölümünde, yukarıda belirtilen iki frekans penceresi (0.3–1.5 GHz ve 8.2–12.4 GHz) esas alınmakta; ayrıca HEMP için 1 GHz altı frekans alanındaki tasarım ilkeleri ayrı biçimde vurgulanmaktadır. Bu seçimin gerekçesi, literatürde yaygın olarak kullanılan ölçüm düzenekleri (koaksiyel fiktür, X-band dalga kılavuzu, beton blok tabanlı serbest-uzay benzeri yerleşimler) ile doğrudan

uyumluluk sağlaması ve tipik bina ile altyapı uygulamalarını kapsamaktadır (Choi vd., 2025; Jang vd., 2022; Hyun vd., 2014).

2. Elektromanyetik Kalkanlamanın Temel İlkeleri

Bu bölüm, yapı malzemelerinde elektromanyetik kalkanlamanın (SE) fiziksel temelini kurmakta ve izleyen alt başlıklarda ele alınacak tasarım ile ölçüm tartışmalarına kavramsal bir çerçeve sağlamaktadır. Öncelikle toplam SE'nin bileşenleri (yansıma, soğurma, iç çoklu yansıma) tanımlanmakta ve bu bileşenlerin frekansla birlikte malzeme sabitlerine (σ , ϵ'/ϵ'' , μ'/μ'') ve mimari parametrelere (kalınlık, çok katman, donatı ızgarası) nasıl duyarlı oldukları özetlenmektedir. Ardından yakın–uzak alan ayrımı HEMP bağlamında ele alınmakta ve 1 GHz altındaki frekanslarda donatı mimarisinin, daha yüksek frekanslarda ise beton örtünün dielektrik kayıplarının belirleyici rol oynadığı vurgulanmaktadır. Devamında perkolasyon temelli iletken ağlar ve olası manyetik kayıplar üzerinden malzeme yönetişi ile kalınlık, çok katman ve ağ açıklığı gibi ölçek etkileri tartışılmaktadır. Bölüm, koaksiyel, dalga kılavuzu ve serbest-uzay ölçüm yaklaşımlarının kıyaslanabilirliğini kısaca çerçevelemekte ve uygulamaya dönük “yansıma–soğurma” dengesine geçiş yapmaktadır; son iki alt başlıkta ise standart uyumu ve belirsizlik raporlaması kısaca normatif bir yol haritasına bağlanmaktadır.

2.1. Kalkanlama Tanımı ve Bileşenleri

Planar malzemeler için kalkanlama etkinliği (SE), tipik olarak gelen ve geçen alanın (veya gücün) logaritmik oranı olarak tanımlanmaktadır; toplam SE, yansıma (SER), soğurma (SEA) ve çoklu yansıma/dağılıma (SEM) katkılarının toplamı olarak ifade edilmektedir (Jang vd., 2025). Bu ayrışım, hem malzeme sabitleri (σ , ϵ'/ϵ'' , μ'/μ'') hem de mimari parametreler (kalınlık, çok katman, ızgara açıklığı) ile frekansa bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Hyun vd., 2014). Yansıma, yüksek yüzey iletkenliği ve dalga ile arayüz arasındaki empedans uyumsuzluğunun artmasıyla güçlenmekte; soğurma ise iletken ve/veya manyetik kayıpların artması, skin derinliğinin azalması ve yol uzunluğunun büyümesiyle artış göstermektedir (Jang vd., 2025). Özellikle beton içerisinde karbon lifi kümelenmesi ve perkolasyon ağlarının oluşumu, iletkenliği ve dielektrik kaybı eşzamanlı olarak artırarak SEA değerini yükseltmektedir (Choi vd., 2025).

2.2. Yakın-Alan/Uzak-Alan ve HEMP Bağlamı

Uzayda kaynak-hedef mesafesi ve frekans, yakın-alan (H-alan ağırlıklı, düşük frekans) ile uzak-alan (düzlem dalga, yüksek frekans) rejimlerini belirlemektedir. Yüksek irtifa elektromanyetik darbe (HEMP) için güç spektrumu çoğunlukla 1 GHz'in altında bulunduğundan, düşük frekanslı H-alan bileşenlerinin bastırılması öncelikli hâle gelmektedir. Bu durumda donatı ızgarasının geometrisi (çap t , aralık w) ve katman sayısı, geçirimi belirleyici ölçüt olarak öne çıkmaktadır (Hyun vd., 2014). Çift katmanlı donatı kurguları, düşük frekanslarda tek katmanlı sistemlere kıyasla yaklaşık 40 dB (geometriye bağlı olarak) ek zayıflatım sağlayabilmektedir; ancak ızgaralar arası rezonansın $\lambda_g/2$ civarında iletim tepe noktası oluşturabileceği dikkate alınarak geometrinin özenle seçilmesi gerekmektedir (Hyun vd., 2014). Daha yüksek frekanslarda ise beton örtünün dielektrik kayıp katkısı baskın hâle gelmekte; nemin artması ve kalınlığın büyümesiyle birlikte zayıflatım düzeyi yükselmektedir (Hyun vd., 2014).

2.3. Malzeme Yönetişi: Elektriksel ve Manyetik Kayıplar

Elektriksel kayıplar (σ ve ϵ''), perkolasyon ve iletken ağ oluşumları aracılığıyla artırılmaktadır. Karbon liflerinin çift uzunluklu ve kümelenmiş ağlar hâlinde düzenlenmesi, yaklaşık 1 GHz civarında kalkanlama etkinliğini (SE) 65 dB seviyelerine kadar yükseltebilmekte; aynı ağ mimarisi X-band frekans aralığında ise yaklaşık 44–45 dB toplam SE sağlamaktadır (Choi vd., 2025). Karbon fiber ile grafen@Ag gibi hibrit iletken ve dipolar dolgu stratejilerinin kullanımı, X-band bölgesindeki soğurma bileşenini kuvvetlendirmektedir (Chen vd., 2024). Manyetik kayıplar (μ'') düşük ve orta GHz aralığında katkı sağlayabilmekte; HEMP'in düşük frekanslı H-alanı dikkate alındığında, manyetik kayıplar ile iletken ızgara birlikteliği rasyonel bir yaklaşım oluşturmaktadır (Hyun vd., 2014).

2.4. Mimari/Ölçek Etkileri: Kalınlık, Çok Katman ve Ağ Açıklığı

Kalınlık artışı SEA'yı yükseltirken, katmanlı sistemlerde arayüz yansımaları SEM katkısını değiştirebilir. Donatı ızgarası periyodik bir yapı gibi davranır; t/w arttıkça (kalın çubuk / sık aralık) kesme frekansı yükselir ve geçirgenlik düşer (Hyun vd., 2014). Çok katmanlı ızgarada zoffset (katmanlar arası uzaklık) ayarı, $\lambda_0/2$ çevresinde rezonans/karşı-rezonans oluşturabilir (Hyun vd., 2014).

2.5. Ölçüm Yaklaşımı ve Kıyaslanabilirlik: Koaksiyel, Dalga Kılavuzu, Serbest-Uzay

Planar malzemelerin karşılaştırmalı değerlendirmesinde koaksiyel fiktür temelli 30 MHz–1.5 GHz bandı, ÇEK gibi rijit numuneler için en pratik ve yaygın yöntemdir; bunun üstünde, numune/cihaz boyutları küçültülerek 18 GHz’e dek uzanan türevler geliştirilmiştir (Amaro vd., 2023). X-band (8.2–12.4 GHz) dalga kılavuzu yöntemi, radar ve algılama bantlarıyla hizalı olup, 4 mm kalınlıkta bile ÇEK’lerde dolgu türü/kür koşulunun etkisini çözebilmektedir (Yasir vd., 2020). Serbest-uzay/dereceli anekoik düzenekler ise 500 MHz–26 GHz aralığında panel ölçülerini ve kenar saçılmalarını da hesaba katarak yalın ve tekrarlanabilir kurulumlar sunabilir (Cardillo vd., 2024).

Ölçümlerin kıyaslanabilirliği için: örnek kalınlığı, kür/nem geçmişi, dolgu oranı/dağılımı ve numune boyut toleransları (± 0.5 mm’nin X-band’da $\approx \pm 1$ dB oynamaya yol açabildiği gösterildi) birlikte rapor edilmelidir (Yasir vd., 2020). Ayrıca, yakın-alan kaynaklarıyla (ör. HPM darbe) yapılan testlerin, standart uzak-alan S-parametrelerinin ötesinde özel düzenekler gerektirdiği; bu amaçla beton blok/oda-benzeri ölçeklemelerin ve EMP-odaklı deney protokollerinin devreye alındığı literatürde vurgulanmaktadır (Majcher vd., 2021; Min & Cho, 2022).

2.6. Malzeme-Mimari Eşleştirme: “Yansıma-Soğurma” Dengesi ve Uygulama Kısıtları

EMC hedefli iç mekânlarda (sunucu odaları, hastane görüntüleme odaları vb.) soğurma ağırlıklı kalkanlar oda içi çoklu yansımayı baskımlarken, EMP/HEMP için dış zarf yansıma + ağ kesme davranışına dayanan katmanlı/çok katmanlı ızgaralarla desteklenmelidir (Majcher vd., 2021). ÇEK’lerde karbon temelli dolgu-ağlar, yapısal performans ve maliyetle birlikte optimize edildiğinde 1 GHz civarında anlamlı SEA artışı sağlar; X-band’da dalga kılavuz sonuçlarıyla hızla taranabilmeleri mühendislik seçimlerini kolaylaştırır (Yasir vd., 2020; Zecchi vd., 2024).

2.7. Standartlar ve Uyum Yol Haritası (ASTM–IEEE–IEC)

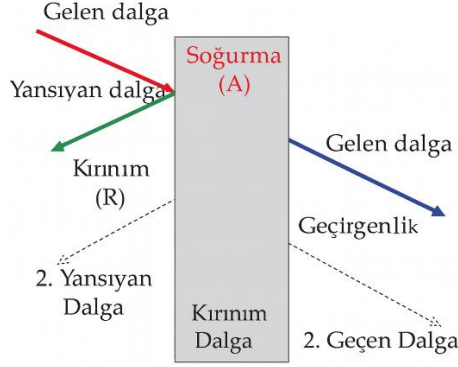
Planar malzeme testleri için ASTM D4935; hacim/oda ve mahfaza bütünlüğü için IEEE 299 temel referanslardır. IEMI/HEMP senaryolarında ise malzeme düzeyi ölçümlerin, panel/oda düzeyi sınamaya aktarılabilmesi için örnek hazırlama (kalınlık, kür/nem, tolerans), kalibrasyon ve raporlama şablonlarının tutarlı yürütülmesi gerekir. Bu kapsamda “malzeme → panel → oda” ölçek zinciri açıkça belirtilmeli; her ölçekte kullanılan düzenek, frekans penceresi ve hedef metrik (SER/SEA/SEM) net olarak yazılmalıdır.

2.8. Ölçüm Belirsizliği ve Kıyaslanabilirlik

Koaksiyel, dalga kılavuzu ve serbest-uzay düzeneklerinde belirsizlik bütçesi tipik olarak kaynak kararlılığı, bağlaşım/uyum hataları, numune kalınlık ve hizalama toleransları ile S-parametre→SE dönüşümündeki nümerik duyarlılıklardan oluşur. Karşılaştırılabilirliği sağlamak için (i) her numune için kalınlık ve yoğunluk toleransı, (ii) kür/nem geçmişi, (iii) kalibrasyon türü ve referans malzeme bilgisi raporlanmalı; tekrar edilebilirlik en az üç ölçümle gösterilmelidir. İmkân varsa, X-band ve 0.3–1.5 GHz için ayrı belirsizlik tabloları verilmesi önerilir.

3. Yapı Malzemelerinde Kalkanlama Yaklaşımları

Elektromanyetik kalkanlama tartışmaları, “koruma etkinliği”nin (shielding effectiveness, SE) tanımı ve ölçüm yöntemleri üzerinden şekillenmektedir (Narayanan vd., 2023). Klasik yaklaşımda toplam SE, yansıma (SE_R), soğurma (SE_A) ve çoklu yansıma (SE_M) bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilmektedir (Narayanan vd., 2023; Lee vd., 2024). Bir elektromanyetik dalga bir malzemeye ulaştığında oluşabilecek 3 etki olan soğurma, yansıtma ve iletme durumları Şekil 1’de gösterilmiştir (Wanasinghe vd., 2020; Narayanan vd., 2023). Bu yaklaşım, yapı malzemesi esaslı kompozitlerde de kullanılmakta ve ölçümler ağ analizörlerinden elde edilen saçılma parametrelerine dayandırılmaktadır (Narayanan vd., 2023). Dolayısıyla, X-bandı gibi frekans aralıklarında serbest uzay veya koaksiyel/dalga kılavuzu temelli düzeneklerle S-parametreleri ölçülerek SE hesaplanmaktadır. Bu yöntemler, düzlemsel numuneler için ASTM D4935 prosedürüyle uyumlu biçimde uygulanmakta ve test donanımı–kalibrasyon adımları standartlaştırılmaktadır (Lee vd., 2024). Ayrıca, 1–9 GHz aralığında bazı yapı malzemeleri üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarında ölçüm belirsizliğinin; kaynak kararlılığı, alıcı doğruluğu ve iletim/alım hataları dikkate alınarak bütçelendiği ve toplam belirsizliğin ~0,35 dB mertebesinde raporlandığı gösterilmektedir (Pavlik vd., 2024).



Şekil 1 Elektromanyetik dalganın bir malzemeye ulaştığında oluşabilecek etkiler (Wanasinghe vd., 2020; Narayanan vd., 2023).

Çimento esaslı yapı malzemelerinde kalkanlama performansı, çoğunlukla matrisin elektriksel/dielektrik özelliklerini ayarlayan dolgu maddeleriyle artırılmaktadır. Erken dönem ve derleme nitelikli çalışmalar, karbon malzemeleri (grafit, karbon siyahı, karbon fiber), metal toz/lifleri ve ferrit katkılarının, iletkenlik ve geçirgenlik üzerinden SE'yi farklı mekanizmalarla yükselttiğini tartışmaktadır (Guan vd., 2006). Karbon fiber takviyeli çimento kompozitlerinde lif içeriği/kalınlık gibi parametrelerin belirleyici olduğu, küçük çaplı karbon liflerinin belirli bir içeriğin üzerinde SE artışını doygunluğa götürdüğü, buna karşılık numune kalınlığının artırılmasının kalkanlama etkinliğini anlamlı şekilde yükselttiği doğrudan rapor edilmektedir (Min ve Cho, 2022). Benzer biçimde, karışım tasarımında lif içeriğinin artırılmasıyla iletken ağırlık ve iletkenliğin/SE'nin yükseldiği; numune kalınlığının artmasının soğurma bileşenini güçlendirdiği bulguları geniş bir frekans bandında teyit edilmektedir. Bunun yanında, su/çimento oranının yükselmesinin gözeneklilik ve yoğunluk üzerindeki etkileri nedeniyle SE'yi olumsuz etkileyebildiği, optimum değerlere işaret eden bulguların bulunduğu bildirilmektedir (Narayanan vd., 2023).

Metal esaslı ve/veya manyetik katkıların kullanımı, iletken ve dielektrik kayıp mekanizmalarını bir arada devreye alabilmektedir. Bakır talaşı gibi endüstriyel atık katkılarının, kompleks dielektrik sabitin (ϵ' , ϵ'') yükselmesi ve serbest taşıyıcı kaynaklı etkileşimler yoluyla soğurma etkinliğini artırdığı; katkı içeriğiyle birlikte belirgin iletken ağırlık oluşumunun gözlemlendiği raporlanmıştır (Yang vd., 2024). Hafiflik ve ısıl kararlılığın da hedeflendiği durumlarda, boş cam küre (HGM) gibi boşluklu katkıların karbon fiber takviyeli çimento matrislerinde kullanılması, ısıl iletkenliği düşürmekte ve yoğunluğu azaltarak çoklu saçılma/soğurma ağırlıklı bir kalkanlama davranışını teşvik etmektedir. HGM

içeriğinin artışıyla elektriksel iletkenliğin azalabildiği; buna karşın ısı iletkenliğin ~%40 mertebesinde düştüğü ve kapalı gözenekliliğin %2,6'dan %18,2'ye çıktığı mikro-CT vb. analizlerle doğrulanmaktadır. Yüksek sıcaklık maruziyetinde, HGM katkılı numunelerin dayanım ve ısı iletkenlik bakımından daha iyi termal kararlılık sergilediği de açıkça rapor edilmektedir (Jang vd., 2025).

Yapı elemanı ölçeğinde, donatı kafeslerinin geometrisi ve güçlendirme oranı kalkanlama davranışını doğrudan etkilemektedir; bu konuya ilişkin çalışmalar, betonarme yapıların elektromanyetik darbelere (EMP) karşı kalkanlama etkinliğini donatı açıklığı ve ağ karakteristikleriyle ilişkilendirmektedir (Guan vd., 2006). Deneysel olarak, yüksek dayanım ve süneklik gösteren beton (HSDC) ile güçlendirilmiş duvar panellerinde, kalınlık ve güçlendirme oranı arttıkça SE'nin yükseldiği ve belirli oranlarda 20 dB üstü değerlere ulaşıldığı raporlanmaktadır (Lee vd., 2021).

Yapı malzemelerinde elektromanyetik kalkanlama performansı, iletken ağıın sürekliliğini ve morfolojisini yöneten karbon bazlı katkı stratejileri (lif içeriği/dağılımı, kalınlık), dielektrik ve ısı parametreleri optimize eden boşluklu katkılar ve eleman ölçeğinde donatı–kesit–güçlendirme kararlarının birlikte tasarlanmasıyla artırılmaktadır (Narayanan vd., 2023; Jang vd., 2025; Lee vd., 2021).

Jang vd. (2025), yüksek sıcaklıklarda EMI kalkanlama performansını artırmak amacıyla boş cam küre (HGM) katkılı karbon fiber takviyeli çimento esaslı kompozitler geliştirmiştir. EMI testleri serbest uzay ölçüm sistemi ve ağ analizörü kullanılarak 8.9–12.5 GHz (X-bandı) frekans aralığında yapılmıştır. Çalışmada artan HGM içeriğiyle elektriksel iletkenliğin azaldığı, ısı iletkenliğin ise yaklaşık 1.0 W/mK'den 0.6 W/mK'ye düşerek %40 oranında azaldığı belirtilmiştir. Mikro-CT analizleri, HGM katkısının gözenek yapısını hafiflettiğini, kapalı gözenek oranının %2.6'dan %18.2'ye yükseldiğini göstermiştir. 400 °C üzerindeki sıcaklıklarda HGM içeren numunelerde dayanım kaybının daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Araştırma, HGM'nin çimento kompozitlerinde ısı kararlılığı artırarak hafif ve soğurma odaklı EMI kalkanlama özellikleri kazandırabileceğini ortaya koymuştur.

4. Literatür Özeti ve Güncel Çalışmalar

Günümüzde yapıların dijitalleşmesi, sensör ve haberleşme altyapılarının yoğunlaşması ile birlikte elektromanyetik ortam giderek kalabalıklaşmakta; bu durum hem elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerini hem de yüksek güçlü bozucu etkiler karşısında zarf korumasını yapı ölçeğinde yeniden düşünmeyi zorunlu kılmaktadır. Elektromanyetik kalkanlama, özünde, bir malzeme ya da

yapı kesitinden geçen alanın yansıma, soğurma ve iç çoklu yansımalar yoluyla zayıflatılmasıdır; ancak bu basit tanımın ardında, frekans penceresi, kaynak–alıcı geometrisi (yakın/uzak alan), kesit kalınlığı ve katmanlanma, donatı/ağ açıklığı, malzeme içi iletken–manyetik kayıplar, nem-kür geçmişi ve yaşlanma gibi birbirine bağlı çok sayıda değişken bulunur. Çimento esaslı kompozitler, karbon temelli katkılar, metalik geri kazanım dolguları, yüksek sünek beton sistemleri ve çok katmanlı ızgara mimarileri bu zengin tasarım uzayının başlıca bileşenleridir; ne var ki sahada karşılaşılan sınırlayıcılar—mekanik dayanım, işlenebilirlik, dayanıklılık, ağırlık ve maliyet—laboratuvar performansının doğrudan uygulamaya aktarılmasını çoğu zaman güçleştirir. Bu nedenle literatürden aktarılabilecek sonuçlar, tekil kalkanlama değerlerinden ziyade, hangi malzeme–mimari tercihinin hangi frekans aralığında hangi mekanizma üzerinden etkili olduğuna ışık tutacak biçimde, ölçüm yaklaşımı ve örnek hazırlama koşullarıyla birlikte okunmalıdır. Aşağıdaki çalışmalar bu çerçevede, yapı malzemelerinde elektromanyetik kalkanlamanın pratik tasarımına yön verebilecek ilkeleri ve eğilimleri, karşılaştırılabilirlik sınırlarını gözeterek bir araya getirmektedir.

Narayanan vd. (2023), karbon fiber takviyeli çimento kompozitlerinin elektromanyetik kalkanlama etkinliğini (SE) tahmin etmek amacıyla deneysel verilerden yararlanan matematiksel modeller geliştirmiştir. Çalışmada su/çimento oranı, lif oranı, lif boy/en oranı ve frekans gibi değişkenler dikkate alınmıştır. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon ve ileri beslemeli yapay sinir ağı (BPNN) modelleri oluşturulmuş; BPNN modelinin test setinde $R^2 = 0.96$ doğruluk oranına ulaştığı bildirilmiştir. Araştırma, fiziksel deneylere gerek kalmadan tasarım parametrelerinden SE tahminine imkân sağlayarak mühendislik uygulamalarına katkı sunmaktadır. Ayrıca metalik dolgu yerine karbon bazlı katkıların korozyon direnci ve ağırlık avantajı nedeniyle bina uygulamaları için daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Min ve Cho (2022), elektromanyetik darbe (EMP) kalkanlama özelliğine sahip çimento hamurları geliştirmek amacıyla küçük çaplı karbon lifleri kullanmıştır. %5 karbon fiber içeren numunelerde hem basınç dayanımı hem de EMP kalkanlama performansının iyileştiği, ancak bu oranın üzerindeki ilavelerde iletken ağırlık bozulduğu rapor edilmiştir. Lif oranı sabit tutularak numune kalınlığının artırılmasının, kalkanlama etkinliğini güçlendirdiği belirlenmiştir. Lif içermeyen çimento numunelerinde kalınlık artışı kalkanlama etkisi yaratmazken, karbon fiberli numunelerde SE'nin kalınlığa bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma, optimum lif oranı ve kalınlık kombinasyonu ile metal levhalara alternatif, ekonomik bir çimento esaslı EMP kalkanlama malzemesi üretilebileceğini göstermiştir.

Guan vd. (2006), çimento esaslı elektromanyetik kalkanlama ve dalga soğurma malzemeleri üzerine yapılan çalışmaları derlemiştir. Yazarlar, kalkanlama etkinliğinin esas olarak malzemenin elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliğiyle ilişkili olduğunu vurgulamıştır. Çimento matrisinin doğal iletkenliği düşük olduğundan, karbon siyahı, grafit, karbon fiber veya metal tozu gibi iletken dolguların eklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Grafit tozu eklenmiş numunelerde 3 mm kalınlıkta 10–40 dB arası SE değerleri elde edildiği, metal liflerin ise yansıma ağırlıklı kalkanlama sağladığı ifade edilmiştir. Derleme, karbon bazlı katkıların hafiflik, maliyet ve kararlılık açısından yapı malzemelerinde metal dolgulara göre avantajlı olduğunu göstermektedir.

Lee vd. (2021), yüksek dayanım ve süneklik gösteren beton (HSDC) ile güçlendirilmiş duvarların elektromanyetik kalkanlama ve darbe dayanımını incelemiştir. Üç farklı HSDC kalınlığında üretilen duvar numunelerinde kalkanlama etkinliğinin kalınlıkla birlikte yaklaşık %35–65 oranında arttığı rapor edilmiştir. Tek ve çift katmanlı HSDC uygulamalarında, %40 ve %10 güçlendirme oranlarının 20 dB'in üzerinde SE sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, düşey darbe testleri sonucunda hasar alan bölgelerde kalkanlama performansının azaldığı, hasar oranı ile SE arasında ters orantı bulunduğu açıklanmıştır. Çalışma, yüksek sünek betonların yapı elemanlarına eklenmesinin hem mekanik koruma hem de EMI kalkanlama açısından etkin bir çözüm olabileceğini ortaya koymuştur.

Yang vd. (2024), endüstriyel bakır talaşını geri dönüştürerek çimento esaslı elektromanyetik kalkanlama malzemeleri üretmiştir. Bakır talaşı ilavesiyle elektriksel iletkenlik ve karmaşık dielektrik sabitinin arttığı, bunun da EMI kalkanlama etkinliğini güçlendirdiği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca negatif manyetik geçirgenlik fenomeni tartışılmış; talaş içeren matrislerde girdap akımlarının bu etkiye neden olabileceği ifade edilmiştir. Bakır talaşı aynı zamanda çimento matrisinin basınç ve eğilme dayanımını iyileştirmiştir. Araştırma, metal atıklarının geri kazanımıyla hem çevresel hem de fonksiyonel açıdan yararlı çimento kompozitlerinin üretilebileceğini göstermektedir.

Pavlik vd. (2024), beton, tuğla ve yalıtım panelleri gibi yaygın yapı malzemelerinin 1–9 GHz aralığındaki elektromanyetik dalgalara karşı kalkanlama, yansıma ve soğurma özelliklerini incelemiştir. Sonuçlara göre mineral yün, polistiren ve poliüretan gibi malzemeler düşük SE değerleri sergilemiştir. Buna karşılık, tuğla duvar ve özellikle beton, yüksek frekanslarda belirgin şekilde daha yüksek soğurma ve SE performansı göstermiştir. Betonun hem yoğunluğu hem de metal donatı içeriği nedeniyle en yüksek absorpsiyon değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Çalışma, yapı malzemesi seçiminde yansıtıcı ve soğurucu özelliklerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Ruscica vd. (2024), çevre dostu biochar ve geri dönüştürülmüş PVC tozunu çimento matrisine ekleyerek elektromanyetik kalkanlama özelliklerini incelemiştir. 4 mm kalınlığındaki numuneler C-bandında test edilmiştir. %10 biochar ve %6 PVC içeren karışımlar en yüksek SE değerini (yaklaşık 16 dB) sağlamıştır. Çalışmada biochar'ın gözenekli karbon yapısının iletkenliği artırdığı, PVC'nin ise karışımın bütünlüğünü koruduğu belirtilmiştir. Yazarlar, bu katkıların düşük maliyetli ve çevreci yapı malzemeleri için uygun olduğunu vurgulamıştır.

5. Kaynakça

- Jang, D., Jang, W., Bang, J., Park, J., Kim, M., & Yang, B. (2025). Absorption-dominant electromagnetic interference (EMI) shielding cement with hollow glass microsphere (HGM) exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 463, 140019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140019>
- Yang, Z., Yao, Y., & Zhuge, Y. (2024). Enhancing electromagnetic shielding performance of cement-based materials using industrial waste copper swarf. *Construction and Building Materials*, 426, 136162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136162>
- Narayanan, S., Zhang, Y., & Aslani, F. (2023). Prediction models of shielding effectiveness of carbon fibre reinforced cement-based composites against electromagnetic interference. *Sensors*, 23(4), 2084. <https://doi.org/10.3390/s23042084>
- Lee, J. H., Choi, J. S., Yuan, T. F., & Yoon, Y. S. (2021). Shielding effectiveness and impact resistance of concrete walls strengthened by high-strength high-ductility concrete. *Materials*, 14(24), 7773. <https://doi.org/10.3390/ma14247773>
- ASTM International. (2018). ASTM D4935–18: Standard test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials. ASTM International.
- IEEE Standards Association. (2020). IEEE Std 299–2020: Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures. IEEE.
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y., & Cheng, J. (2006). Cement-based electromagnetic shielding and absorbing building materials. *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 468–474. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.004>
- Lee, J., Kang, H., Shin, B. G., & Song, Y. J. (2024). Cement composites with carbon fiber for electromagnetic interference shielding applications. *Carbon*, 220, 118861. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.118861>
- Min, T.-B., & Cho, H.-K. (2022). Evaluation of electromagnetic pulse shielding performance of carbon fiber–mixed cement paste. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16, 27. <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00500-4>
- Ruscica, G., Peinetti, F., Natali Sora, I., & Savi, P. (2024). Analysis of electromagnetic shielding properties of cement-based composites with biochar and PVC as fillers. *C*, 10, 21. <https://doi.org/10.3390/c10010021>

- Pavlík, M., Bereš, M., & Beňa, L. (2024). The influence of various commonly used building materials on shielding effectiveness, reflection, and absorption of the electromagnetic wave. *Applied Sciences*, 14(6), 2521. <https://doi.org/10.3390/app14062521>
- Chen, K., Junmeng, J., Guo, Z., Lu, H., Zhao, Y., Xie, Y., & Liu, J. (2024). Graphene@Ag casting aggregate integrated into carbon fiber cement composites for electromagnetic wave absorption and shielding. *Cement and Concrete Composites*, 155, 105428.
- Choi, Y.-W., Hwang, U., Ho, J. W., Park, W., Hassan, T., Koo, C. M., Nam, J.-D., Song, Y. J., & Yoo, P. J. (2025). Enhanced electromagnetic interference shielding in cement composites utilizing carbon fiber clustered networks with dual different lengths. *Carbon*, 233, 119887. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119887>
- Górski, M., & Safuta, M. (2024). Functional carbon-based materials for structural health monitoring and protection of concrete structures. *Structural Concrete*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/suco.202400841>
- Hyun, S.-Y., Du, J.-K., Lee, H.-J., Lee, K.-W., Lee, J.-H., Jung, C., Kim, E.-J., Kim, W., & Yook, J.-G. (2014). Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(6), 1488–1495. <https://doi.org/10.1109/TEMCP.2014.2322911>
- Jang, H.-E., Shin, K.-S., Song, J.-K., & Park, J.-K. (2022). Method for optimization of a shielding effectiveness measurement system using shielding concrete blocks for IEMI. *IEEE Access*, 10, 40457–40468. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165994>
- Nguyen, L. (2019). Conductive concrete structures for EMP protection of critical infrastructure facilities. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 1(1), 26–33. <https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2019.2922877>
- Yasir, M., Di Santo, S., Simone, P., & Rydosz, A. (2020). Shielding properties of cement composites filled with commercial biochar. *Electronics*, 9(5), 819. <https://doi.org/10.3390/electronics9050819>
- Zecchi, S., Cristoforo, G., Bartoli, M., Tagliaferro, A., Torsello, D., Rosso, C., Boccaccio, M., & Acerra, F. (2024). A comprehensive review of electromagnetic interference shielding composite materials. *Micromachines*, 15(2), 187. <https://doi.org/10.3390/mi15020187>
- Amaro, A., Suárez, A., Torres, J., Martínez, P. A., Herraiz, R., Alcarria, A., Benedito, A., Ruiz, R., Gálvez, P., & Penadés, A. (2023). Shielding

- effectiveness measurement method for planar nanomaterial samples based on CNT materials up to 18 GHz. *Magnetochemistry*, 9(5), 114. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry9050114>
- Cardillo, E., Carcione, F. L., Ferro, L., Piperopoulos, E., Mastronardo, E., Scandurra, G., & Ciofi, C. (2024). Development of a simple setup to measure shielding effectiveness at microwave frequencies. *Sensors*, 24(12), 3741. <https://doi.org/10.3390/s24123741>
- Majcher, K., Musiał, M., Logoń, D., & Majcher, A. (2021). A systematic review of HPM energy absorbers for protecting buildings. *Energies*, 14(19), 6061. <https://doi.org/10.3390/en14196061>
- Wanasinghe, D., Aslani, F., Ma, G., & Habibi, D. (2020). Advancements in electromagnetic interference shielding cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 231, 117116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117116>

11. Bölüm

Ekstansometre Cihazlarının Ölçüm Belirsizliği Hesabının Astm E83 Standardına Göre İncelenmesi

Bülent AYDEMİR¹

ÖZET

Ekstansometre cihazlarının ASTM E83 standardına göre kalibrasyonunda elde edilen değerleri için ölçüm belirsizliğinin hesabı bu çalışmada ele alınmıştır. Ekstansometre cihazlarının kalibrasyonunu ya da doğrulamasını 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 E83 standardı esas alınmıştır. Standartta tarif edilen belirsizlik formülleri tek tek ele alınmış ve sayısal hesap örnekleri verilmiştir. Bu sayede kullanıcıların ölçüm belirsizliği hesabını kolay bir şekilde gerçekleştirme yönteminin tarif edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile kullanıcılara ASTM E83 standardına göre ölçüm belirsizliği hesabı sayısal örneklerle açıklanarak bu alanda çalışma yapacaklara rehber bir çalışma olması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ASTM E83, Ekstansometre, Ölçüm belirsizliği hesabı

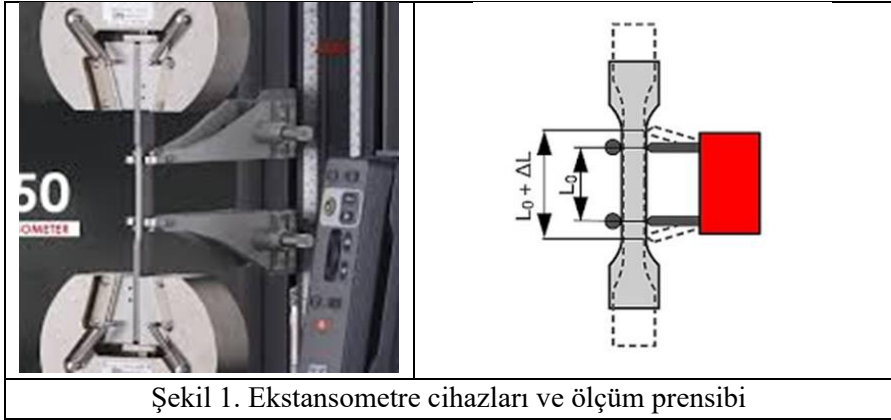
¹ Prof.Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., DÜBİT Laboratuvarı, Düzce, TÜRKİYE, bulentaydemir@duzce.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6848-2681

1. GİRİŞ

Ekstansometre test cihazları çekme testlerinde yaygın olarak kullanılan cihazlar olarak bilinirler. Mekanik test esnasında malzemeye uygulanan kuvvetin ölçülmesinin yanında malzemede meydana gelen şekil değişimini (uzama, birim şekil değişim, basma deformasyonu, eğme deformasyonu) ölçen cihazlar ekstansometre veya uzama ölçer olarak tanımlanırlar.

Ekstansometre cihazları deney esnasında malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan şekil değiştirme değerlerinin belirlenmesi için çekme, basma ve eğme testleri yaygın olarak kullanılır (Şekil 1). “Ekstansometre” teriminden yer değiştirme miktarını ölçen cihaz ve bu yer değiştirme miktarını gösteren ya da kaydeden sistem anlaşılmalıdır.

Malzeme test makinalarının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu ISO 7500-1 ve ASTM E4 standardına göre yapılabilir. Ekstansometre sistemlerinin kalibrasyonu ise ISO 9513 ve ASTM E83 standardına göre gerçekleştirilebilir.



Bu çalışmada, ASTM E83 standardına göre ekstansometre cihazlarının kalibrasyonu veya doğrulanması sonrası elde edilen verilerden ölçüm belirsizliği hesabı açıklanmıştır. Doğrulama gerçek ölçüm verileri kullanılarak ekstansometre cihazı ölçüm belirsizliği ASTM E83 standardının ek X4 bölümüne uygun olarak sayısal örnekle hesaplanmıştır

2. EKSTANSOMETRE KALİBRASYONU

Ekstansometre cihazlarının kalibrasyonu veya doğrulanması ASTM E83 standardında detaylı olarak açıklanmıştır. ISO 9513 standardı yapılan işlemi kalibrasyon olarak tanımlarken ASTM E83 standardı aynı işlemi doğrulama olarak ifade etmiştir. Bu bilgi dikkate alınarak diğer bölümlerde kalibrasyon işlemi doğrulama olarak ifade edilmiştir. Genel olarak kalibrasyon veya

doğrulama uygun bir referans cihaz kullanılarak minimum 5 ölçüm adımından oluşan 2 seri ölçüm alınması ile gerçekleştirilir. Doğrulama şartları, doğrulama adımlarının belirlenmesi, gerekli hesaplamalar, sınıflandırma bu çalışmada ele alınmamış olup, başka bir çalışmada detaylı olarak açıklanması hedeflenmiştir. Bu çalışmada ölçüm belirsizliği hesaplaması esas aldığı için kalibrasyon konusu detaylandırılmamıştır.

3. EKSTANSOMETRE KALİBRASYONUNDA BELİRSİZLİK HESABI

Belirsizlik; ölçülen büyüklüğün gerçek değer etrafında bulunabileceği aralığı tanımlayan tahmini değerdir. Malzeme test makinalarının ekstansometre cihazının doğrulama kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, ASTM E83 standardının Ek X4 kısmında verilmiştir. Bu bölümde standartta referans alınarak ölçüm belirsizliği hesabı detaylı olarak verilmiştir.

Doğrulama sürecinde ölçüm belirsizliğine birçok unsur katkıda bulunur. Aşağıdaki parametrelerin belirsizlik bütçesi hesaplamasına dahil edilmesi standardın X4 bölümünde belirtilmiştir.

Doğrulamayı gerçekleştiren kalibrasyon laboratuvarı ölçüm belirsizliği hesabını ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere aşağıdaki parametreleri kullanarak belirleyebilir.

1. Laboratuvar yer değiştirme standartlarının ölçüm belirsizliği,
2. Ölçü uzunluğu ölçüm sürecinin ölçüm belirsizliği,
3. Sıcaklık değişimleri gibi çevresel etkiler,
4. Yer değiştirme standardındaki sapma,
5. Yer değiştirme standardının doğrulanmasının ölçüm belirsizliği,
6. Ölçümlerdeki yer değiştirme standardının tekrarlanabilirliğidir.

Malzeme test makinası ekstansometre cihazının doğrulaması ASTM E83 standardına göre gerçekleştirilir ve doğrulama sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Belirsizliği belirleme yaklaşımı, sadece uzunluk ölçümlerinin genel ölçüm performansı ile ilgili belirsizlikleri ele almaktadır. Bu performans belirsizlikleri, tüm ayrı belirsizliklerin birleşik etkisini yansıtmaktadır.

Ekstansometre sistemi için belirlenen hatanın birleşik ölçüm belirsizliğini belirlemek için her bir bileşenin karesi alınarak, birbirine eklenerek ve ardından toplamın karekökü alınarak birleştirilebilir. Bu tanıma göre ekstansometre cihazının doğrulama ölçümünde bileşik belirsizlik aşağıdaki (1) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (1)$$

Genişletilmiş ölçüm belirsizliği daha sonra yaklaşık %95'lik bir güven düzeyi için birleştirilmiş belirsizliğin iki ile çarpılmasıyla belirlenebilir. Genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği (U_b) aşağıdaki (2) numaralı formül ile hesaplanır.

$$U_b = k \times u_b \quad (2)$$

u_i : ölçüm belirsizliği bileşeni,

u_b : cihazın toplam ölçüm belirsizliği bileşeni,

Yer değiştirme hatalarındaki belirsizlik, genişletilmiş belirsizliği aşağıdakine eşit bir duyarlılık katsayısıyla (a_{bl}) çarparak mm/mm veya inç/inç uzama birimleri cinsinden ifade edilebilir

$$a_{bl} = l / l_0 \quad (3)$$

l_0 : Ekstansometrenin ölçü boyu uzunluğu,

Hesaba dahil edilecek ölçüm belirsizliği parametrelerini tek tek aşağıda ele alınmıştır.

3.1 Ölçümlerdeki Tekrarlanabilirliği Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_r

Doğrulama işlemi sırasında tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizliği değerlendirmenin bir yolu, iki veri serisi arasındaki farkları (tekrarlanabilirlik hatalarını) değerlendirmektir.

Her yer değiştirme doğrulama noktası için, o doğrulama noktasının tekrarlanabilirlik (ilk seri ve ikinci seri değerleri arasındaki hata farkları) ve bu doğrulama noktasına en yakın dört doğrulama noktasının karelerinin toplamından bulunur. Doğrulama işlemi sırasında tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizliğin bir tahminini elde etmek için bu toplamı 10 a bölüp ve sonucun karekökü alınır. Toplamın 10 a bölünmesinin nedeni kullanılan 5 okuma çifti vardır ve her bir çiftin varyansı, farkın ikiye bölünmesine eşittir.

Ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliği ölçüm belirsizliği bileşeni (u_r) aşağıdaki (4) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_r = \sqrt{\frac{1}{10}(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2)} \quad (4)$$

b_i : her bir ölçüm noktasındaki tekrarlanabilirlik hatası (mm)

3.2 Ekstansometre Cihazının Gösterge Çözünürlüğü Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{res}

Test makinesinin yer değiştirme ölçüm sistemleri veya cihazlarının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik genellikle tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizlik parametresi içinde yer alır, ancak, çözünürlüğün etkilerini görmek gereklidir. Her yer değiştirmede, tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizliğin, test makinesinin yer değiştirme ölçüm sistemleri veya cihazlarının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlikten daha büyük olduğunu görmek için test edilmesi gereklidir. Belirli bir doğrulama yer değiştirmesinde, tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizlik, test makinesinin yer değiştirme ölçüm sistemleri veya cihazlarının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlikten büyük veya nominal olarak eşit ise, bu doğrulama da tekrarlanabilirlik bileşeni çözünürlük için belirsizlik bileşenlerini içerdiği kabul edilir.

Yer değiştirme veya uzama göstergesinin sıfırdaki ile ölçüm adımlarındaki çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşeni, yer değiştirme veya uzama göstergesinin sıfırdaki ile ölçüm adımlarındaki çözünürlüğünün karekök üçün iki katına bölünmesiyle belirlenebilir.

Doğrulaması yapılan malzeme test makinası ekstansometre cihazı gösterge çözünürlüğü ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (5) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{r\ x,z} = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (5)$$

r : Malzeme test makinası ekstansometre cihazı gösterge çözünürlüğü (mm)

Toplam çözünürlük belirsizliği bileşeni ise sıfırdaki ile ölçüm adımlarındaki çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşenlerinin karelerinin toplamalarının kareköküne eşittir. Aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_r = \sqrt{u_{r\ z}^2 + u_{r\ x}^2} \quad (6)$$

3.3 Ölçü boyu hatası ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{el}

Normal koşullar altında, bir ekstansometre sisteminin ölçü boyu veya uzunluğunda rapor edilen hataların ölçüm belirsizliği, doğrulamayı

gerçekleştiren kalibrasyon laboratuvarının ölçüm belirsizliğinden ve gösterge uzunluğu hatasının belirlendiği ortamdan kaynaklanır.

Doğrulamayı gerçekleştiren kalibrasyon laboratuvarı ölçüm belirsizliği hesabını ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere aşağıdaki parametreleri kullanarak belirleyebilir.

1. Ölçü boyu, uzunluğu ölçüm sürecinin ölçüm belirsizliği,
2. Sıcaklık değişimleri gibi çevresel etkiler,
3. Ölçü boyu, uzunluğu standardındaki sapma,
4. Ölçü boyu, uzunluğu standardının doğrulanmasının ölçüm belirsizliği,
5. Ölçü boyu, uzunluğu standardının tekrarlanabilirliğidir.

Ölçü boyu, uzunluğundaki genişletilmiş belirsizliği aşağıdakine eşit bir duyarlılık katsayısıyla çarpılarak bir uzama seviyesinde mm/mm veya inç/inç uzama veya gerinim birimleri cinsinden ifade edilebilir:

$$a_{gl} = \delta / l_0^2 \quad (7)$$

a_{gl} = ölçü boyu belirsizliklerini uzama belirsizliklerine dönüştürmek için hassasiyet katsayısı

δ = gerinim birimleri cinsinden belirsizliğin mm veya inç olarak değerlendirileceği ölçü boyundaki veya sapmadaki değişiklik

l_0 = ekstansometrenin mm veya inç cinsinden nominal gösterge uzunluğu

Hem sapma hatalarının belirsizliği hem de ölçü uzunluğu hatalarındaki belirsizlik, belirli bir gerinim seviyesindeki gerinim birimleri cinsinden belirlenirse, kareler toplamının karekökü kullanılarak birleştirilebilirler. Bununla birlikte, bunun avantajları ve dezavantajları vardır. Bunların birleştirilmesi, ekstansometre sisteminin belirsizliğini daha fazla değerlendirmek için gereklidir, ancak sapma hataları ve ölçü uzunluğu hataları doğrulama raporunda ayrı ayrı rapor edildiğinden, bunları bir doğrulama raporunda ayrı tutmak en iyisi olabilir.

Standartta bu konu ile ilgili bir örnek verilmiştir. Örnekte 50 mm ölçü uzunluğuna sahip bir ekstansometre sisteminin doğrulanması sırasında belirlenen hataların ölçüm belirsizliği, 10 mm'lik bir sapmada (0,20 mm/mm uzama) belirlenecektir. Kalibrasyon laboratuvarının 2 kapsama faktörü kullanılarak genişletilen ölçüm belirsizliği, uygulanan yer değiştirmenin % 0,3'üdür. 10 mm'de ekstansometre sistem çözünürlüğü 0,0001 mm'dir. Benzer şekilde 0 mm'de ekstansometre sistem çözünürlüğü 0,0001 mm'dir. Kalibrasyon laboratuvarının gösterge uzunluğunu belirlemek için ölçüm belirsizliği, 2

kapsama faktörü kullanılarak 0,1 mm'dir. Kalibrasyon laboratuvarının ölçüm belirsizliğinden kaynaklanan bileşen u_{CL} aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$u_{CL} = \frac{0,0030 \times 10}{2} = 0,0150 \text{ mm} \quad (8)$$

3.4 Doğrulamada Kullanılan Referans Cihazdan Kaynaklanan Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{std}

ASTM E83 standardının ek X4 bölümünde yukarıda verilen belirsizliklerin yalnızca doğrulama sırasında belirlenen hatalarla ilgili olduğuna ve bunun ekstansometrenin belirsizliği olmadığına dikkat etmek önemli olduğu standardın X4.8 maddesinde belirtilmektedir. Ekstansometrenin belirsizliğini belirlemek için, doğrulama sırasında belirlenen hatalar ve uzun süreli kararlılık çalışmaları gibi diğer faktörlerin dikkate alınarak hesaplanması gerektiği ifade edilmiştir. Bu sebepten diğer parametrelerin hesaplanması ISO 9513 standardının ek bölümünde tanımlanan parametrelerin hesabının kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Bu sebepten aşağıdaki hesaplamalar ISO 9513 standardı esas alınarak ifade edilmiştir.

Ekstansometre cihazlarının doğrulamasında kullanılan referans uzama cihazının oluşturduğu belirsizlik bileşenleri (u_{std}) aşağıdaki (9) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_A^2 + u_B^2} \quad (9)$$

Bu parametrelerin hesabı aşağıda deayları ile açıklanmıştır.

Doğrulamada kullanılan referans cihazının sertifika ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{cal}

Ekstansometre doğrulamasında kullanılan referans cihazının bağıl belirsizlik bileşeni (u_{cal}), cihazın kalibrasyon sertifikasında beyan edilen en büyük ölçüm belirsizliği değerinin yarısıdır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{cal} = \frac{u_{ref}}{2} \quad (10)$$

U_{ref} : Referans cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri (%)

Doğrulamada kullanılan referans cihazın sıcaklık değişimi ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_A

Ekstansometre doğrulamasının gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ile bu doğrulamada kullanılan referans cihazın kendi kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri arasındaki fark nedeniyle meydana gelen sıcaklık bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin ($u_A = u_{temp}$) hesabı aşağıdaki (11) numaralı formülün kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

$$u_A = 100x \frac{\alpha \times a_{temp}}{\sqrt{3}} = 100x \frac{\alpha \times (T_{cal} - T_{sert})}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

T_{sert} : Referans cihazın son kalibrasyon sertifikasında verilen sıcaklık değeri ($^{\circ}\text{C}$)

T_{cal} : Doğrulamanın gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

α : Referans cihazın üreticisi tarafından verilen ısı genleşme katsayısı ($\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Doğrulamada kullanılan referans cihazın kayma değişimi ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_B

Referans cihazın gösterge değerinin kayması kapsamında bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin ($u_B = u_{drift}$), hesabı için cihazın son kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_{r-son}) ile referans cihazının bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalama değeri ($X_{r-önceki}$) arasındaki bağlı farka dikdörtgen dağılım uygulanır. Bu belirsizlik bileşeni aşağıdaki (12) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_B = 100x \frac{a_{sensivity}}{\sqrt{3}} = 100x \frac{((X_{r-son} - X_{r-önceki})/X_{r-son})}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

X_{r-son} : Referans cihazın son kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalama değeri (mm)

$X_{r-önceki}$: Referans cihazın bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalama değeri (mm)

3.5 Bileşik Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, u_q :

Malzeme test makinası ekstansometre cihazı doğrulamasında etkin olan tüm bağlı ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değeri aşağıdaki (13) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_q = \sqrt{u_r^2 + u_b^2 + u_{CL}^2 + u_{std}^2} \quad (13)$$

3.6 Genişletilmiş Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, U:

Malzeme test makinası ekstansometre cihazının doğrulamasında, genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin hesabı, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın %95 güvenilirlik seviyesi için (k=2,0) değerinde alınması ve kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi çerçevesinde, hesaplanan bileşik ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı olarak aşağıdaki (14) numaralı formül ile hesaplanır.

$$U = k \times u_q \quad (14)$$

4. EKSTANSOMETRE CİHAZI KALİBRASYONA GÖRE ÖRNEK BELİRSİZLİK HESABI

Malzeme test makinası ekstansometre cihazının, ASTM E83 standardının X4 bölümünde verilen ve standarda uygun olarak gerçekteştirilen kalibrasyonu veya doğrulaması sonucunda elde edilen ölçüm verileri Tablo 1’de ve ilgili bilgilerde altında verilmiştir.

Tablo 1. Örnek ölçüm verileri

Ölçüm Adımı	Ölçülen Değer 1. seri l_i	Referans Değer 1. seri l_i	Ölçülen Değer 2. seri l_i	Referans Değer 2. seri l_i
mm	mm	mm	mm	mm
2,5	2,5003	2,5015	2,5003	2,5026
5,0	5,0004	5,0009	5,0004	5,0010
10,0	10,0006	10,0108	10,0006	9,9998
17,5	17,5008	17,4975	17,5006	17,4966
25,0	25,0009	25,0071	25,0009	25,0023

Tablo 2. Hesaplanan veriler tablosu

Ölçüm Adımı	Sapma Hatası 1. Seri q_1	Sapma Hatası 2. Seri q_2	Tekrarlanabilirlik Hatası	
mm	%	%	%	mm
2,5	-0,048	-0,092	0,044	0,0011
5,0	-0,010	-0,012	0,002	0,0001
10,0	-0,102	0,008	0,110	0,0110
17,5	0,019	0,023	0,004	0,0007
25,0	-0,025	-0,006	0,019	0,0048

Bu doğrulama ile ilgili olarak aşağıdaki veriler de verilmiştir.

Ekstansometre sisteminin ölçüm basamağındaki çözünürlüğü: $a_{rx} = 0,0001$ mm

Ekstansometre sisteminin sıfır değerindeki çözünürlüğü: $a_{rz} = 0,0001$ mm

Ekstansometrenin ölçü uzunluğunun nominal değeri $l_0 = 50$ mm

Verilen bu bilgilere göre Tablo 1’de yer alan 10 mm ölçüm basamağı için ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki değerler içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük ölçüm belirsizliği değeri, ekstansometre cihazının doğrulaması sonucu, elde edilen ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

10 mm ölçüm basamağındaki tekrarlanabilirlik hatası(b) değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$b_{10} = \text{mutlak } (q_1 - q_2) = \text{mutlak } (-0,102 - 0,008) = 0,110 \%$$

$$b_{10} = 0,110 \% \times 10 \text{ mm} / 100 = 0,0110 \text{ mm}$$

10 mm ölçüm basamağına en yakın 4 yer değiştirme basamağının tekrarlanabilirlik hataları sırasıyla 0,0011 mm, 0,0001 mm, 0,0007 mm ve 0,0048 mm olarak benzer formül ile hesaplanır.

10 mm ölçüm basamağındaki 2 artan ölçüm serisi için, tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_r) hesabı aşağıdaki gibidir.

$$u_r = \sqrt{\frac{1}{10} (0,0011^2 + 0,0001^2 + 0,0110^2 + 0,0007^2 + 0,0048^2)}$$

$$\mathbf{u_r = 0,0038 \text{ mm}}$$

Çözünürlük ölçüm belirsizliği bileşenini aşağıdaki gibi hesaplanır.

10 mm ölçüm değerinde ekstansometre cihazının çözünürlük ölçüm belirsizliği bileşeni (u_r) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{r10} = \frac{r_{10}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,0001}{2\sqrt{3}}$$

$$\mathbf{u_{r10} = 0,00003 \text{ mm}}$$

0 mm değerinde ekstansometre cihazının çözünürlük ölçüm belirsizliği bileşeni (u_r) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{r_z} = \frac{r_0}{2\sqrt{3}} = \frac{0,0001}{2\sqrt{3}}$$

$$\mathbf{u_{r_z} = 0,00003 \text{ mm}}$$

10 mm ölçüm basamağı değerinde toplam çözünürlük belirsizliği bileşeni ise sıfırdaki ile ölçüm adımlarındaki çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşenlerinin karelerinin toplamalarının karekökünden aşağıdaki şekil de hesaplanır.

$$u_r = \sqrt{u_{r_z}^2 + u_{r_x}^2} = \sqrt{0,00003_z^2 + 0,00003_z^2}$$

$$\mathbf{u_r = 0,00004 \text{ mm}}$$

Madde 3.3 te hesaplanan ölçü boyu ölçüm belirsizlik örnek değeri bu örnek içinde kullanılabilir. Bu örnekte kalibrasyon laboratuvarının 2 kapsama faktörü kullanılarak genişletilen ölçüm belirsizliği, uygulanan yer değiştirmenin % 0,3'ü olarak verilmişti. 10 mm ölçüm basamağı için belirsizlik bileşeni aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$u_{CL} = \frac{0,0030 \times 10 \text{ mm}}{2}$$

$$\mathbf{u_{CL} = 0,0150 \text{ mm}}$$

Ekstansometre cihazının doğrulamasında etkin olan tüm ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik ölçüm belirsizliği değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_b = \sqrt{u_b^2 + u_r^2 + u_{CL}^2} = \sqrt{0,0038^2 + 0,00004^2 + 0,0150^2}$$

$$\mathbf{u_b = 0,0155 \text{ mm}}$$

Ekstansometre cihazının doğrulamasında, genişletilmiş ölçüm belirsizliği, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için (k=2,0) değerinde alınması ve bu örnekte hesaplanan bileşik ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı sonucu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U_b = k \times u_b = 2 \times 0,0155$$

$$U_b = 0,0310 \text{ mm}$$

U_b , uygun hassasiyet katsayısı ile çarpılarak mm/mm cinsinden aşağıda şekilde belirtildiği şekilde ifade edilebilir.

$$U_b = U_b \cdot 1 / l_0 = 0,0310 \text{ mm} \cdot 1 / 50 \text{ mm}$$

$$U_b = 0,0006 \text{ mm/mm}$$

İki kapsam faktörü kullanan hata ölçer ölçü uzunluğu hatasının genişletilmiş ölçüm belirsizliği, U_{gl} , doğrudan kalibrasyon laboratuvarlarının belirsizliğinden alınabilir ve bu örnek için $U_{gl} = 0,1 \text{ mm}$ olarak alınırsa ve hassasiyet katsayısı ile çarpılarak mm/mm biriminden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$U_{gl} = U_{gl} \cdot l_i / l_0^2 = 0,1 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} / 50 \text{ mm}^2$$

$$U_{gl} = 0,0004 \text{ mm/mm}$$

Bu ASTM E83 standardının ek X4 bölümünde belirlenen belirsizliklerin yalnızca doğrulama sırasında belirlenen hatalarla ilgili olduğuna ve bunun ekstansometrenin belirsizliği olmadığına dikkat etmek önemli olduğu standardın X4.8 maddesinde belirtilmektedir. Ekstansometrenin belirsizliğini belirlemek için, doğrulama sırasında belirlenen hatalar ve uzun süreli kararlılık çalışmaları gibi diğer faktörlerin dikkate alınarak hesaplanması gerektiği ifade edilmiştir.

Ekstansometre cihazının doğrulamasında kullanılan referans cihazının bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{cal}), cihazın kalibrasyon sertifikasında beyan edilen en büyük belirsizlik değerinin yarısıdır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanır.

Referans cihazın verilmiş olan genişletilmiş sapması $0,2 \text{ } \mu\text{m}$ değerini % birimine dönüştürmek için $0,1 \text{ mm}$ ölçüm basamağı değerine oranlanarak $U_{cal} = (0,2 / (0,1 \times 1000)) \times 100 = \% 0,2$ değeri hesaplanır.

$$u_{cal} = \frac{0,2}{2} = 0,1\%$$

$$u_{cal} = \% 0,1 \text{ (k = 1)}$$

Ekstansometre cihazının doğrulamasını gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ile bu kalibrasyonda kullanılan referans cihazın kendi kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri arasındaki fark nedeniyle meydana gelen sıcaklık bağlı belirsizlik bileşeninin (u_A) hesabı aşağıdaki gibidir.

Bu örnekte, referans cihazın son kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri $T_{sert} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ise $T_{kal} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$, referans cihazın malzemesinin ısı genleşme katsayısı $\alpha = \% 0,000001 \text{ K}^{-1}$ olarak verilmiştir.

$$u_A = 100x \frac{\propto x a_{temp}}{\sqrt{3}} = \frac{100x0,000001x(25 - 20)}{\sqrt{3}}$$

$$u_A = \% 0,0003$$

Referans cihazın gösterge değerinin kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_B veya u_{drift}) hesabı için, cihazın son kalibrasyon sertifikasında gösterge değerlerinin ortalaması (X_{r-son}) ile referans cihazının bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalaması ($X_{r-önceki}$) arasındaki bağıl farka dikkörtgen dağılım uygulanır. Bu örnekte, referans cihazının son kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalaması $X_{r-son} = 1,0008$ mm ve aynı cihazın bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan gösterge değerlerinin ortalaması $X_{r-önceki} = 1,0004$ mm olarak alınırsa, kalibrasyon aparatının uzun süreli kararlılığı, $a_{sensitivity} = (1,0008 - 1,0004) / 1,0008 = 4 \times 10^{-4}$ olarak bulunur. Referans ölçme cihazının gösterge değerinin kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_B) hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

$$u_B = 100x \frac{a_{sensitivity}}{\sqrt{3}} = \frac{100x0,0004}{\sqrt{3}}$$

$$u_B = \% 0,023$$

Malzeme test makinası ekstansometre cihazının doğrulamasında kullanılan referans cihazının oluşturduğu ölçüm belirsizliği bileşenleri (u_{std}) aşağıda gibi hesaplanır.

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_A^2 + u_B^2 + u_D^2}$$

$$u_{std} = \sqrt{0,1^2 + 0,0003^2 + 0,023^2 + 0,014^2}$$

$$u_{std} = \% 0,103$$

10 mm ölçüm basamağı için mm birimine dönüşüm yapılırsa,

$$u_{std\ 10} = 0,103 \% \times 10 \text{ mm} / 100 = 0,0103 \text{ mm}$$

Ekstansometre cihazının doğrulamasında etkin olan tüm ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağıl ölçüm belirsizliği değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_q = \sqrt{u_r^2 + u_b^2 + u_{CL}^2 + u_{std}^2} = \sqrt{u_r^2 + u_b^2 + u_{CL}^2 + u_{cal}^2 + u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_q = \sqrt{0,0155^2 + 0,0103^2}$$

$$u_q = 0,0186 \text{ mm}$$

Ekstansometre cihazının doğrulamasında, genişletilmiş ölçüm belirsizliği, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için (k=2,0) değerinde alınması ve bu örnekte hesaplanan bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı sonucu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U = k \times u_q = 2 \times 0,0186$$

$$U = 0,0372 \text{ mm}$$

Bulunan bu değer ile 10 mm ölçüm basamağı için ölçüm belirsizliği değeri belirlenmiş olmaktadır. Aynı hesaplama diğer ölçüm basamaklarındaki değerler içinde yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük ölçüm belirsizliği değeri, ekstansometre cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen ölçüm belirsizliği değeri olarak ölçüm aralığı ile birlikte sertifikada verilmelidir.

4. SONUÇLAR

Bu dokümanda, malzeme test makinası ekstansometre cihazının doğrulaması sonucundaki belirsizlik hesabı ASTM E83 standardına uygun olacak detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Verilen sayısal örnek ile kalibrasyondaki ölçüm belirsizliği parametrelerinin hesabı detaylı olarak gösterilmiştir. Bu çalışma, ekstansometre cihazının kalibrasyonunu yapan, akredite veya akreditasyona hazırlanan laboratuvarların belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Böylece, konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] ASTM E83:2023, Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems
- [2] ISO 9513, 2012, Metallic materials – Calibration of extensometers used in uniaxial testing Machines
- [3] ISO 7500-1:2018, Metallic Materials-Verification of Static Uniaxial Testing Machines Tension/Compression Testing Machines-Verification and Calibration of the Force-Measuring Systems
- [4] ASTM E4:2021, Standard Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines
- [5] Aydemir, B., “Ekstansometre Cihazlarının Seçimi ve Kullanımı Hakkında Önemli Hususlar” Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2010,(7) 73-82
- [6] www.zwickroell.com
- [7] www.instron.com
- [8] Aydemir, B., ISO 9513 Standardına göre ekstansometre cihazlarının kalibrasyonunun irdelenmesi, Mühendislik Alanında Yeni Yaklaşımlar, Platanus Publishing, Editör:Sallı Bideci, Özlem, Basım sayısı:1, Sayfa Sayısı 156, ISBN:978-625-6517-18-9 , Bölüm 5, Sayfa 73-98.
- [9] Aydemir, B., 2018, “Malzeme Test Makinası Ekstansometre (Uzama Ölçer) Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı”, G2KV-030, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Kasım 2018
- [10] Extensometers for materials testing machines, Zwick/Roell, Dokuman no FP 282 2.0405
- [11] Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan,C., “Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı”, G2KV-020, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018
- [12] Dizdar H., Aydemir B., Vatan C., “ISO 7500-1 Standardına Göre Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi” Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dok, S.2, N.2, 2019 (12-24)

12. Bölüm

Metal Matrisli Hibrit Kompozitlerde Güncel Çalışmalar

Serkan ISLAK¹

ÖZET

Geleneksel kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında, hibrit metal matrisli kompozitler, mikroyapı, fiziksel, kimyasal ve mekaniksel olarak avantaj sağlar. Bu sebeple endüstride kullanılma olasılığı daha da artmaktadır. Alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır, nikel ve alaşımları ile çelikten yapılmış ve hibrit takviyeli matris kompozitlerin üretim süreçlerindeki ve özellik karakterizasyonundaki güncel gelişmeler bu incelemenin ana konularıdır. Hibrit takviyeler çeşitli boyutlarına, formlarına ve türlerine göre kategorilere ayrılmıştır. Benzersiz yapılar oluşturmak ve homojen bir hibrit takviye dağılımı elde etmek için önerilen yeni üretim yöntemleri detaylıca incelenmiştir. Hibrit takviyelerin sağladığı fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özellik iyileştirme durumları incelenmiş ve raporlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit kompozitler, seramik takviye, nanopartikül takviye

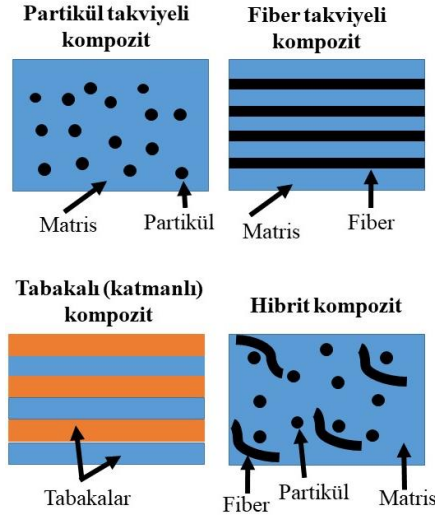
¹ Prof. Dr., Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye
e-mail: serkan@kastamonu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-9140-6476

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle yeni malzemelere duyulan ihtiyaç günden güne gittikçe artmaktadır. Özellikle üzerine birçok çalışma yapılan kompozit malzemeler bu konuda ön sırada yer almaktadır. Her biri farklı özelliklere sahip çeşitli bileşenlerin oranlarından oluşan mühendislik malzemesi olarak bilinen kompozit malzeme, bu bileşenlerin sinerjik etkileşimi sayesinde, ayrı ayrı haldeki bileşenlerinin sergilediklerinden daha geniş bir özellik yelpazesi kazanır (Basak, Pramanik, and Prakash 2019). Matris ve takviye elemanı olarak bilinen bu bileşenlerden takviye elemanı klasik kompozit malzeme anlayışında tek bir bileşeni temsil etmektedir. Bu bileşen kendi özelliği nispetinde kompozit malzemenin özelliklerine katkıda bulunabilmektedir. Örneğin döküm yöntemiyle üretilen alüminyum alaşım matrisli ve %20 SiC takviyeli kompozit malzemede belirli özelliklerin değiştiği görülmüştür (Zhou and Xu 1997). Ni esaslı SiC takviyeli yüzey kaplamasında da SiC ilavesinin artışının kompozitin sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği rapor edilmiştir (Buytoz et al. 2013). Kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar birden fazla takviye elemanının matrise ilave edildiği hibrit kompozit malzemelerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu kompozitlerde birçok özelliğin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2. HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELER

Hibrit takviye stratejisi, metal matrisli kompozitlerin gelişmiş tasarım ve üretiminde önemli bir rol oynar. Bu stratejinin temel konsepti, metal matrise farklı hibrit takviyelerin dahil edilmesi ve genel performansı artırmak için birleşik özelliklerinden yararlanılmasıdır (Shen et al. 2015) Bu teknik, biyolojik olarak ilham alan yapılara kıyasla metal matrisli kompozitlerin üretimi için daha etkili ve umut vericidir, çünkü hibrit takviyelerin türü, miktarı ve uygulama oranı dikkatlice seçilerek optimum performans elde edilebilir. Geleneksel kompozitlerle karşılaştırıldığında, hibrit metal matrisli kompozitler, genel mekanik ve işlevsel özelliklerde iyileşme sağlayarak, mühendislik ve işlevsel cihaz uygulamaları için yaygın olarak benimsenme olasılığını artırmaktadır (Zhou et al. 2020). Hibrit kompozitler genellikle, kompozit malzemelerin takviye türüne göre sınıflandırılmasında yer almaktadır. Şekil 1’de takviye türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması verilmiştir. Hibrit kompozitte sünek matrisin içinde partikül ve fiber takviyeler açıkça görülmektedir. Burada her bir takviye hibrit kompozite farklı özellikler kazandırarak üstün malzeme grubuna girmelerine neden olmaktadır.



Şekil 1. Takviye malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.1. Hibrit Kompozitlerde Kullanılan Takviye Çeşitleri

Hibrit kompozitlerde kullanılan takviyeler çoğunlukla partikül, fiber ve bazen de katman olarak karşımıza çıkabilmektedir. Karbür, nitrür, borür, oksit gibi seramik partiküllerle, bu seramiklerin fiberleri takviyeleri oluşturmaktadır.

2.1.1. Karbür Seramikler

Karbürler, yüksek erime sıcaklıkları, kimyasal inertlik, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerle karakterize edilir. Oksidasyona dayanıklı gaz brülörleri, tekstil makineleri bileşenleri, kesme ve taşlama aletleri ve yataklar gibi geniş bir kullanım yelpazesine sahip önemli endüstriyel malzemeler haline gelmeleri hızla gerçekleşmiştir. Bu karbürlerden en fazla kullanılanları; bor karbür, tungsten karbür, titanyum karbür, silisyum karbür, zirkonyum karbür, krom karbür ve niyobyum karbürdür (Pierson 1996).

2.1.2. Nitrür Seramikler

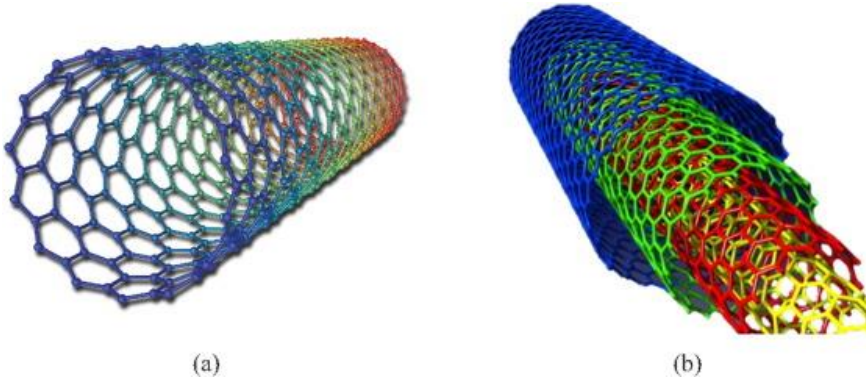
Karbürler ve nitrürler arasında çok sayıda benzerlik vardır. Olağanüstü kimyasal dirence, yüksek erime noktalarına sahip olup dayanıklı ve sağlamdırlar. Yarı iletkenlerde, aşınma yüzeylerinde, kesme ve taşlama takımlarında ve diğer alanlarda çok sayıda önemli kullanım alanı olan önemli endüstriyel malzemelerdir. En çok kullanılan nitrürler; titanyum nitrür, bor nitrür, alüminyum nitrür, zirkonyum nitrür vb. olmaktadır (Groover 2010; Pierson 1996).

2.1.3. Oksit Seramikler

Oksit seramikleri, yüksek ısıda etkileyici bir performans sergilemenin yanı sıra olağanüstü ısıya ve kimyasal etkilere dayanıklılık göstererek, yüksek sıcaklık oksidasyon ortamlarda kullanılmak için uygundur. Fakat oksit seramiklerin genellikle düşük bir tokluk seviyesi vardır ve ani darbeler karşısında kırılabilirlik gösterir (Xu et al. 2021). Seramik oksit örnekleri, Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , alüminyum silikat, magnezya ve farklı metal oksit bileşenlerinden meydana gelir. Bu maddeler, oksijen, karbon ya da azot barındırdıkları için inorganik ve metalik olmayan kategorisine girer (Hanagadakar and Kulkarni 2023).

2.1.4. Karbon Nano Tüp (CNT)

Karbon nanotüpleri (CNT) (Şekil 2), karbon elementinin farklı yapılarından ve silindirik biçime sarılmış tek katmanlı hibrit karbon atomlarından meydana gelen altıgen katmanlardan oluşmaktadır. Bir karbon nanotüpünün kalınlığı birkaç nanometre, boyu ise birkaç mikrometre kadardır. CNT'ler, ya tek bir duvardan oluşan (SWCNT'ler) ya da birden fazla duvardan meydana gelen (MWCNT'ler) yapıda olabilir. MWCNT'lerin içinde, elamanlar olarak bir araya gelmiş birkaç tane SWCNT mevcuttur (Abu Shmeis 2022). Tablo 1'de CNT'lerin özellikleri verilmiştir.



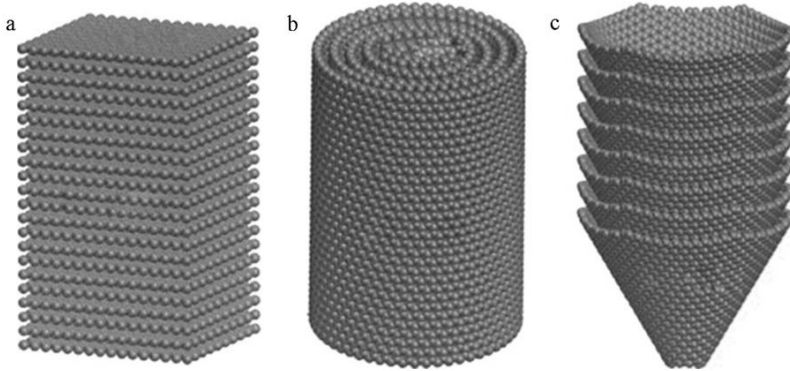
Şekil 2. (a) yalnızca bir duvarı olan ve (b) birden fazla duvarı bulunan karbon nanotüpün kimyasal bileşimi (Xiao, Guo, and Wang 2019).

Tablo 1. CNT'lerin özellikleri (Bandaru 2007; Houssain 2024; Jagadeesan, Thangavelu, and Dhananjeyan 2020).

Özellik	Değer
Çap (nm)	1,3-1,5
Yoğunluk (g/cm ³)	1,33-1,41
Kafes parametresi (nm)	16,53-16,55
Elastisite modülü (TPa)	1,0-1,7
Çekme mukavemeti (GPa)	~ 100
Elektriksel İletkenlik (K.Ohms) ⁻¹	13,0
Akım yoğunluğu (A/m ²)	1015
Ortalama serbest yol (nm)	~ 100
Termal İletkenlik (W/m.k)	2000-3000

2.1.5. Karbon Nano Fiber (CNF)

Karbon nano lifleri, grafen tabakalarının farklı yönlerde dairesel olarak düzenlendiği bir boyutlu karbon bileşenleridir (Şekil 3). Katalitik metal içerip içermeseler de, farklı kimyasal buhar biriktirme yöntemleriyle üretilirler. Hafif olması, özel yapısal karakteristikleri ve daha büyük bir yüzey alanı ile çok yüksek miktarda yük kaldırabilme kapasitesi, bu malzemeyi elektromanyetik girişim koruması için elverişli kılar. Ancak, bu materyalin belirli nitelikleri üretim sürecine ve nihai işleme yöntemlerine bağlıdır (Bhattacharjee, Biswas, and Bose 2020). Tablo 2'de CNF'lerin özellikleri verilmiştir.



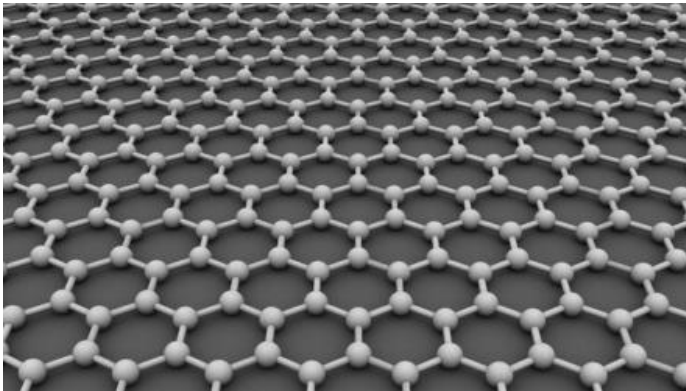
Şekil 3. Farklı bazal-kenar yüzey alanı oranlarına sahip üç tip CNF'nin şematik çizimleri: (a) trombosit tipi CNF, (b) tübüler tip CNF ve (c) balık kılıcı tipi CNF (Cheng et al. 2012)

Tablo 2. CNF’lerin özellikleri
(Desmaris, Saleem, and Shafiee 2015; Houssain 2024).

Özellik	Değer
Kütle yoğunluğu (g/cm ³)	1.4 - <2
Uzunluk	1 nm -100 µm
Çekme Dayanımı (Gpa)	~ 30
Young modülü (TPa)	80-800
Elektrik öz direnci	0.1 (µΩ.m) – 2 (mΩ.m)
Elektriksel İletkenlik (K.Ohms)-1	5 x 10 ⁻⁵
Termal genleşme katsayısı (CTE) (/K)	~ 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷
Termal İletkenlik (W/m.k)	20-3000

2.1.6. Grafen

Grafen, yalnızca tek bir karbon atomunun kalınlığında olan iki boyutlu (2B) bir materyaldir (Şekil 4). 2004'te Manchester Üniversitesi'nde görev yapan Andre Geim ve Kostya Novoselov isimli iki bilim insanı tarafından ayrıştırılmıştır. Grafen, Şekil 4'de görüldüğü üzere iki boyutlu petek yapısı sayesinde mükemmel bir madde olarak değerlendirilir. Sıradışı mekanik, elektriksel, optik ve biyolojik nitelikler taşımaktadır. Grafene dayalı nano yapılar, farklı sensör çeşitlerinin üretilmesi açısından büyük bir olanak sunmaktadır (Chakraborty and J Hashmi 2018). Grafenin özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.



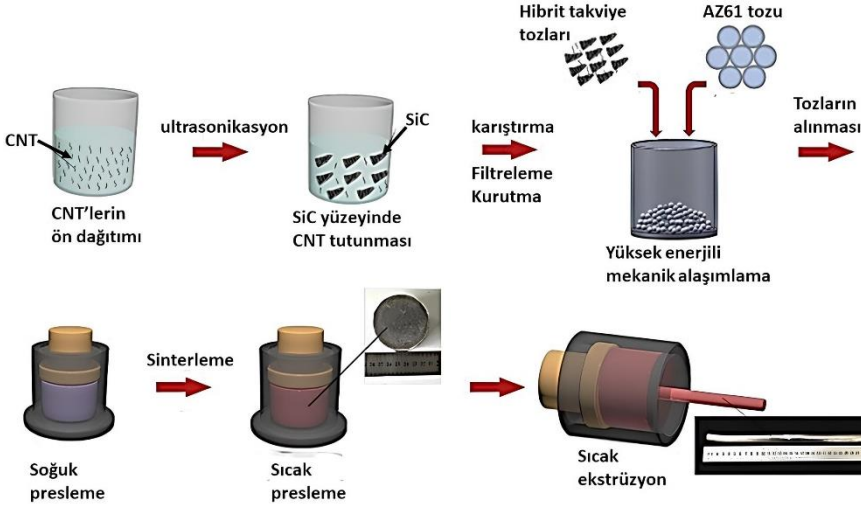
Şekil 4. Grafenin temsili resmi

Tablo 3. CNF'lerin özellikleri
(Houssain 2024; Schedin et al. 2007; Zhan et al. 2023).

Özellik	Değer
Mukavemet (GPa)	~130
Young modülü (TPa)	~1,0
Kesme Mukavemeti (GPa)	~ 60
Elektriksel İletkenlik (K.Ohms) ⁻¹	1000'e kadar
Akım yoğunluğu (A/m ²)	1,18 ×10 ⁸
Termal İletkenlik (W/m.k)	~5000

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

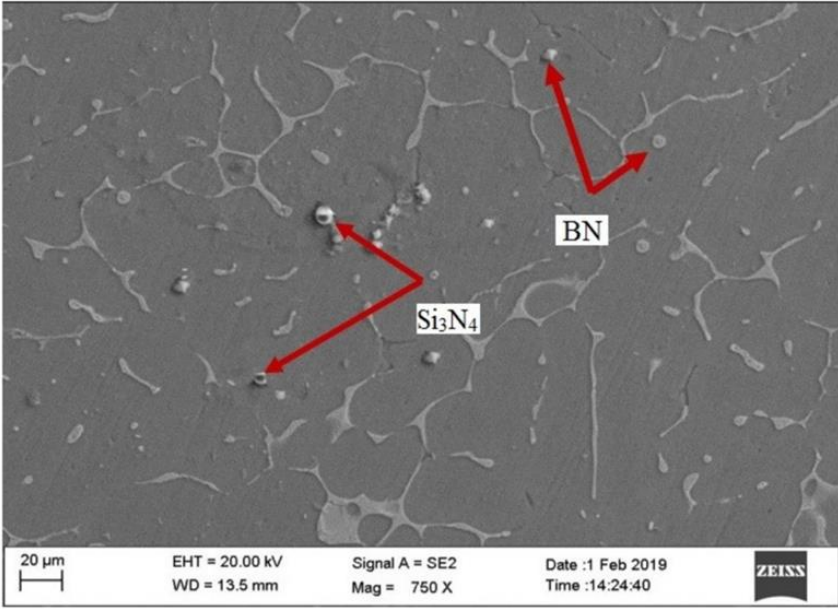
Magnezyum, önemli bir kimyasal etkiye sahip olduğu için ve bulamaç karıştırma ile elektrostatik adsorpsiyon sırasında ciddi şekilde oksitlenebildiğinden, pul toz metalurjisi yöntemi magnezyum alaşımı içeren matris kompozitler için uygun olmayabilir (Xiang et al. 2019). Çok ölçekli hibrit mikron SiC ve CNT takviyeli yüksek performanslı Mg matris kompozitler oluşturmak için, Zhou ve ark. (Zhou et al. 2019), Mg matrisi için etkili ve uygun olan benzersiz bir toz metalurjisi yaklaşımı tasarladı; işlem şeması Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu yol için dispersiyon işleminde birkaç adım vardır. İlk olarak, sırasıyla CNT'lerin ve SiC'nin yüzeylerine tutunan karboksil (-COOH) ve hidroksil (-OH) grupları arasında hidrojen bağları oluşturarak, CNT'ler SiC yüzeyine düzgün bir şekilde adsorbe edildi (Şekil 5). Bundan sonra, a elde etmek için vites değiştirme hızında bilyalı öğütme kullanıldı. Daha sonra, son kompozitlerde hibrit takviyelerin düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamak için döndürme hızında bilyalı öğütme kullanıldı.



Şekil 5. AZ61-SiC-CNT kompozitlerinin üretim sürecinin şematik gösterimi (Zhou et al. 2019).

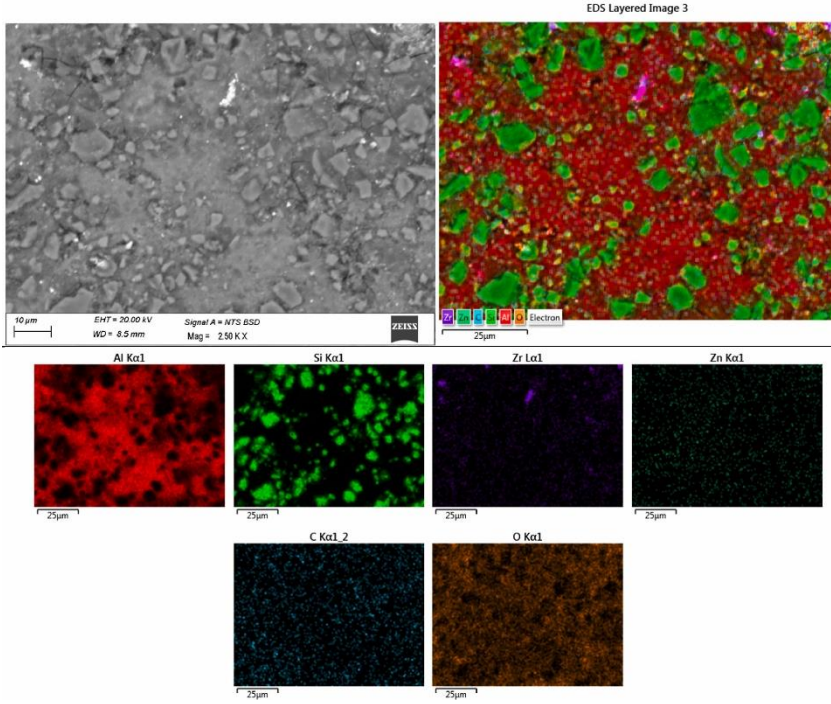
Harish ve ark. (Harish, Sreenivasa Reddy, and Kumaraswamy 2023) elektrik direnç fırınında kum kalıp tekniği kullanılarak üretilen Al7075-Al₂O₃-E-cam hibrit kompozitlerinin mekanik davranışını incelemiştir. Hibrit kompozitler, alüminyum oksit parçacıkları ve E-cam bilye lifleriyle takviye edilmiştir. Çalışma, Al₂O₃ ve E-cam ilavesiyle mekanik özelliklerin arttığını, çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertliğin ağırlıkça %9'a kadar arttığını bulmuştur. Kompozitlerin yoğunluğu, takviyenin hacim oranıyla artmıştır.

Subramanian ve ark. (Subramanian et al. 2021) tarafından, karıştırma döküm yöntemiyle hazırlanan ve kuru kayma koşulları altında incelenen Al7068/Si₃N₄/BN hibrit metal matris kompozitlerinin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Kompozitler, farklı ağırlık yüzdelerinde Si₃N₄ ve BN parçacıklarıyla hazırlanmıştır. Performanslarını incelemek için aşınma deneyleri yapılmıştır. Minimum aşınma oranı, %10 Si₃N₄ ve %5 BN ile takviye edilmiş kompozitte bulunmuştur. Varyans Analizi (ANOVA), Si₃N₄'ün ağırlık oranının aşınma oranına (%36,60) ve sürtünme katsayısına (COF) yüke (%29,73) daha yüksek bir katkı yüzdesine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Aşınmış yüzey, SEM mikrografları kullanılarak analiz edilmiş ve kuru kayma aşınma deneyi sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 6'da alüminyum alaşımı matrisinde Si₃N₄ ve BN takviyeli hibrit kompozitin mikroyapısı görülmektedir.



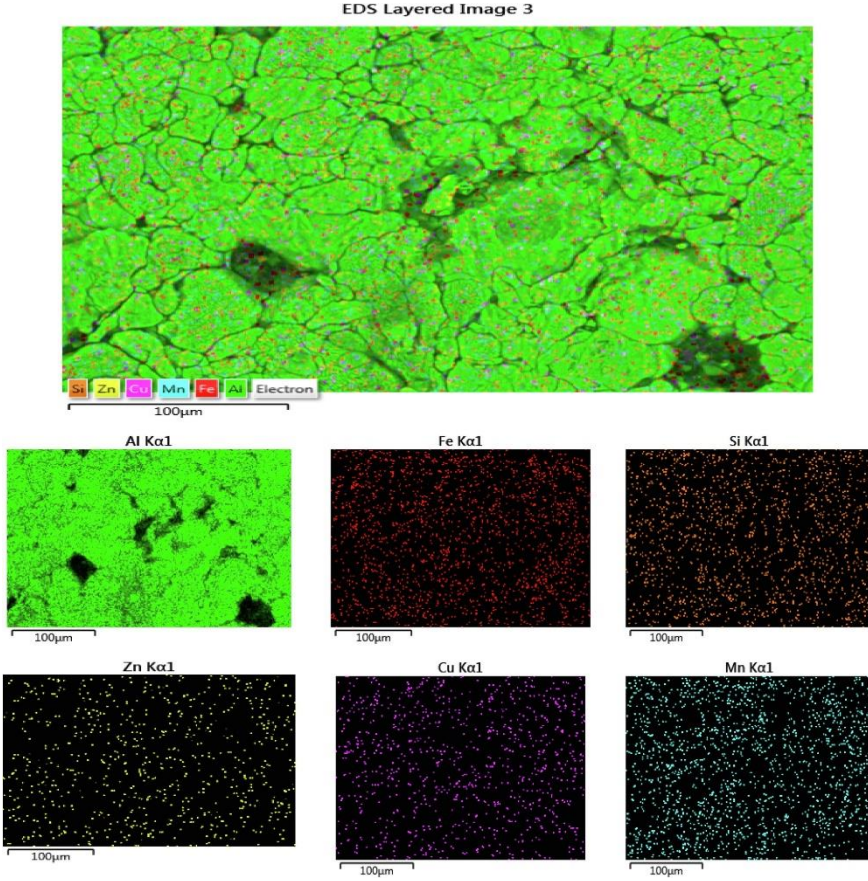
Şekil 6. Al7068-Si₃N₄/BN hibrit metal matris kompozitin SEM fotoğrafı (Subramanian et al. 2021).

Manohar ve ark. (Manohar et al. 2023), karıştırmalı döküm, geleneksel sinterleme ve mikrodalga sinterleme yöntemleri kullanılarak optimize edilmiş ağırlıkça fraksiyonlu bir AA7075/SiC/ZrC hibrit kompozitin mekanik davranışını incelemişlerdir. Kompozitler, XRD, gözeneklilik, mikroyapısal ve mekanik değişiklikler açısından test edilmiştir. Sonuçlar, mikrodalga sinterleme kompozitlerinin, 389 MPa basınç dayanımı, 321 MPa çekme dayanımı ve %26 kırılmaya kadar gerinim değeriyle karıştırmalı döküm kompozitlere göre önemli ölçüde daha yüksek mukavemet gösterdiğini göstermiştir. Çalışma ayrıca, mikrodalga sinterlemenin büyük ölçekli üretim için en uygun maliyetli yöntem olduğunu ve üstün mekanik özellikler ile üretim giderlerinde ekonomik avantajlar sağladığını ortaya koymuştur. Şekil 7’de, geleneksel toz metalurjisi yöntemleri kullanılarak hazırlanan AA7075 + %7 SiC + %2 ZrC hibrit kompozitin mikro yapısı gösterilmektedir.



Şekil 7. Toz metalurjisi mikrodalga sinterleme yoluyla üretilen AA7075 + %7SiC+%2ZrC hibrit kompozitin SEM ve EDS analizi (Manohar et al. 2023).

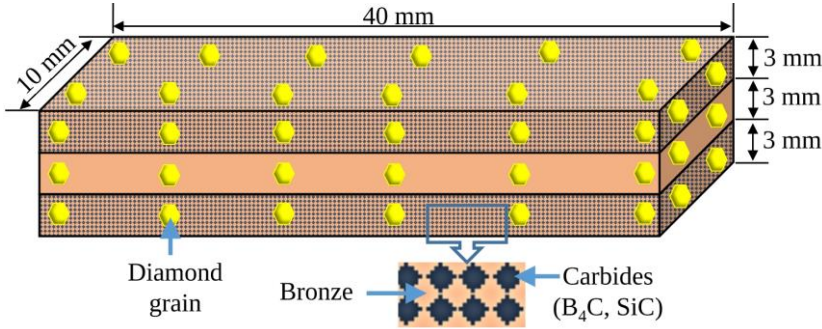
Manohar ve ark. (Manohar, Pandey, and Maity 2021), AA7075/B₄C kompozitinin mekanik özellikleri üzerinde çin kili hacim oranının etkisi araştırılmıştır. Çin kili hacim oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisi, XRD, çekme, basınç ve mikro sertlik testleri ile elde edilen sonuçlar yardımıyla analiz edilmiştir. Deneysel analiz ve sonuçlardan, eklenen çin kilinin, soğuk sıkıştırma işlemlerinden sonra kalıp malzemesinden yeşil kompaktların verimli bir şekilde sıkıştırılması ve çıkarılması için etkili bir bağlayıcı malzeme olarak davrandığı ve sinterlenmiş kompozitte kompozit malzemeye %7 hacim oranına kadar yüksek mukavemet sağladığı, çekme mukavemetinde ise bu değerden sonra malzeme mukavemetinin düşmeye başladığı açıktır. Bu çalışmada, AA7075/B₄C kompozitindeki çin kilinin kritik hacim oranları çekme, basınç ve sertlikte araştırılmıştır. Ayrıca, ısıl işlemin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elementlerin ve takviye parçacıklarının dağılımını bulmak için Şekil 8'de gösterilen AA7075/6%B₄C/10% Çin kili hibrit kompozit üzerinde EDS analizi gerçekleştirildi. Sonuçlar, takviyelerin matris malzemesi boyunca dağılımının düzgün olduğunu ancak bazı noktalarda arayüz bağlarının yeterince güçlü olmadığını ve bu durumun seramik takviyelerin matris malzemesinden soyulma hareketine yol açtığını göstermektedir.



Şekil 8. Isıl işlem uygulanmadan AA7075/6%B4C/10% Çin kili hibrit kompozitinin EDS analizi (Manohar et al. 2021).

Islak ve ark. (Islak et al. 2024) elmaslı kesici soketlerin kullanım ömürlerini uzatarak elmaslı kesici soketlerin çalışma maliyetini ekonomik hale getirmeyi amaçlamışlardır. Kullanım ömürlerini uzatmak için sıcak presleme tekniği kullanılarak dış tabakalarında SiC ve B4C takviyeli bronz matrisli hibrit sandviç soketler üretilmiştir. Dış tabakaların aşınmaya dayanıklı, orta tabakanın ise tok olması arzu edilmiştir. Mikroyapı özelliklerin belirlenmesi için, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) kullanılmıştır. Mekanik özellikler, sertlik, aşınma, kesme performans ve üç noktalı eğme testleri kullanılarak belirlenmiştir. Soketlerin kesme performansları andezit mermer tornalanarak belirlenmiştir. SEM incelemeleri, bronz matrisinde SiC ve B4C tanelerinin homojen dağıldığını göstermiştir. XRD analizlerinden matris ile takviyeler arasında her hangi bir faz oluşumunun olmadığı ve üretim sonrası yapıda oksit bulunmadığı anlaşılmaktadır. En yüksek sertlik değerine B4C

takviyeli sandviç sokette 113.9 HB değeri ile ulaşılırken, hibrit sandviç sokette (SiC ve B₄C katkı) ise 110.3 HB sertlik değeri ölçülmüştür. Matrisin reciprocating aşınma testi sonuçları, en düşük aşınma oranına B₄C takviyeli sandviç kompozit sokette ve sonra hibrit sandviç kompozit sokette ulaşıldığını göstermiştir. Andezit taşı tornalanması işlemi sonrası en düşük aşınma miktarına SiC ve B₄C takviyeli hibrit sandviç kompozitte ulaşılmıştır. Katkısız numuneye göre hibrit sandviç kompozit soketin kesme performansı %46.15 artmıştır. Numunelerin çapraz kırılma dayanımında en yüksek değerine B₄C takviyeli sandviç kompozit sokette 380 MPa değeri ile ulaşılırken, hibrit sandviç kompozit sokette ise 352 MPa değerine ulaşılmıştır. Tüm test ve analizler göz önüne alındığında, numuneler arasında hibrit sandviç kompozit soket numnesinin elmaslı kesici takımlar için en uygun soket olabileceği sonucuna varılmıştır. Şekil 9’da hibrit sandviç kompozit soketin makro fotoğrafı görülmektedir.

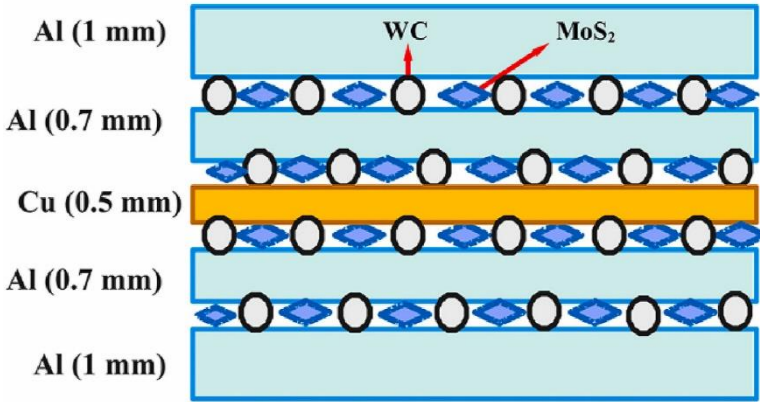


Şekil 9. Hibrit sandviç kompozit soketin makro fotoğrafı (İslak et al. 2024)

Houssain ve ark. (Houssain et al. 2025) molibden (Mo) matrisli, bor karbür (B₄C) ve silisyum karbür (SiC) takviyeli kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Toz metalürjisi yöntemlerinden soğuk presleme ve basınçsız sinterleme metodu ile Mo-SiC/B₄C hybrid kompozit numuneler üretilmiştir. Numunelerin mikroyapı karakterizasyonu SEM-EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Termogravimetrik analiz (TGA) ile numunelerin yüksek sıcaklıklarda oksitlenme davranışı belirlenmiştir. Mekanik özellikleri değerlendirmek amacıyla sertlik ve aşınma testi numunelere uygulanmıştır. Bu testlerin dışında numunelerin yoğunlukları Arşiment prensibi ile ölçülmüştür. Numunelerin aşınma testleri reciprocating moduna göre gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıda takviye türüne bağlı olarak Mo, Mo₃Si, MoC, Mo₂B ve SiC fazları oluşmuştur. B₄C ilavesiyle numunelerin yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncinde iyileşmeler olmuştur. Bu intermetalik fazlar sayesinde Mo matrisinin sertliğinde belirgin artışlar meydana gelmiş olup, en yüksek sertlik 245 HV_{0.5} değeri ile Mo-

%8 B₄C numunesinde ölçülmüştür. Mo matrisine SiC ve B₄C ilave edilmesiyle numunelerin aşınmaya karşı dirençleri artmıştır. En düşük aşınma oranı ve en düşük sürtünme katsayısı Mo-%8B₄C numunesinde sırasıyla $4.78 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve 0.654 olarak ölçülürken, Mo-%4SiC-%4B₄C hibrit kompozitinde ise bu değerler $5.83 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve 0.674 olarak ölçülmüştür.

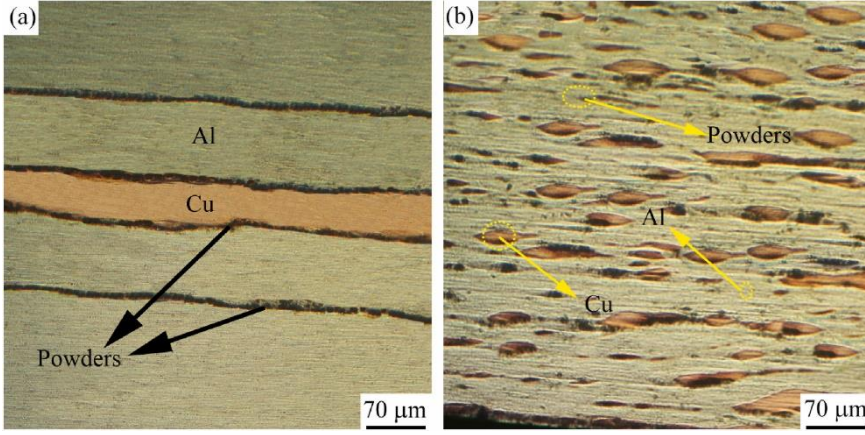
Alizadeh ve ark. (Alizadeh et al. 2025) tarafından, birikimli rulo bağlama (ARB) yöntemi kullanılarak üretilen bir Al/Cu/MoS₂/WC hibrit kompozitin yapısal özellikleri, tribolojik performansı ve korozyon direnci analiz edilmiştir. Yedi ARB geçişinden sonra parçacıkların düzgün dağıldığı, faz geçişlerinin olmadığı ve Al ve Cu katmanlarının mikro sertliğinin arttığı görülmüştür. ARB işlemi, aşınma oranında azalma ile aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Yapıştırıcı, aşındırıcı ve delaminasyon mekanizmaları gözlemlenmiş olup, delaminasyon daha yüksek ARB geçişlerinde baskın olmuştur. Kompozitin korozyon direnci, 165 kat daha düşük korozyon akım yoğunluğu ile yedi ARB geçişiyle iyileşmiştir. Al/Cu/MoS₂/WC hibrit kompozit üretmek için levhaların ve seramik takviyelerin birbirleri üzerinde şematik düzenlenmesi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Al/Cu/MoS₂/WC hibrit kompozit üretmek için levhaların ve seramik takviyelerin birbirleri üzerinde şematik düzenlenmesi (Alizadeh et al. 2025).

Şekil 11, ardışık ARB geçişlerinden sonra rulo yönü-normal yön düzleminde Al/Cu/MoS₂/WC hibrit çok katmanlı kompozitin mikro yapısal evrimini göstermektedir. İlk geçişten sonra, her bir metal katmanın kalınlığı, farklı başlangıç boyutlarına rağmen Al için yaklaşık 0,36 mm, Cu için ise 0,27 mm olmuştur. ARB işlemine devam edildiğinde, daha önceki çalışmamızda belirtildiği gibi, her iki katmanın kalınlığı da önemli ölçüde azalmıştır (Karimi

and Alizadeh 2024). Yedi geçişten sonra, Cu, MoS₂ ve WC parçacıkları Al matrisi içinde eşit olarak dağılmıştır.



şekil 11. Al/Cu/MoS₂/WC hibrit kompozitinin ilk (a) ve yedinci (b) ARB geçişlerinden sonra optik mikroskop görüntüleri (Alizadeh et al. 2025).

KAYNAKLAR

- Abu Shmeis, Reham Mahmoud. 2022. "Chapter Four - Nanotechnology in Wastewater Treatment." Pp. 105–34 in *Environmental Nanotechnology: Implications and Applications*. Vol. 99, edited by N. B. Turan, G. O. Engin, and M. S. B. T.-C. A. C. Bilgili. Elsevier.
- Alizadeh, Morteza, Abbas Karimi, Shima Pashangeh, and Ahmad Ostovari moghaddam. 2025. "Characterization of Wear and Corrosion Behavior of Al/Cu/MoS₂/WC Hybrid Metal Matrix Composite Fabricated via Accumulative Roll Bonding Process." *Journal of Materials Research and Technology* 35:4647–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.230>.
- Bandaru, Prabhakar R. 2007. "Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures." *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 7(4–5):1239–67.
- Basak, A. K., A. Pramanik, and C. Prakash. 2019. "Deformation and Strengthening of SiC Reinforced Al-MMCs during in-Situ Micro-Pillar Compression." *Materials Science and Engineering: A* 763:138141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138141>.
- Bhattacharjee, Yudhajit, Sourav Biswas, and Suryasarathi Bose. 2020. "Chapter 5 - Thermoplastic Polymer Composites for EMI Shielding Applications." Pp. 73–99 in, edited by K. Joseph, R. Wilson, and G. B. T.-M. for P. E. M. I. S. A. George. Elsevier.
- Buytoz, S., M. Ulutan, S. Islak, B. Kurt, and O. Nuri Çelik. 2013. "Microstructural and Wear Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed NiCrBSi-SiC Composite Coating on SAE 1030 Steel." *Arabian Journal for Science and Engineering* 38(6). doi: 10.1007/s13369-013-0536-y.
- Chakraborty, Monisha, and M. Saleem B. T. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering J Hashmi. 2018. "Potential of Graphene for Miniature Sensors and Conducting Devices for Biomedical Applications." Elsevier.
- Cheng, Hong-Ye, Yi-An Zhu, Zhi-Jun Sui, Xing-Gui Zhou, and De Chen. 2012. "Modeling of Fishbone-Type Carbon Nanofibers with Cone-Helix Structures." *Carbon* 50(12):4359–72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.05.005>.
- Desmaris, Vincent, Muhammad Amin Saleem, and Sareh Shafiee. 2015. "Examining Carbon Nanofibers: Properties, Growth, and Applications." *IEEE Nanotechnology Magazine* 9(2):33–38.
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons.

- Hanagadakar, Manjunath S., and Raviraj M. Kulkarni. 2023. "Environmental Impacts and Benefits of Ceramic Coatings." Pp. 461–87 in *Advanced Ceramic Coatings*. Elsevier.
- Harish, R. S., M. Sreenivasa Reddy, and J. Kumaraswamy. 2023. "Mechanical Behaviour of Al7075 Alloy Al2O3/E-Glass Hybrid Composites for Automobile Applications." *Materials Today: Proceedings* 72:2186–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.460>.
- Houssain, Hasaneen, Serkan Islak, Faik Okay, and Tuncer Cabbar. 2025. "Microstructure, Mechanical, and Oxidation Properties of Mo-SiC/B4C Hybrid Composites." *Ceramics International* 51(8):10375–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.470>.
- Houssain, Hasaneen Majed Houssain. 2024. "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen CoCrMo Matrisli Nano Partikül Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması." Kastamonu Üniversitesi.
- Islak, Serkan, Ertuğrul Çelik, Mümtaz Erol, and Hasaneen Houssain. 2024. "Microstructure, Mechanical, and Cutting Performance Properties of B4C and SiC Reinforced Sandwich Composite Segments." *Ceramics International* 50(21, Part C):43530–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.205>.
- Jagadeesan, Aravind Kumar, Krithiga Thangavelu, and Venkatesan Dhananjeyan. 2020. "Properties and Applications." P. 27 in *21st Century Surface Science: A Handbook*. IntechOpen.
- Karimi, Abbas, and Morteza Alizadeh. 2024. "Mechanical and Electrical Properties of Al/18Cu/3WC/3MoS2 Multilayered Hybrid Composites Fabricated by Accumulative Roll Bonding." *Ceramics International* 50(14):25379–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.269>.
- Manohar, Guttikonda, Adepu Kumar, M. V. N. V. Satyanarayana, S. R. Maity, K. M. Pandey, Venkateswara Reddy, and Babar Pasha Mahammod. 2023. "Effect of Fabrication Techniques on Mechanical and Microstructural Behavior of AA7075/SiC/ZrC Hybrid Composite." *Ceramics International* 49(23, Part A):37782–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.106>.
- Manohar, Guttikonda, K. M. Pandey, and S. R. Maity. 2021. "Effect of China Clay on Mechanical Properties of AA7075/B4C Hybrid Composite Fabricated by Powder Metallurgy Techniques." *Materials Today: Proceedings* 45:6321–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.740>.
- Pierson, Hugh O. 1996. *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides*:

Properties, Characteristics, Processing and Applications. William Andrew.

- Schedin, Fredrik, Andrei Konstantinovich Geim, Sergei Vladimirovich Morozov, Ew W. Hill, Peter Blake, Mi I. Katsnelson, and Kostya Sergeevich Novoselov. 2007. "Detection of Individual Gas Molecules Adsorbed on Graphene." *Nature Materials* 6(9):652–55.
- Shen, M. J., X. J. Wang, M. F. Zhang, M. Y. Zheng, and K. Wu. 2015. "Significantly Improved Strength and Ductility in Bimodal-Size Grained Microstructural Magnesium Matrix Composites Reinforced by Bimodal Sized SiCp over Traditional Magnesium Matrix Composites." *Composites Science and Technology* 118:85–93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.08.009>.
- Subramanian, Kumar, Sakthivel Murugesan, Dhanesh G. Mohan, and Jacek Tomków. 2021. "Study on Dry Sliding Wear and Friction Behaviour of Al7068/Si3N4/BN Hybrid Composites." *Materials* 14(21).
- Xiang, Yeyang, Xiaojun Wang, Xiaoshi Hu, Linglong Meng, Zhengxiang Song, Xuejian Li, Zhenming Sun, Qiang Zhang, and Kun Wu. 2019. "Achieving Ultra-High Strengthening and Toughening Efficiency in Carbon Nanotubes/Magnesium Composites via Constructing Micro-Nano Layered Structure." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 119:225–34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.02.006>.
- Xiao, Feipeng, Rui Guo, and Jingang Wang. 2019. "Flame Retardant and Its Influence on the Performance of Asphalt – A Review." *Construction and Building Materials* 212:841–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.118>.
- Xu, Zhongkai, Xiaohong Sun, Kunzhou Xiong, Zhe Chen, Yunpeng Shang, Ruisong Guo, Shu Cai, and Chunming Zheng. 2021. "A Review of the Research Progress on the Interface between Oxide Fiber and Oxide Ceramic Matrix." *Ceramics International* 47(5):5896–5908. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.039>.
- Zhan, Ke, Weizhen Wang, Fengjia Li, Jiaming Cao, Jianan Liu, Zheng Yang, Zhuo Wang, and Bin Zhao. 2023. "Microstructure and Properties of Graphene Oxide Reinforced Copper-Matrix Composite Foils Fabricated by Ultrasonic Assisted Electrodeposition." *Materials Science and Engineering: A* 872:144995.
- Zhou, M. Y., L. B. Ren, L. L. Fan, K. S. Tun, M. Gupta, Y. W. X. Zhang, T. H. Lu, and G. F. Quan. 2019. "Achieving Ultra-High Strength and Good Ductility in AZ61 Alloy Composites Containing Hybrid Micron SiC and Carbon Nanotubes Reinforcements." *Materials Science and Engineering:*

A 768:138447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138447>.

Zhou, M. Y., L. B. Ren, L. L. Fan, Y. W. X. Zhang, T. H. Lu, G. F. Quan, and M. Gupta. 2020. "Progress in Research on Hybrid Metal Matrix Composites." *Journal of Alloys and Compounds* 838:155274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155274>.

Zhou, W., and Z. M. Xu. 1997. "Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites." *Journal of Materials Processing Technology* 63(1):358–63. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02647-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02647-7).

13. Bölüm

Al₂O₃-LCD Kompozitlerinden Elde Edilen Sinterlenmiş Beyaz Cam Seramik Karolar

Suna ÇETİN YETER¹

1. Giriş

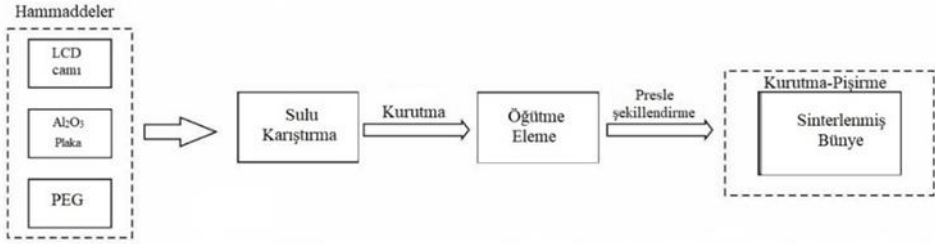
Cam-seramikler, farklı teknolojik alanlarda geniş bir uygulama yelpazesi bulmuştur [1]. Yapı uygulamaları için en önemli cam-seramik 1970'lerden beri Japonya'da geliştirilen volastonit bazlı "Neoparies"dir. Bu volastonit malzeme, iç ve dış duvarlar için büyük ölçekte üretilmektedir. Neoparies'in temel özellikleri arasında hava koşullarına karşı yüksek direnç, sıfır su emme oranı, sertlik (doğal taştan daha yüksek), hafiflik (doğal taş yapı malzemelerinden %30 daha hafif) ve kavisli panellerin kolaylıkla üretilmesi yer alır. Daha ucuz ve daha erişilebilir hammaddelerden sinterlenmiş piroksen bazlı cam seramikler, 1990'ların başından beri Bulgaristan'da [2] ve İtalya'da [3], [4], [5] geliştirilmiştir. Ana cam toz halinde sağlandığından, uzun arıtma sürelerine gerek kalmaz, böylece cam yapımının maliyetleri önemli ölçüde azalır.

LCD cam, SiO₂, Al₂O₃, B₂O₃ ve toprak alkali oksitlerden oluşur. Bu cam, LCD panellerde kullanıldığından, homojenliği ve ortaya çıkan fizikokimyasal özellikleri geleneksel camlardan çok farklıdır [6]. Şu anda dört Asya ülkesindeki LCD panel üreticileri tarafından yılda yaklaşık 80 kt/yıl'a eşdeğer miktarda atık cam üretilmektedir. Seramik karolar, cam seramikler, köpük cam ve çimentoda LCD geri dönüşümüne yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır [7].

Sinterlenmiş camlar için tipik bir takviye, cilalama uygulamaları için aşındırıcı malzeme olarak ticari olarak temin edilebilen düşük maliyetli Al₂O₃ plakalarıdır. Al₂O₃ plakaları, son 10 yıldır sıcak preslenmiş cam matris kompozitlerini takviye etmek için başarıyla kullanılmaktadır. Soğuk presleme ve basınçsız viskoz akış sinterlemesi ile kompozitlerin üretimi üzerine bazı çalışmalar yürütülmüş ve uygun maliyetli bir işleme yöntemi elde edilmiştir. Bununla birlikte, Al₂O₃ plaka takviyeli cam-seramik matris kompozitlerine yönelik birkaç çalışma bulunmaktadır [8].

¹ Doç. Dr., Çukurova Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, Adana, Türkiye
ORCID: 0000-0003-0210-237X

Bu çalışma, doğrudan sinterleme yönteminin avantajlarını kullanarak geri dönüştürülmüş LCD cam ve Al_2O_3 plakalarının karışımından beyaz cam seramiklerin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Cam- seramik malzeme üretiminin şematik gösterimi

2. MATERYAL VE METOD

Tablo 1’de hammaddelerin bileşimi ve numunelerin hazırlanması için kullanılan hammadde yüzdeleri verilmiştir. Çalışmada, ana eksenleri 5 ile 10 mm arasında, aksenel oranı (kalınlık/ortalama çap) ≈ 0.2 olan, altıgen şekilli alfa-alümina, takviye malzemesi olarak kullanılmıştır (Microabrasives Co., Westfield, MA). Alfa-alüminanın yoğunluğu 3.99 g/cm^3 olarak kabul edilmiştir [9]. LCD camı öncelikle bilyalı değirmende ince bir toz haline getirilmiş ve ardından ortalama $90\mu\text{m}$ parçacık boyutuna kadar elenmiştir.

Tablo 1. Alümina plaka ve LCD atık camın kimyasal bileşimi ve cam seramik formülasyonu.

Oksit	LCD	Al ₂ O ₃ plaka
Kimyasal kompozisyon (% ağı)		
SiO ₂	64.2	99.5
Al ₂ O ₃	16.3	-
B ₂ O ₃	-	-
Na ₂ O	1	-
K ₂ O	-	-
MgO	1.4	-
CaO	8.2	-
Cr ₂ O ₃	-	-
SO ₃	-	-
SrO	3.2	-
Fe ₂ O ₃	-	-
TiO ₂	-	-
BaO	1.4	-
ZrO ₂	0.1	-
SnO ₂	0.2	-
Formülasyon (% ağı)		
LCD/ Al ₂ O ₃ plaka (K1)	95	5
LCD/ Al ₂ O ₃ plaka (K2)	90	10
LCD/ Al ₂ O ₃ plaka (K3)	80	20

Çalışmada üç ayrı karışım hazırlanmıştır ve sırasıyla K1(%95 Al₂O₃ plaka- %5 LCD) , K2 (%90 Al₂O₃ plaka- %10 LCD) ve K3 (%85 Al₂O₃ plaka- %15 LCD) olarak kodlanmıştır. Karışımlar ilk önce ayrı ayrı bilyalı değirmende homojenize edilerek ardından silindirik bir kalıpta 40 MPa'da tek eksenli basınca tabi tutularak 20 mm çapında şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numuneler 80°C'de 24 saat boyunca kurutuldu. Kurutulan örnekler sıcaklığı 950°C olan fırına doğrudan yerleştirilerek bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildi.

Sinterlenmiş disklerin yoğunluğu Arşimet prensibine göre ölçüldü. Her numune için en az on örnek test edildi.

Ön sinterleme testleri, 50 x 34 mm kesitli dikdörtgen bir kalıpta ince tozların preslenmesiyle elde edilen daha büyük karo numunelerine uygulanacak optimum koşulun seçilmesine olanak sağladı. Presleme ve kalıptan çıkarma kaynaklı kusurların varlığını en aza indirmek için, karışımlar polietilen glikol (PEG), eklenerek hazırlandı. Su bazlı karışımlar (%50 cam tozu ve %50 damıtılmış su) ilk olarak dakikada 300 devir hızda çalışan bilyalı değirmende 5 dakika süre ile homojenleştirildi. Ardından %3 ağırlıkça PEG eklenerek dakikada 300 devir hızda çalışan bilyalı değirmende 30 dakika süre ile tekrar homojenleştirildi Elde

homojen karışımlar 80 °C’de 12 saat kurutularak 150 µm parçacık boyutuna kadar elenmiştir.

Daha büyük numunelerin sinterleme işlemi, 40°C/dk ısıtma hızıyla 950°C olan fırına doğrudan yerleştirilerek bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Polietilen glikol (PEG) içeren numuneler, organik bileşenin uzaklaştırılması için 300°C’de ara bekletme aşamasına tabi tutulmuştur. Soğutmanın ardından numuneler, mekanik testler için 3x2x30 mm boyutlarında küçük kırışlar hâlinde kesilmiştir. Tüm kırışlar dikkatlice 5 µm yüzey pürüzlülüğüne kadar parlatılmıştır.

Young modülü (E), tahribatsız dinamik rezonans testi (GrindoSonic Mk5, Leuven, Belçika) ile ölçülmüştür. Dört noktalı eğme testleri (24 mm dış açıklık, 8 mm iç açıklık) Instron 1121 UTS cihazı (Instron, Danvers, MA, ABD) kullanılarak, 0.5 mm/dk çapraz kafa hızıyla gerçekleştirilmiştir. Her veri noktası, en az 10 adet bireysel testin ortalamasını temsil etmektedir.

Laboratuvar ölçekli hızlı pişirim fırınında sinterlenen karolara su emme testi TS EN ISO 1545-3 su emme tayinine göre; yoğunlukları ise Archimed prensibine göre ölçülerek hesaplanmıştır [10]. Her bir numune için en az 10 adet örnek analiz edilmiştir.

Numuneler, 15 N yük altında sertlik (Hv) değerini belirlemek amacıyla Vickers batma testi için kullanılmıştır. Güvenilir istatistiksel veriler elde edebilmek için, her numune üzerinde en az 15 adet batma izi yapılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tablo 2 ’de sinterlenen numunelerin su emme ve yoğunluk değerleri verilmiştir. K1 kodlu örnek en yüksek su emme değerine sahiptir ve dolayısıyla iç yapısında diğer karışımlara göre açık gözenekler daha fazladır. K3 kodlu örnek ise en düşük su emme ve diğer karışımlara göre de en düşük yoğunluk değeri göstermiştir.

Tablo 2. Farklı karışımlar için su emme ve yoğunluk değerleri

Numune	Su Emme (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
K1	2.3	1.1
K2	2.0	1.2
K3	1.5	1.8

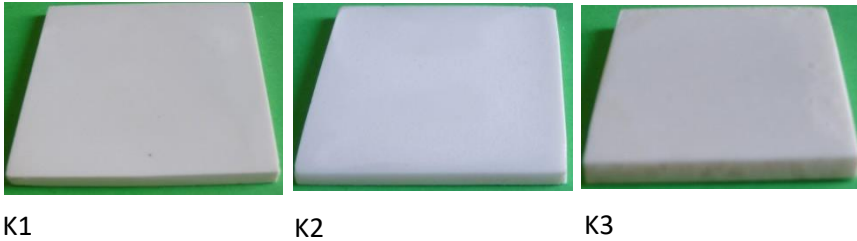
Düşük yoğunluk değeri beraberinde yüksek gözeneklilik ve fazla su emme değeri getirir [11].

Tablo 3. K1, K2 ve K3 numunelerine ait teknik sonuçlar

Numune	Elastik modül (GPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Vickers Sertliği (Hv)
K1	34.49	68.64	517
K2	36.49	69.85	627
K3	39.87	79.23	649

Tablo 3’den de görüleceği üzere K1 kodlu numune en düşük eğilme dayanımına sahiptir. Bunun nedeninin K1 kodlu numunenin diğer numunelerden daha yüksek su emme değerine sahip olmasından kaynaklı olduğu söylenebilir. Gözeneklilik arttıkça eğilme dayanımı azalır ve gözenekler kırılma başlatıcı zayıf noktalar oluşturur Benzer şekilde gözeneklilik arttıkça elastik modül düşer. Çünkü gözenekler yük aktarımını kesintiye uğratar [12].

Şekil 3’de sinterlenmiş beyaz renkli numunelerin görseli yer almaktadır. Beyaz gövdeli karo üretimi genellikle porselen veya yüksek kaliteli duvar karolarında tercih edilir. Beyaz karoların renk değişimiyle yaşlanma belirtileri (örneğin UV etkisi) daha az olur [13].



Şekil 2. Sinterlenmiş beyaz renkli karolar

Seramik karoların performansını belirleyen en önemli özellikler genellikle rijitlik (elastik modül), kırılmaya karşı direnç (eğilme dayanımı) ve aşınmaya karşı direnç (sertlik) gibi mekanik özelliklerdir. Sonuç olarak K3, incelenen üç mekanik özellik açısından en yüksek performansı sergilemektedir. Bu, K3’ün en rijit, eğilmeye en dayanıklı ve en sert numune olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Manfredini, T., Pellacani, G.C., Rincón, J.Ma. (2012). Glass–Ceramic Materials Fundamentals and Applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93, 104-112.
- [2] Karamanov, A., Gutzow, I., Chomakov, I., Christov, J., Kostov, L. (1994). Synthesis of wall-covering glass-ceramics from waste raw materials. *Glass Science and Technology*, 67(8), 227-230.
- [3] Karamanov, A., Taglieri, G., Pelino, M. (1999). Iron-rich sintered glass ceramics from industrial wastes. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(11), 3012-3016.
- [4] Karamanov, A., Piscicella, P., Cantalini, C., Pelino, M. Influence of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ Ratio on the Crystallization of Iron-Rich Glasses Made with Industrial Wastes. *J. Am. Ceram. Soc.*, 83(12), 3153-3157.
- [5] Karamanov, A., Pelino, M., Hreglich, S. (2003). Sintered glass-ceramics from municipal solid waste-incinerator fly ashes-part I: the influence of the heating rate on the sinter-crystallization. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 23, 827-832.
- [6] Ellison, A., Cornejo, I.A., (2010). Glass substrate for liquid crystal displays. *Int. J. Appl. Glass Sci.*, 1, 87-103.
- [7] Cetin, S. (2023). Production of sintered glass-ceramic composites from low cost materials. *Ceramics International*, 49(13), 22386-22392.
- [8] Bernardo, E., Scarinci, G., (2004). Sintering behaviour and mechanical properties of Al_2O_3 platelet-reinforced glass matrix composites obtained by powder technology. *Ceramics International*, 30(5), 785-791.
- [9] Bernardo, E., Andreola, F., Barbieri, L., Lancellotti, I., (2005). Sintered glass ceramics and glass-ceramic matrix composites from CRT panel glass. *J. Am. Ceram. Soc.*, 88 (7), 1886–1891.
- [10] ISO 10545-3:2018 - Ceramic tiles - Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density.
- [11] Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics* (2nd ed.), Wiley-Interscience.
- [12] Carty, W. M., & Senapati, U. (1998). Porcelain—Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1), 3–20.
- [13] Richerson, D. W., & Lee, W. E. (2018). *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design* (4th ed.). CRC Press.

14. Bölüm

Sanayii Tipi Chiller İçin Verimlilik ve Performans Analizi

Emre TARGAY¹, Mustafa Tahir AKKOYUNLU², Mehmet AKGÜL³

ÖZET

Ülkemizde ve dünyada ısıtma, soğutma ve iklimlendirmenin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Artan şehirleşme ve nüfus yoğunluğu, enerji talebini önemli ölçüde artırmakta ve bu talep karşısında HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemlerinin rolünü kritik hale getirmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, bina ve bina inşaatı sektörleri küresel nihai enerji tüketiminin üçte birinden fazlasını oluşturmaktadır [1]. İnsanların yaşam ve çalışma alanlarındaki konfor koşullarının sağlanması ile birlikte enerjinin verimli kullanımı, sürdürülebilir kalkınmanın en temel unsurlarından biri haline gelmiştir [2–4].

Her geçen gün önemi artan soğutma, ısıtma ve iklimlendirme teknolojilerinin daha optimal şekilde kullanılması, enerjide tasarrufun ön plana çıkarılması ve seçilecek sistemin performans açısından yeterliliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar, gelişmekte olan ülkelerde HVAC sistemlerinin binalardaki toplam enerji tüketiminin yaklaşık yarısını oluşturduğunu göstermektedir [3]. Küresel ısınma sonucu ortaya çıkan iklim değişiklikleri de dikkate alındığında, yapılacak tüm mühendislik hesaplamalarının titizlikle gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [4,5].

Bu bağlamda soğutma sistemleri gerek bireysel gerekse endüstriyel ölçekte iklimlendirme sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Chiller sistemleri ise özellikle büyük ölçekli yapılarda ve endüstriyel tesislerde enerji verimliliği açısından öne çıkan soğutma çözümleri olarak ön plana çıkmaktadır [6,7]. Ancak bu sistemlerde yanlış tasarım yapılması durumunda, sistem kapasitesinin gereğinden fazla veya yetersiz seçilmesi; ilk yatırım maliyetini, enerji tüketimini ve amortisman süresini doğrudan etkilemektedir [8]. Özellikle başlangıç

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, radonmaster25@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3214-3173>

² Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

³ Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

aşamasında yapılan hatalar, sistemin verimsiz çalışmasına ve işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır [9].

Son yıllarda literatürde, chiller performansının artırılması ve enerji tüketiminin optimize edilmesi üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Seven (2020), kondenser ünitesine evaporatif soğutma uygulayarak chiller verimliliğinde yaklaşık %11 oranında artış elde edildiğini göstermiştir [10]. İmal ve arkadaşları (2015), su soğutmalı chiller sistemini jeotermal enerji ile karşılaştırarak enerji verimliliği açısından olumlu sonuçlara ulaşmışlardır [11]. Kyere ve arkadaşları (2023), parametre bazlı analizlerinde soğuk su set sıcaklığının yükseltilmesiyle sistemin yaklaşık %5 enerji tasarrufu potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [12]. Benkhalfallah ve arkadaşları (2025) ise makine öğrenmesi tabanlı regresyon modelleriyle chiller enerji tüketiminin yüksek doğrulukla tahmin edilebildiğini ve bunun bina enerji yönetiminde kritik rol oynayabileceğini rapor etmişlerdir [13].

Bu çalışmada, bir chiller sisteminin ne olduğu, çalışma prensibi, kullanım alanları ve tasarım süreci kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. Özellikle chiller tasarımında temel bir kriter olan soğutma kapasitesinin hesaplanması, sistem verimliliği ve performansı açısından ayrıntılı biçimde incelenecektir. Ayrıca, sistem tasarımı yapılırken soğutucu akışkan seçimi, akışkanın termodinamik özellikleri, çevresel etkileri ve enerji verimliliğine katkısı detaylandırılacaktır.

Bu bölüm, mühendislik öğrencilerine chiller sistemleriyle ilgili teorik altyapıyı kazandırmayı ve gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilecek bir tasarım bakış açısı geliştirmeyi hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Chiller, Enerji Verimliliği, Soğutma

ABSTRACT

The importance of heating, cooling, and air conditioning is increasing day by day both in our country and around the world. Rapid urbanization and population growth significantly increase energy demand, making the role of HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) systems more critical. According to the International Energy Agency (IEA), the building and construction sectors account for more than one-third of global final energy consumption [1]. Ensuring comfort conditions in residential and working environments, along with the efficient use of energy, has become one of the fundamental elements of sustainable development [2–4].

The optimal use of heating, cooling, and air conditioning technologies, which are becoming increasingly important, highlights the need for energy savings and the selection of efficient systems. Studies show that in developing countries, HVAC systems account for approximately half of the total energy consumption in buildings [3]. Considering the impacts of global warming and resulting climate change, all engineering calculations must be performed with utmost precision [4,5].

In this context, cooling systems form the basis of air conditioning systems both in individual and industrial applications. Among these, **chiller systems** stand out as efficient cooling solutions, especially in large-scale buildings and industrial facilities [6,7]. However, improper design in these systems—either oversizing or undersizing—directly affects initial investment cost, energy consumption, and payback period [8]. Mistakes made during the initial design phase lead to system inefficiency and increased operating costs [9].

In recent years, numerous studies have focused on improving chiller performance and optimizing energy consumption. Seven (2020) demonstrated that applying evaporative cooling to the condenser unit increased chiller efficiency by approximately 11% [10]. Imal et al. (2015) compared water-cooled chillers with geothermal energy systems, reporting favorable outcomes in terms of energy efficiency [11]. Kyere et al. (2023) showed that raising chilled water setpoints could lead to about 5% energy savings in chiller systems [12]. More recently, Benkhalfallah et al. (2025) reported that machine learning-based regression models could predict chiller energy consumption with high accuracy, providing significant contributions to building energy management [13].

This study aims to comprehensively examine what a chiller system is, its working principle, application areas, and design process. Particular attention will be given to the calculation of cooling capacity, a key criterion in chiller design, as well as system efficiency and performance. Furthermore, the process of

selecting refrigerants will be explained in detail, considering thermodynamic properties, environmental impacts, and energy efficiency criteria.

This section is intended to provide engineering students with the theoretical foundation related to chiller systems and to develop a design perspective applicable to real-world engineering practices.

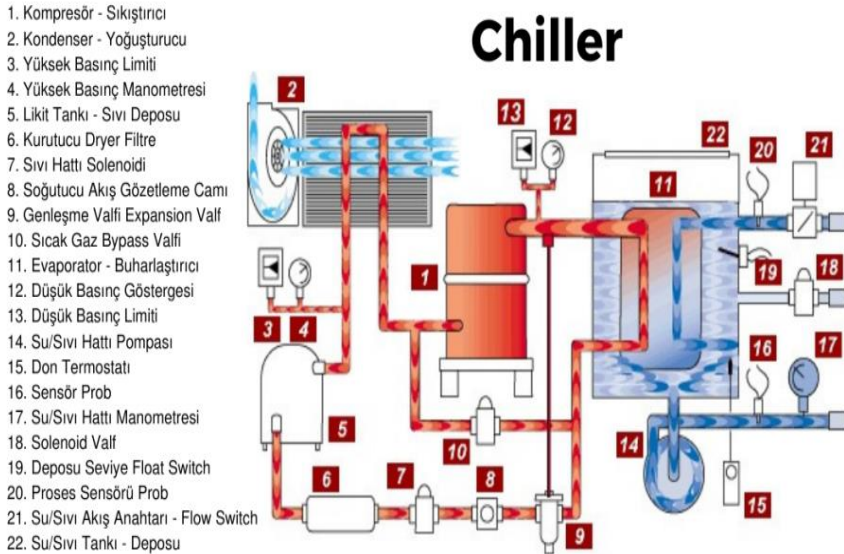
Keywords: Chiller, Energy Efficiency, Cooling

1. CHILLER NEDİR?

Chiller, merkezi iklimlendirme sistemlerinde kullanılan ve temel görevi soğutma çevrimleri aracılığıyla bir akışkanın (çoğunlukla su veya tuzlu su çözeltileri) sıcaklığını düşürmek olan bir ısı değiştirici cihazdır. Bu işlem, buhar sıkıştırmalı veya absorpsiyonlu çevrim prensiplerine dayalı olarak gerçekleştirilir [14,15]. Sistem; evaporatör, kondenser, kompresör ve genleşme vanasından oluşan temel bileşenlerin etkileşimi ile çalışır ve bu bileşenler arasındaki termodinamik süreçler aracılığıyla ısı transferi sağlar [16].

Chiller sistemleri tarafından üretilen soğutulmuş su (chilled water), fan-coil üniteleri, hava işleme cihazları (AHU) veya endüstriyel proseslerde dolaştırılarak ortamların veya üretim süreçlerinin istenen sıcaklıkta tutulmasını sağlar [17]. Bu nedenle chillerler; oteller, hastaneler, alışveriş merkezleri, yüksek katlı ofisler, veri merkezleri ve endüstriyel tesisler gibi büyük ölçekli yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir [18,19].

Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde, chiller sistemleri iklimlendirme teknolojilerinin en kritik bileşenlerinden biridir. Uygun tasarım, işletme ve periyodik bakım koşulları sağlandığında, toplam enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahiptirler [20]. Bu nedenle, chiller sistemlerinin doğru tanımlanması, soğutma kapasitesi, performans katsayısı (COP) gibi parametrelerinin belirlenmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, sürdürülebilir bina tasarımı ve endüstriyel uygulamalar için büyük önem taşımaktadır [21,22].



Şekil 1. Su Soğutmalı Chiller Ünitesi İçyapı Ve Malzeme İsimleri [23]



Şekil 2. Hava Soğutmalı Chiller Cihazının Dış Ünitesi [24]

2. CHİLLER ÇEŞİTLERİ

Chiller’lar (soğutma grupları), endüstride, binalarda ve proseslerde soğutma ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Çalışma prensiplerine, yoğuşma tiplerine ve kullanım alanlarına göre farklı çeşitleri vardır. Temel chiller çeşitlerini şu şekilde sınıflandırılır;

2.1. Yoğuşma Tipine Göre Chiller Çeşitleri

• Su Soğutmalı Chiller

- Kondenser tarafında soğutma suyu kullanılır (soğutma kuleleri ile).
- Büyük ölçekli projelerde tercih edilir.
- Bakım ihtiyacı daha fazladır.

• Hava Soğutmalı Chiller

- Kondenser tarafında hava kullanılır (fanlarla).
- Kurulumu kolaydır, ek soğutma kulesine gerek yoktur.
- Genellikle orta ve küçük ölçekli uygulamalarda kullanılır.

2.2. Kompresör Tipine Göre Chiller Çeşitleri

• Vidalı (Screw) Chiller

- Orta ve büyük kapasitelerde kullanılır.
- Sessiz ve verimli çalışır.

- **Santrifüj Chiller**
 - Çok büyük soğutma kapasiteleri için uygundur.
 - Enerji verimliliği yüksektir.
- **Scroll (Sarmal) Chiller**
 - Küçük ve orta ölçekli kapasitelere uygundur.
 - Daha kompakt ve ekonomiktir.
- **Pistonlu (Reciprocating) Chiller**
 - Eski teknoloji olup günümüzde daha az tercih edilir.
 - Küçük kapasiteler için kullanılabilir.

2.3. Soğutma Döngüsü Tipine Göre

- **Kompresörlü (Mekanik) Chiller**
 - Buhar sıkıştırma çevrimi ile çalışır.
 - En yaygın kullanılan tiptir.
- **Absorpsiyonlu (Absorption) Chiller**
 - Elektrik yerine ısı enerjisi (buhar, sıcak su, atık ısı) kullanır.
 - Daha az elektrik tüketir, fakat ilk yatırım maliyeti yüksektir.
 - Çevreci ve sessizdir.

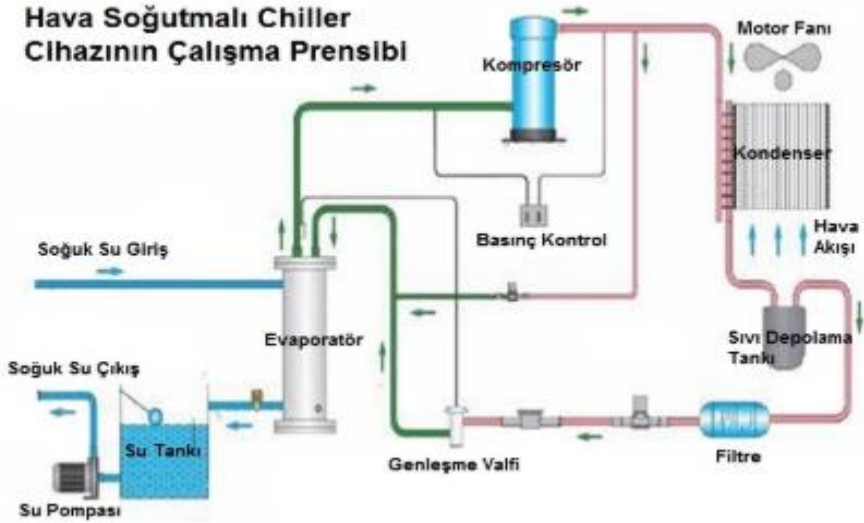
2.4. Kullanım Alanına Göre

- **Endüstriyel Chiller**
 - Proses soğutmalarında (plastik enjeksiyon, gıda, kimya vb.) kullanılır.
- **Konfor Chiller'ı (HVAC)**
 - Büyük binalar, AVM'ler, oteller gibi iklimlendirme sistemlerinde kullanılır.

3. CHILLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Chiller sistemleri, modern iklimlendirme ve endüstriyel süreçlerde yaygın olarak kullanılan, temel görevi belirli bir akışkanın sıcaklığını düşürerek soğutulmuş su üretmek olan termodinamik cihazlardır. Çalışma prensipleri genel olarak iki ana grupta incelenmektedir: buhar sıkıştırmalı chillerler ve absorpsiyonlu chillerler. Buhar sıkıştırmalı sistemlerde evaporatörde soğutucu akışkanın buharlaştırılmasıyla ısı soğutulması istenen sudan çekilir; ardından kompresör, soğutucu akışkanı yüksek basınca çıkararak kondenserde yoğunlaştırır ve ısı dış ortama atılır. Genleşme valfi aracılığıyla basınç düşürülerek çevrim tamamlanır. Absorpsiyonlu sistemlerde ise elektrik enerjisi yerine termal enerji kullanılır ve genellikle lityum bromür-su veya amonyak-su çözeltileri tercih edilir. Bu sistemlerin performansı, özellikle soğutma kapasitesi, enerji verimliliği ve çevresel etki açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, chiller tasarımında soğutma kapasitesinin doğru hesaplanmasının,

çalışma akışkanının termodinamik özellikleri ve çevresel etkiler göz önüne alınarak seçilmesinin hem enerji verimliliğini artırdığını hem de sistemin uzun vadeli işletme maliyetlerini düşürdüğünü ortaya koymaktadır [25].



Şekil 3. Hava Soğutmalı Chillerin Şematik Gösterimi [26]

4. CHİLLERİ OLUŞTURAN TEMEL EKİPMANLAR

Bir chilleri oluşturan parçalar sırasıyla kompresör, evaporatör, kondenser ve genişleme vanasıdır. Her bir komponentin kendine özgü özellikleri ve değerleri mevcuttur. Bu cihazların görevleri sırası ile şu şekildedir.

4.1 Kompresörler

Kompresör, buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimlerinde düşük basınç ve sıcaklıktaki soğutucu akışkanın yüksek basınç ve sıcaklığa çıkararak çevrimin sürekliliğini sağlayan mekanik bir elemandır. Bu işlem sırasında akışkanın entalpisi artar ve kondenser girişinde süper ısıtılmış buhar hâline gelir. Kompresörler temel olarak pozitif deplasmanlı (pistonlu, vidalı, scroll) ve dinamik (santrifüj, eksenel) tipleri olarak sınıflandırılır. Kompresörün verimi, sistemin genel enerji performansını doğrudan etkileyen bir unsurdur [27].

4.2 Evaporatör

Evaporatör, soğutma çevrimlerinde soğutulacak akışkandan ısıyı alarak bu ısının soğutucu akışkana aktarılmasını sağlayan ısı değiştiricisidir. Bu süreçte soğutucu akışkan düşük basınçta buharlaşarak çevrimin devamı için gerekli

enerjiyi emer. Evaporatörler, sistemin türüne göre genellikle kabuk-boru (shell and tube) veya plakalı (plate type) yapıdadır. Etkin bir evaporatör tasarımı, ısı transfer yüzey alanı, akış düzeni ve soğutucu akışkan özellikleri gibi parametrelere bağlı olarak sistem verimliliğini doğrudan etkiler [28].

4.3 Kondenser

Kondenser, buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimlerinde kompresörden çıkan yüksek basınç ve sıcaklıktaki soğutucu buharın ısını çevre ortamına aktararak yoğunlaşmasını sağlayan ısı değiştiricisidir. Bu işlem sonucunda soğutucu akışkan, sıvı faza geçerek çevrimin bir sonraki aşamasına (genleşme vanası) gönderilir. Kondenserler genellikle hava soğutmalı veya su soğutmalı tiplerde tasarlanır. Kondenserin ısı transfer verimi, sistemin genel soğutma kapasitesi ve enerji performans katsayısı (COP) üzerinde doğrudan etkilidir [28].

4.4 Genleşme Vanası

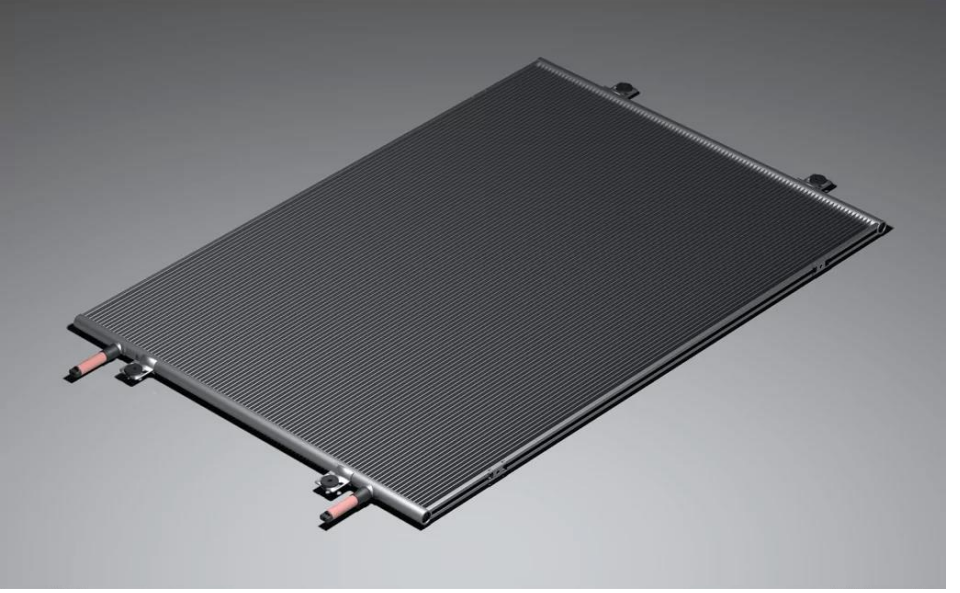
Genleşme vanası (expansion valve), buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimlerinde yüksek basınçlı sıvı soğutucu akışkanın basıncını düşürerek evaporatöre girmesini sağlayan bir kontrol elemanıdır. Basınç düşüşü sonucunda soğutucu akışkanın sıcaklığı da azalır ve bu sayede evaporatörde ısı emme süreci gerçekleşir. Genleşme vanaları genellikle termostatik, elektronik veya kılcal boru (capillary tube) tiplerinde üretilir. Uygun genleşme elemanı seçimi, sistemin stabilitesi ve enerji verimliliği açısından kritik öneme sahiptir [29].



Şekil 4. Chiller grubunda kullanılan kompresör [30].



Şekil 5. Chiller grubunda kullanılan evaporatör [31].



Şekil 6. Chiller grubunda kullanılan kondenser [32]



Şekil 7. Chiller grubunda kullanılan genleşme valfi [33]

5. MATERYAL VE METODLAR

Chiller grubunu oluşturan ekipmanlar ve bunların teknik katalogları Danfoss Coolselector v2 programından alınmıştır. Alınan bu teknik bilgilerin ışığı doğrultusunda gerekli seçimler yapılmış olup sisteme en uygun şekilde entegrasi yapılmıştır. Bunun sonucunda ise karşılaştırmalı olarak değerler alınmıştır. Elde edilen veriler içinde kullanılan ekipmanların değişkenlik göstermesiyle ortaya çıkmıştır.

Standart sürüm için seçim şartları ise şu şekildedir;

Soğutucu Akışkan R410A

Dış Hava Sıcaklığı 35°C

Kondenzasyon Sıcaklığı 50 °C

Su Giriş Sıcaklığı 12 °C

Su Çıkış Sıcaklığı 7 °C

Subcooling 5°C

Superheating 5°C

Evaporasyon Sıcaklığı 2°C

Kompresör modeli olarak: DSH 240-4 Hermetik-Scroll

Kondenser modeli olarak: D 2000

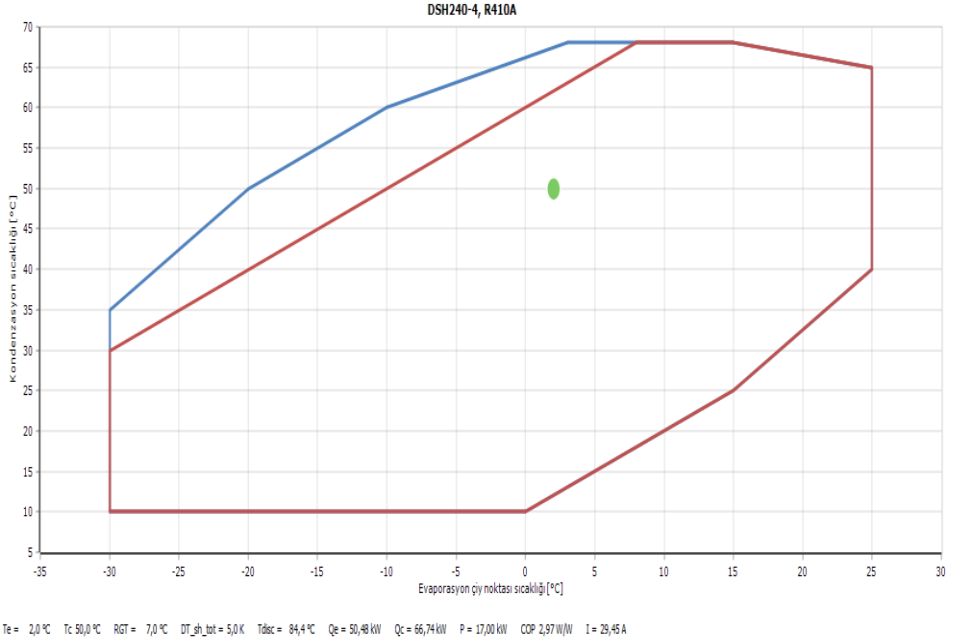
Hava Debisi: 21250 m³/h

Genleşme Valfi: ETS Colibri 24C-12

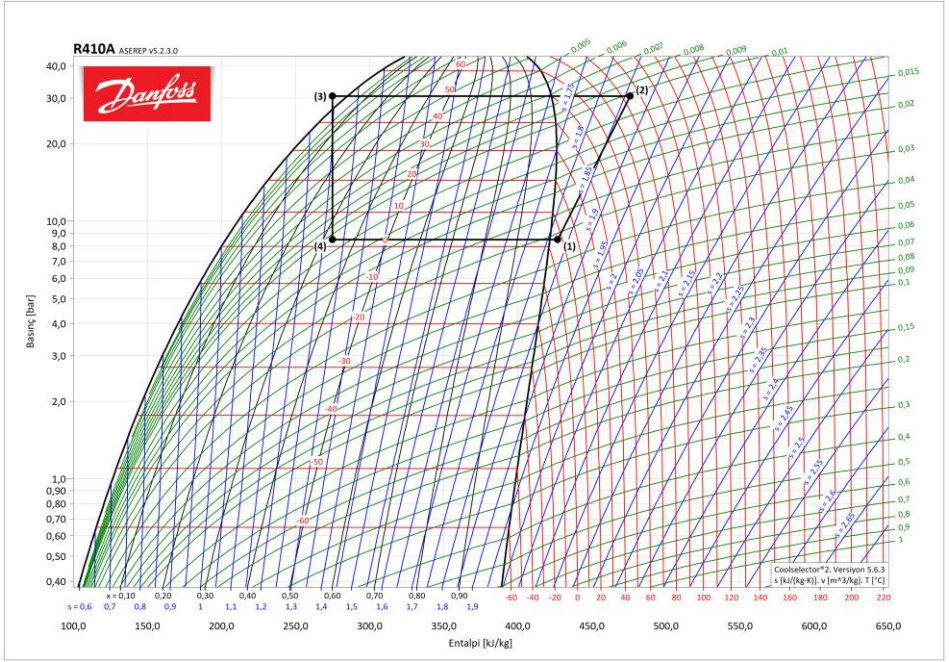
Kondenser Tipi: MCHE D2000-C Danfoss

Fan Modeli: EBM Papst W3G800-NV05-10 kullanılmıştır.

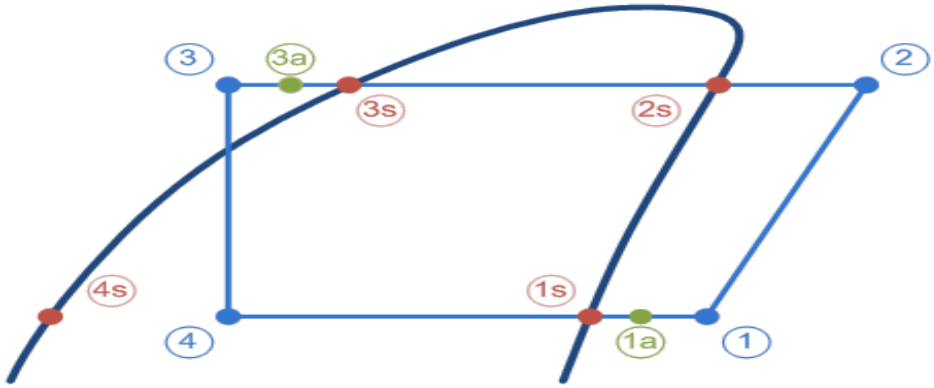
Standart sürüm için bu veriler referans alınmıştır. Diğer alınan veriler bu verilerin değiştirilmiş hali olacaktır. Elde edilen bilgiler doğrultusunda chiller gruplarının verimlerinin hesabı yapılacak olup kullanışlı olan chiller grubu seçilecektir.



Şekil 8. Standart Sürümün Çalışma Zarfını Gösteren Grafik



Şekil 9. Standart Sürümün Log-Ph Grafik Değerleri



Şekil 10. Standart Sürümün Çalışma Koşulları

		Sıcaklık	Basınç (a)	Yoğunluk	Entalpi	Entropi
Nokta	Açıklama	[°C]	[bar]	[kg/m ³]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	7,0	8,485	31,4	426,8	1,824
2	Kompresör basması (tahmini)	84,4	30,54	97,37	475,8	1,86
2s	Kondenzasyon çiy noktası	50,0	30,54	139,8	422,6	1,703
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	49,9	30,54	913,1	284,8	1,278
3a	Kondenser çıkış	44,9	30,54	948,2	274,9	1,248
3	İlave aşırı soğutma dahildir	44,9	30,54	948,2	274,9	1,248
4	Genleşme valfinden sonra	1,9	8,485	93,3	274,9	1,272
4s	Evaporasyon kaynama noktası	1,9	8,485	1163	202,9	1,011
1s	Evaporasyon çiy noktası	2,0	8,485	32,5	421,5	1,805
1a	Evaporatör çıkış	7,0	8,485	31,4	426,8	1,824

Şekil 11. Standart Sürümün Çalışma Koşulları Verileri

Standart sürüm için EF200-4 modeli, R410A soğutkan gazı kullanılarak tasarlanmış, yüksek verimli bir soğutma sistemidir. Sistem, kondenzasyon sıcaklığı 50 °C, evaporasyon sıcaklığı 2 °C, ortam sıcaklığı 35 °C ve su girişi/çıkışı sıcaklıkları 12 °C/7 °C olacak şekilde standart çalışma koşullarında değerlendirilmiştir. Ayrıca, SH (Superheat) değeri 5 °C ve SC (Subcooling) değeri 5 °C olarak belirlenmiştir.

Ünite içerisinde 4 adet DSH 240 model hermetik scroll kompresör bulunmaktadır. Her bir kompresörün kapasitesi 50,48 kW olup, toplam soğutma kapasitesi 201,92 kW'tır. Her kompresör 17 kW giriş gücü ile çalışmakta ve sistemin toplam kompresör güç tüketimi 68 kW'tır.

Kondenser tarafında D-2000 modelinden 4 adet kullanılmıştır. Kondenserlerin toplam güç ihtiyacı 269,92 kW olarak hesaplanmıştır. Kondenser fanları Ø800 mm çapında olup, 4 adet fanla birlikte 1,2 kW güç tüketmektedir. Her bir kondenserin kapasitesi 89,8 kW olarak hesaplanmış olup, 21250 m³ debide toplam kondenser kapasitesi 359,2 kW'a ulaşmaktadır.

Sistemin toplam elektriksel güç tüketimi 72,8 kW olup, buna karşılık EER (Enerji Verimlilik Oranı) değeri 2,77'dir. Bu değer, cihazın enerji açısından verimli çalıştığını göstermektedir. Evaporatör kapasitesi 270 kW olup, genellikle plakalı veya borulu tip ısı değiştiriciyle desteklenmektedir. Genleşme elemanı olarak ise 2 adet ETS Colibri 24C-12 model genleşme vanası kullanılmıştır.

Medium sürüm için seçim şartları ise şu şekildedir;

Soğutucu Akışkan R410A

Dış Hava Sıcaklığı 35°C

Kondenzasyon Sıcaklığı 50 °C

Su Giriş Sıcaklığı 12 °C

Su Çıkış Sıcaklığı 7 °C

Subcooling 5°C

Superheating 5°C

Evaporasyon Sıcaklığı 3°C

Kompresör modeli olarak: DSH 240-4 Hermetik-Scroll

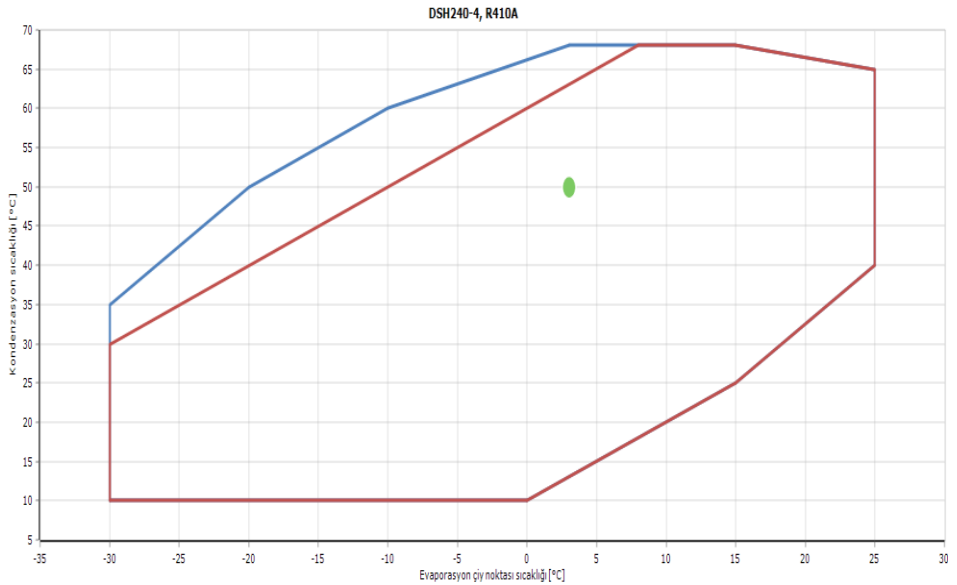
Kondenser modeli olarak: D 2000

Hava Debisi: 21250 m³

Genleşme Valfi: ETS Colibri 24C-12

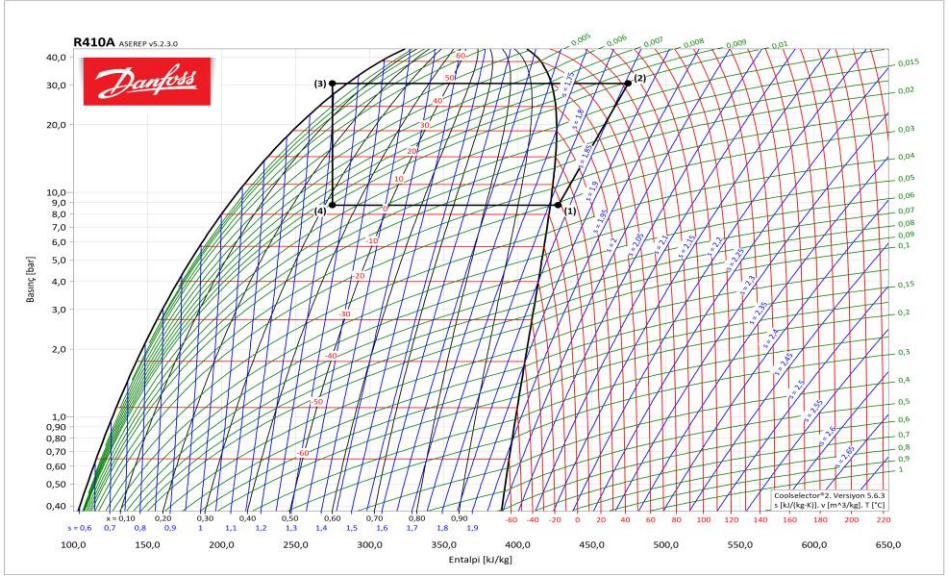
Kondenser Tipi: MCHE D2000-C Danfoss

Fan Modeli: EBM Papst W3G800-NV05-10 kullanılmıştır.

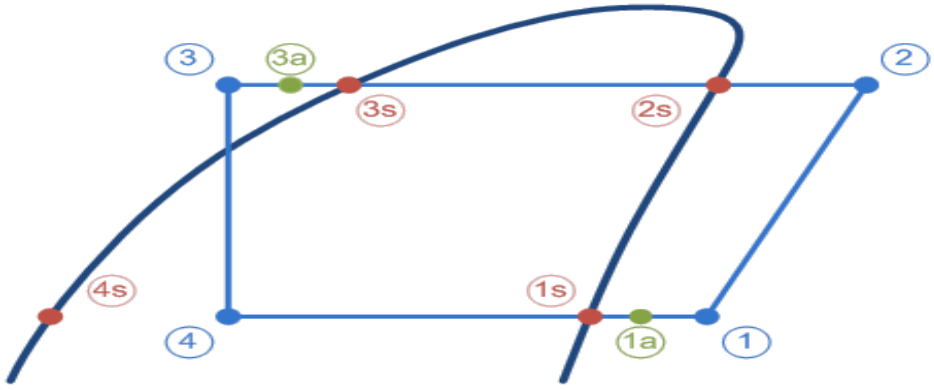


Te = 3,0 °C Tc 50,0 °C RGT = 8,0 °C DT_{gh}_{tot} = 5,0 K Tdec = 83,3 °C Qe = 52,32 kW Qc = 68,54 kW P = 17,01 kW COP 3,08 W/W I = 29,46 A

Şekil 12. Medium Sürümün Çalışma Zarfını Gösteren Grafik



Şekil 13. Medium Sürümün Detaylı Log-Ph Grafiği



Şekil 15. Medium Sürümün Çalışma Koşulları

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç (a) [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	8,0	8,754	32,41	427,2	1,823
2	Kompresör basması (tahmini)	83,3	30,54	98,1	474,4	1,856
2s	Kondenzasyon çiy noktası	50,0	30,54	139,8	422,6	1,703
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	49,9	30,54	913,1	284,8	1,278
3a	Kondenser çıkış	44,9	30,54	948,2	274,9	1,248
3	İlave aşırı soğutma dahildir	44,9	30,54	948,2	274,9	1,248
4	Genleşme valfinden sonra	2,9	8,754	97,51	274,9	1,271
4s	Evaporasyon kaynama noktası	2,9	8,754	1159	204,4	1,016
1s	Evaporasyon çiy noktası	3,0	8,754	33,55	421,8	1,803
1a	Evaporatör çıkış	8,0	8,754	32,41	427,2	1,823

Şekil 15. Medium Sürümün Çalışma Koşul Değerleri

Medium sürümü için EF200-4 modeli, R410A soğutkan gazı kullanılarak tasarlanmış, yüksek verimli bir soğutma sistemidir. Sistem, kondenzasyon sıcaklığı 50 °C, evaporasyon sıcaklığı 3 °C, ortam sıcaklığı 35 °C ve su giriş/çıkış sıcaklıkları 12 °C/7 °C olacak şekilde standart çalışma koşullarında değerlendirilmiştir. Ayrıca, SH (Superheat) değeri 5 °C ve SC (Subcooling) değeri 5 °C olarak belirlenmiştir.

Ünite içerisinde 4 adet DSH 240 model hermetik scroll kompresör bulunmaktadır. Her bir kompresörün kapasitesi 52,32 kW olup, toplam soğutma kapasitesi 209,28 kW'tır. Her kompresör 17,01 kW giriş gücü ile çalışmakta ve sistemin toplam kompresör güç tüketimi 68,04 kW'tır.

Kondenser tarafında D-2000 modelinden 4 adet kullanılmıştır.. Kondenserlerin toplam güç ihtiyacı 277,32 kW olarak hesaplanmıştır. Kondenser fanları Ø800 mm çapında olup, 4 adet fanla birlikte 1,2 kW güç tüketmektedir. Her bir kondenserin kapasitesi 89,8 kW olduğu hesaplanmıştır bunun sonucunda, 21250 m³ debide toplam kondenser kapasitesi 359,2 kW'a ulaşmaktadır.

Sistemin toplam elektriksel güç tüketimi 72,84 kW olup, buna karşılık EER (Enerji Verimlilik Oranı) değeri 2,87'dir. Bu değer, cihazın enerji açısından verimli çalıştığını göstermektedir. Evaporatör kapasitesi 280 kW olup, genellikle plakalı veya borulu tip ısı değiştiriciyle desteklenmektedir. Genleşme elemanı olarak ise 2 adet ETS Colibri 24C-12 model genleşme vanası kullanılmıştır.

Large sürüm için seçim şartları ise şu şekildedir;

Soğutucu Akışkan R410A

Dış Hava Sıcaklığı 35°C

Kondenzasyon Sıcaklığı 49 °C

Su Giriş Sıcaklığı 12 °C

Su Çıkış Sıcaklığı 7 °C

Subcooling 5°C

Superheating 5°C

Evaporasyon Sıcaklığı 3°C

Kompresör modeli olarak: DSH 240-4 Hermetik-Scroll

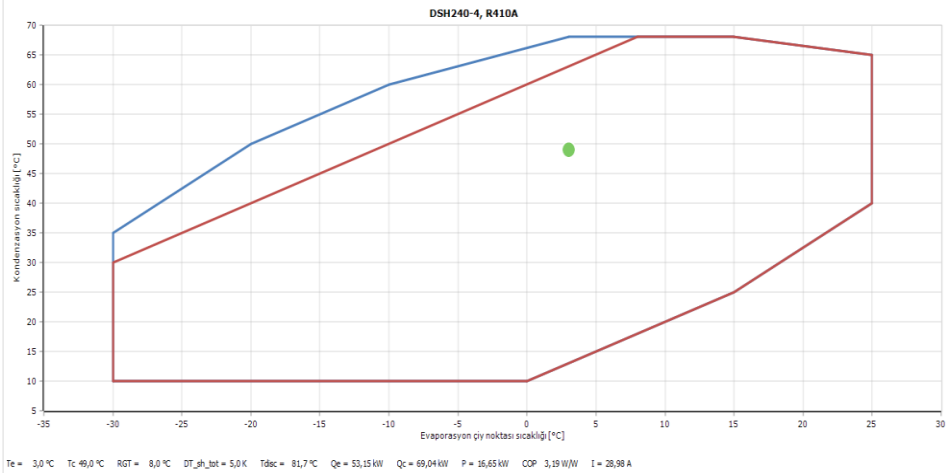
Kondenser modeli olarak: D 2000

Hava Debisi: 21250 m³

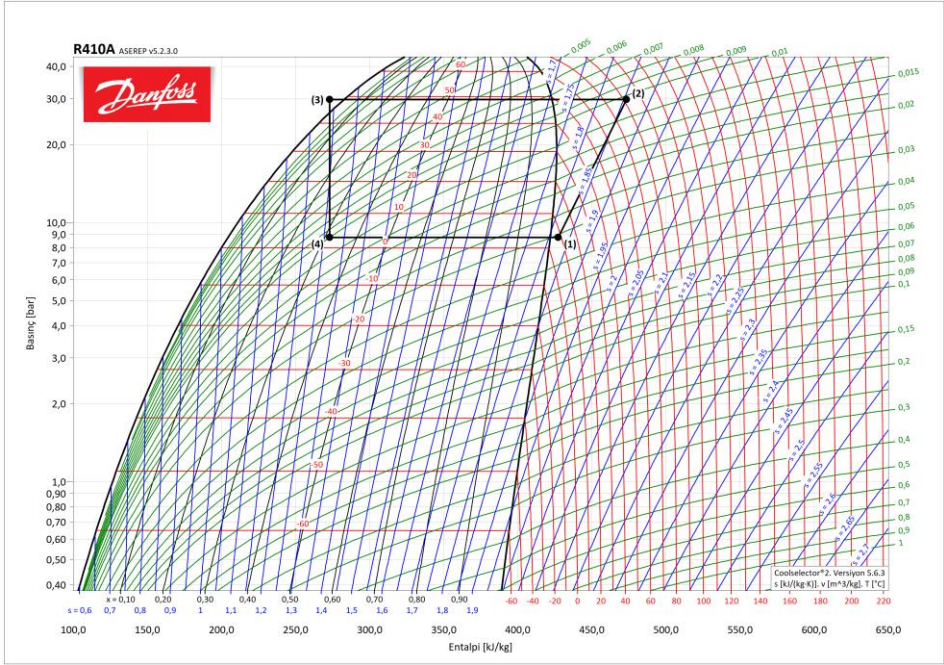
Genleşme Valfi: ETS Colibri 24C-12

Kondenser Tipi: MCHE D2000-C Danfoss

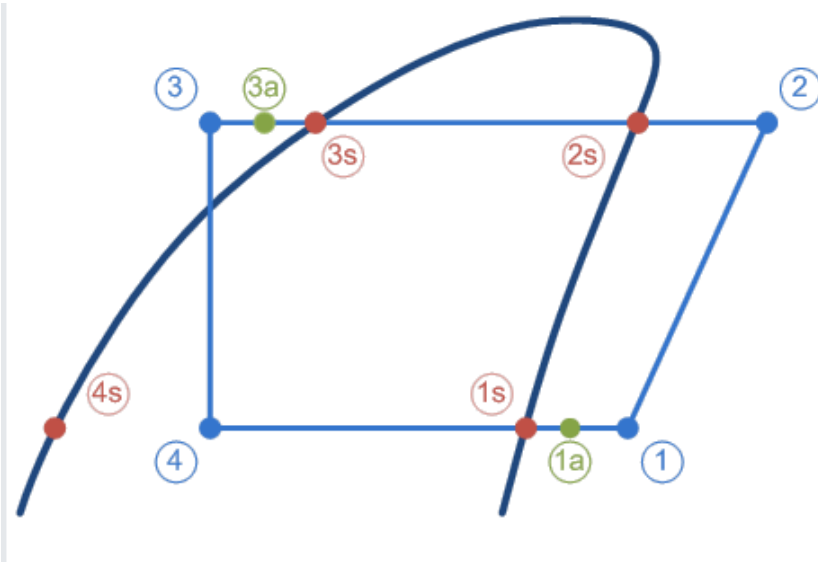
Fan Modeli: EBM Papst W3G800-NV05-10 kullanılmıştır.



Şekil 16. Large Sürümün Çalışma Zarfını Gösteren Grafik



Şekil 17. Large Sürümün Detaylı Log-Ph Grafiği



Şekil 18. Large Sürümün Çalışma Koşulları

		Sıcaklık	Basınç (a)	Yoğunluk	Entalpi	Entropi
Nokta	Açıklama	[°C]	[bar]	[kg/m ³]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	8,0	8,754	32,41	427,2	1,823
2	Kompresör basması (tahmini)	81,7	29,84	96,15	473,2	1,855
2s	Kondenzasyon çiy noktası	49,0	29,84	135,4	423	1,706
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	48,9	29,84	920,5	282,8	1,272
3a	Kondenser çıkış	43,9	29,84	954,7	273	1,242
3	İlave aşırı soğutma dahildir	43,9	29,84	954,7	273	1,242
4	Genleşme valfinden sonra	2,9	8,754	100	273	1,264
4s	Evaporasyon kaynama noktası	2,9	8,754	1159	204,4	1,016
1s	Evaporasyon çiy noktası	3,0	8,754	33,55	421,8	1,803
1a	Evaporatör çıkış	8,0	8,754	32,41	427,2	1,823

Şekil 19. Large Sürümün Çalışma Koşul Değerleri

Large sürümü için EF200-4 modeli, R410A soğutkan gazı kullanılarak geliştirilmiş, yüksek performanslı bir soğutma sistemidir. Sistem, kondenzasyon sıcaklığı 49 °C, evaporasyon sıcaklığı 3 °C, ortam sıcaklığı 35 °C ve su giriş/çıkış sıcaklıkları 12 °C/7 °C olacak şekilde standart çalışma koşullarında değerlendirilmiştir. Ayrıca, SH (Superheat) değeri 5 °C ve SC (Subcooling) değeri 5 °C olarak belirlenmiştir.

Ünite içerisinde 4 adet DSH 240 model hermetik scroll kompresör bulunmaktadır. Her bir kompresörün kapasitesi 53,15 kW olup, toplam soğutma kapasitesi 212,6 kW'tır. Her kompresör 16,65 kW giriş gücü ile çalışmakta ve sistemin toplam kompresör güç tüketimi 66,6 kW'tır.

Kondenser tarafında D-2000 modelinden 4 adet kullanılmıştır. Kondenserlerin toplam güç ihtiyacı 279,2 kW olarak hesaplanmıştır. Kondenser fanları Ø800 mm çapında olup, 4 adet fanla birlikte 1,2 kW güç tüketmektedir. Her bir kondenserin kapasitesi 83,54 kW olarak hesaplanmış olup, 21250 m³ debide toplam kondenser kapasitesi 334,16 kW'a ulaşmaktadır.

Sistemin toplam elektriksel güç tüketimi 71,4 kW olup, buna karşılık EER (Enerji Verimlilik Oranı) değeri 2,98'dir. Bu değer, cihazın enerji açısından oldukça verimli çalıştığını göstermektedir. Evaporatör kapasitesi 280 kW olup, yüksek ısı transfer verimi sağlamak amacıyla uygun yapıdadır. Genleşme elemanı olarak 2 adet ETS Colibri 24C-12 model genleşme vanası kullanılmıştır.

Ultra Large sürüm için seçim şartları ise şu şekildedir;

Soğutucu Akışkan R410A

Dış Hava Sıcaklığı 35°C

Kondenzasyon Sıcaklığı 49 °C

Su Giriş Sıcaklığı 12 °C

Su Çıkış Sıcaklığı 7 °C

Subcooling 5°C

Superheating 5°C

Evaporasyon Sıcaklığı 3°C

Kompresör modeli olarak: DSH 240-4 Hermetik-Scroll

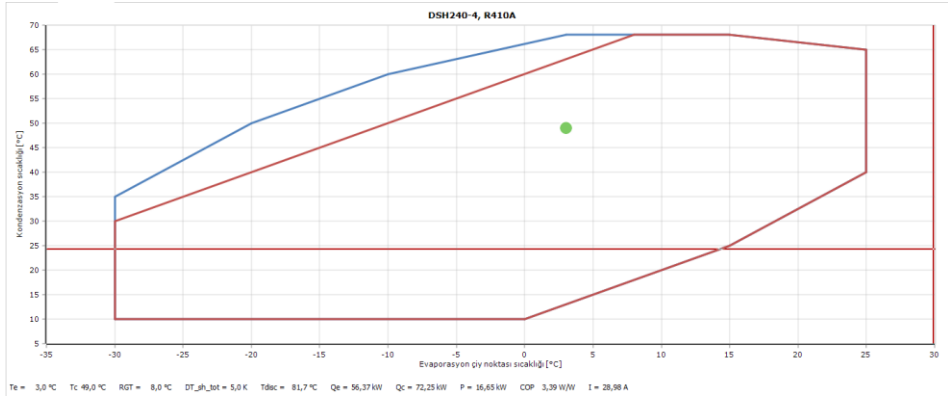
Kondenser modeli olarak: D 2000

Hava Debisi: 21250 m³

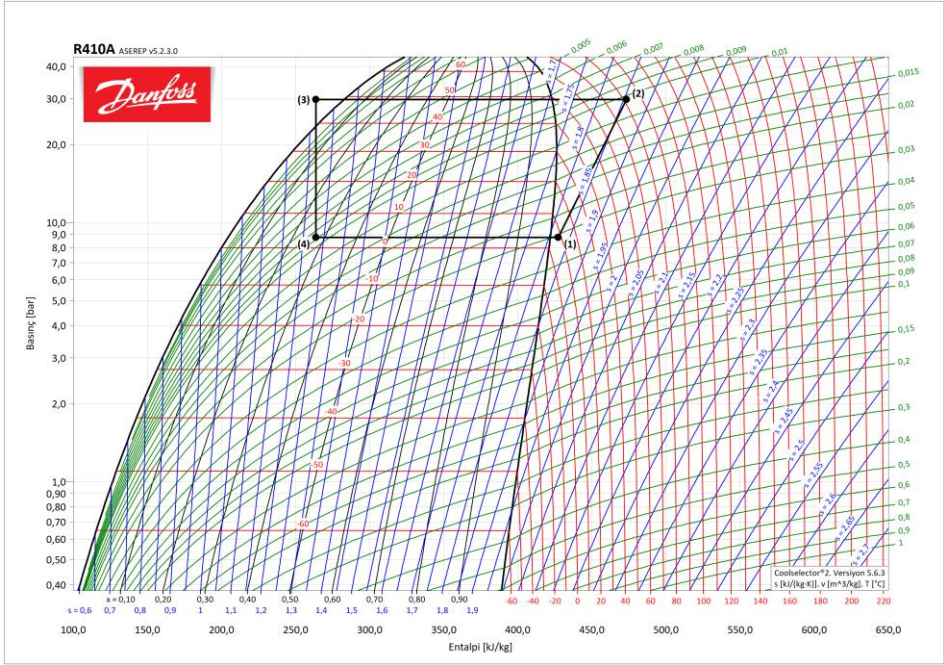
Genleşme Valfi: ETS Colibri 24C-12

Kondenser Tipi: MCHE D2000-C Danfoss

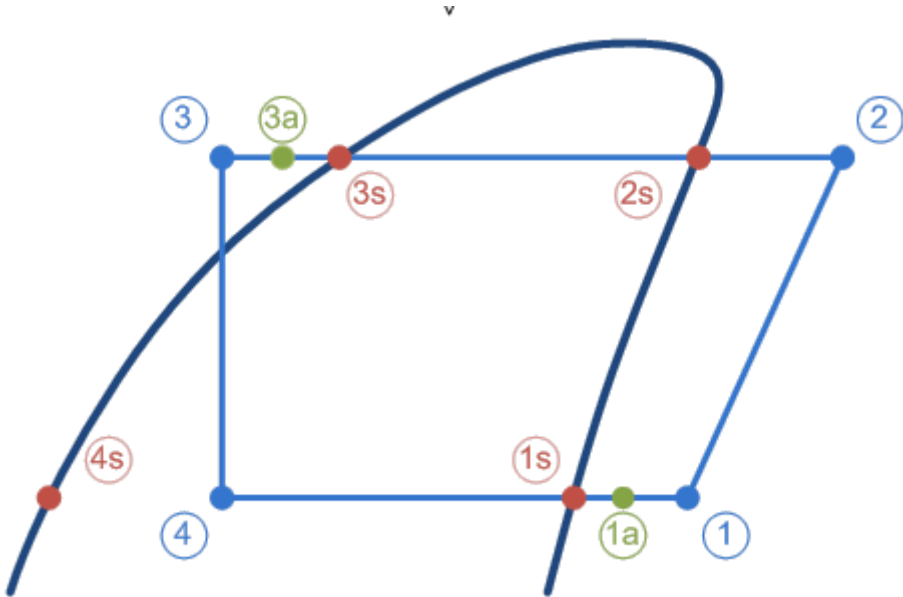
Fan Modeli: EBM Papst W3G800-NV05-10 kullanılmıştır.



Şekil 20. Ultra Large Sürümün Çalışma Zarfını Gösteren Grafik



Şekil 21. Ultra Large Sürümün Detaylı Log-Ph Grafiği



Şekil 22. Ultra Large Sürümün Çalışma Koşulları

		Sıcaklık	Basınç (a)	Yoğunluk	Entalpi	Entropi
Nokta	Açıklama	[°C]	[bar]	[kg/m ³]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
1	Kompresör emişi	8,0	8,754	32,41	427,2	1,823
2	Kompresör basması (tahmini)	81,7	29,84	96,15	473,2	1,855
2s	Kondenzasyon çiy noktası	49,0	29,84	135,4	423	1,706
3s	Kondenzasyon kaynama noktası	48,9	29,84	920,5	282,8	1,272
3a	Kondenser çıkış	38,9	29,84	985,8	263,7	1,213
3	İlave aşırı soğutma dahildir	38,9	29,84	985,8	263,7	1,213
4	Genleşme valfinden sonra	2,9	8,754	114,2	263,7	1,231
4s	Evaporasyon kaynama noktası	2,9	8,754	1159	204,4	1,016
1s	Evaporasyon çiy noktası	3,0	8,754	33,55	421,8	1,803
1a	Evaporatör çıkış	8,0	8,754	32,41	427,2	1,823

Şekil 23. Ultra Large Sürümün Çalışma Koşul Değerleri

Ultra Large (ULV) sürümü için EF200-4 modeli, R410A soğutkan gazı ile çalışan, yüksek verimli ve geniş kapasite aralığında performans sunan bir soğutma sistemidir. Sistem, kondenzasyon sıcaklığı 49 °C, evaporasyon sıcaklığı 3 °C, ortam sıcaklığı 35 °C ve su giriş/çıkış sıcaklıkları 12 °C/7 °C olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, SH (Superheat) değeri 5 °C ve SC (Subcooling) değeri 10 °C olarak belirlenmiştir.

Ünite içerisinde 4 adet DSH 240 model hermetik scroll kompresör bulunmaktadır. Her bir kompresörün kapasitesi 56,37 kW olup, toplam soğutma kapasitesi 225,48 kW'tır. Her kompresör 16,65 kW giriş gücüyle çalışmakta ve toplam kompresör güç tüketimi 66,6 kW'a ulaşmaktadır.

Kondenser tarafında D-2000 modelinden 4 adet kullanılmıştır. Kondenserlerin toplam güç ihtiyacı 292,08 kW olarak hesaplanmıştır. Kondenser fanları Ø800 mm çapında olup, 4 adet fanla birlikte 1,2 kW güç tüketmektedir. 21250 m³ debide her bir kondenserin kapasitesi 83,54 kW olarak hesaplanmış olup, toplam kondenser kapasitesi 334,16 kW'tır.

Sistemin toplam elektriksel güç tüketimi 71,4 kW'tır. Buna karşılık EER (Enerji Verimlilik Oranı) değeri 3,16 olup, bu oran sistemin enerji verimliliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Evaporatör kapasitesi 300 kW'tır ve yüksek ısı transfer verimi sağlamak için uygun yapıda seçilmiştir. Genleşme elemanı olarak 2 adet ETS Colibri 24C-12 model genleşme vanası kullanılmıştır.

SV 14/1A Seçim Şartları Kondansasyon: 50 °C, Eşarasyon: 2° (Oran: 35°C, Sıgılgı (log: 12°C/7°C) (4/5) 5°C, S/C: 5°C

Model	İsim	Kompresör Modeli	Komp. Adet	Komp. Adet Kapasite	Komp. Adet Input Power	Toplam Sığdırma Kapasitesi	Kompresör Toplam Input Power	Kondansör Hızı (g)	Komp. Modeli	Kondansör Adet	Kondansör Adet Kapasite	Kondansör Toplam Kapasite	Fan Adet Ø800 mm	Fan Power Input	Toplam Input Power	EER	Eşarasyon Kapasite	Eşarasyon Vah Adet	Eşarasyon Vah
EF2004		D50-140	4	50,43	17	201,92	68	289,92	D-2000	4	89,8	359,2	4	1,2	72,8	2,77	270	2	FFS (0,01) 246-12

MV 14/1A Seçim Şartları Kondansasyon: 50 °C, Eşarasyon: 2° (Oran: 35°C, Sıgılgı (log: 12°C/7°C) (4/5) 5°C, S/C: 5°C

Model	İsim	Kompresör Modeli	Komp. Adet	Komp. Adet Kapasite	Komp. Adet Input Power	Toplam Sığdırma Kapasitesi	Kompresör Toplam Input Power	Kondansör Hızı (g)	Komp. Modeli	Kondansör Adet	Kondansör Adet Kapasite	Kondansör Toplam Kapasite	Fan Adet Ø800 mm	Fan Power Input	Toplam Input Power	EER	Eşarasyon Kapasite	Eşarasyon Vah Adet	Eşarasyon Vah
EF2004		D50-140	4	51,32	17,01	208,28	68,04	277,32	D-2000	4	89,8	359,2	4	1,2	72,84	2,87	280	2	FFS (0,01) 246-12

UV 14/1A Seçim Şartları Kondansasyon: 49 °C, Eşarasyon: 2° (Oran: 35°C, Sıgılgı (log: 12°C/7°C) (4/5) 5°C, S/C: 5°C

Model	İsim	Kompresör Modeli	Komp. Adet	Komp. Adet Kapasite	Komp. Adet Input Power	Toplam Sığdırma Kapasitesi	Kompresör Toplam Input Power	Kondansör Hızı (g)	Komp. Modeli	Kondansör Adet	Kondansör Adet Kapasite	Kondansör Toplam Kapasite	Fan Adet Ø800 mm	Fan Power Input	Toplam Input Power	EER	Eşarasyon Kapasite	Eşarasyon Vah Adet	Eşarasyon Vah
EF2004		D50-140	4	51,15	16,65	211,6	66,6	279,2	D-2000	4	83,54	334,16	4	1,2	71,4	2,98	280	2	FFS (0,01) 246-12

UV 14/1A Seçim Şartları Kondansasyon: 49 °C, Eşarasyon: 2° (Oran: 35°C, Sıgılgı (log: 12°C/7°C) (4/5) 5°C, S/C: 10°C

Model	İsim	Kompresör Modeli	Komp. Adet	Komp. Adet Kapasite	Komp. Adet Input Power	Toplam Sığdırma Kapasitesi	Kompresör Toplam Input Power	Kondansör Hızı (g)	Komp. Modeli	Kondansör Adet	Kondansör Adet Kapasite	Kondansör Toplam Kapasite	Fan Adet Ø800 mm	Fan Power Input	Toplam Input Power	EER	Eşarasyon Kapasite	Eşarasyon Vah Adet	Eşarasyon Vah
EF2004		D50-140	4	56,37	16,65	225,48	66,6	292,08	D-2000	4	83,54	334,16	4	1,2	71,4	3,16	300	2	FFS (0,01) 246-12

Şekil 24. Standart, Medium, Large Ve Ultra Large Sürüm Değerleri

SONUÇLAR

EF200-4 modeline ait yapılan dört farklı çalışma (Standart, MV, LV ve ULV sürümleri) sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde, sistemin genel performans ve verimlilik özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

R410A soğutkan gazı kullanılan EF200-4 modeli, farklı çalışma koşullarında yapılan testlerle performans değişimi incelenmiştir. Kondenzasyon ve evaporasyon sıcaklıklarına bağlı olarak sistemin kapasite, enerji tüketimi ve verimlilik değerlerinde farklılıklar gözlenmiştir.

Hesaplamalar yapılırken şu formüller esas alınmıştır;

Total Soğutma Kapasitesi = Kompresör sayısı x Kompresör kapasitesi

Kompresör Toplam Input gücü = Kompresör Sayısı x Kompresör Input Gücü

Kondenser ihtiyacı = Kompresör toplam Input Gücü + Total Soğutma Kapasitesi

Toplam Input Gücü = Kompresör Toplam Input Gücü+ Fan Toplam Input Gücü

Standart Sürüm:

50 °C kondenzasyon ve 2 °C evaporasyon sıcaklıklarında çalışan sistemde toplam soğutma kapasitesi 201,92 kW, toplam elektriksel güç tüketimi 72,8 kW ve enerji verimlilik oranı (EER) 2,77 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, cihazın temel verimlilik düzeyini göstermektedir.

MV Sürümü:

Kondenzasyon sıcaklığı aynı kalırken evaporasyon sıcaklığının 3 °C'ye yükselmesiyle kapasite 209,28 kW'a çıkmış, toplam güç tüketimi 72,84 kW olmuştur. EER değeri 2,87'ye yükselmiştir. Bu durum, sistemin orta seviyeli çalışma koşullarında daha verimli çalıştığını göstermektedir.

LV Sürümü:

Kondenzasyon sıcaklığı 49 °C'ye düşürülmüş, evaporasyon sıcaklığı 3 °C olarak korunmuştur. Bu koşullarda soğutma kapasitesi 212,6 kW'a ulaşmış, güç tüketimi 71,4 kW olarak ölçülmüştür. EER değeri 2,98'e yükselmiş ve sistemin enerji açısından en dengeli çalışma noktasını sunduğu görülmüştür.

ULV (Ultra Large) Sürümü:

Aynı sıcaklık koşullarında subcooling değeri 10 °C'ye çıkarılmıştır. Bu sayede sistemin toplam soğutma kapasitesi 225,48 kW'a yükselmiş, toplam güç tüketimi 71,4 kW olarak sabit kalmıştır. EER değeri 3,16'ya ulaşmıştır. Bu sonuç,

ULV versiyonunun diğer sürümlere göre en yüksek verimlilikte çalıştığını göstermektedir.

Tüm çalışmalar üzerinde genel değerlendirme yapılacak olunursa;

EF200-4 modeli, sabit hızlı hermetik scroll kompresörleriyle tasarlanmış olup, her versiyonda 4 adet DSH 240 kompresör kullanılmaktadır. Farklı çalışma koşulları altında sistem performansında belirgin artışlar gözlenmiştir. Özellikle ULV versiyonu, artırılmış alt soğutma (subcooling) sayesinde hem kapasite hem de enerji verimliliğinde üstün sonuçlar vermiştir.

Sonuç olarak, EF200-4 modeli;

- Standart sürümde güvenilir performans,
- MV sürümde dengeli kapasite artışı,
- LV sürümde düşük kondenzasyon koşullarında yüksek verimlilik,
- ULV sürümde ise maksimum kapasite ve enerji verimliliği sağlamaktadır.

Bu nedenle ULV sürümü, yüksek performans gerektiren endüstriyel soğutma ve iklimlendirme uygulamaları için en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır.

8. KAYNAKÇA

- [1] International Energy Agency (IEA). (n.d.). *IEA*. <https://www.iea.org>
- [2] Atmaca, M. (2010). *Binalarda enerji performansı hesaplama yöntemi ile otel binalarının enerji performansının değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- [3] Lombard, L. P., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398.
- [4] Çakmanus, İ. (2004). Enerji verimli bina tasarım yaklaşımı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 84, 20–27.
- [5] Gökçen, E. (2018). *Su soğutmalı ve hava soğutmalı chiller sistemlerinin enerji performans karşılaştırması* (Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi).
- [6] Zhang, Y., Li, H., & Wang, S. (2024). Energy performance analysis of multi-chiller cooling systems for data centers. *Building Simulation*.
- [7] Hussein, L. A., Ateeq, A. A., & Homod, R. Z. (2022). Energy saving by reinforcement learning for multi-chillers of HVAC systems. *IMDC-IST 2021 Conference Proceedings*.
- [8] Işık, E. (2024). İklimlendirme sistemlerinin (VRF–Chiller–Kazan–FCU) enerji performansı üzerine bir inceleme. *International Journal of Pure and Applied Sciences (IJPaS)*.
- [9] Ulusal Tez Merkezi. (n.d.). *Hastane soğutma sistemlerinin enerji verimliliği açısından incelenmesi* (Tez No: 537871).
- [10] Seven, İ. (2020). *Evaporatif soğutma ile chiller veriminin artırılması* (Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi).
- [11] İmal, M., Yılmaz, K., & Pınarbaşı, A. (2015). Energy efficiency evaluation of water-cooled chiller systems compared to geothermal systems. *Sustainability*, 7(9), 12926–12946.
- [12] Kyere, E. B., Zhang, C., et al. (2023). Parametric analysis of chiller plant energy consumption in office buildings. *Building Simulation*, 16(4), 789–803.
- [13] Benkhalfallah, M. S., Kouah, S., & Harous, S. (2025). Predicting the energy consumption in chillers using machine learning. *Energies*, 18(14), 3672.
- [14] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2016). *ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment*. ASHRAE.
- [15] Wang, S. (2001). *Handbook of air conditioning and refrigeration*. McGraw-Hill.
- [16] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [17] İmal, M., Yılmaz, K., & Pınarbaşı, A. (2015). Energy efficiency evaluation of water-cooled chiller systems compared to geothermal systems. *Sustainability*, 7(9), 12926–12946.

- [18] Kyere, E. B., Zhang, C., et al. (2023). Parametric analysis of chiller plant energy consumption in office buildings. *Building Simulation*, 16(4), 789–803.
- [19] Gökçen, E. (2018). *Su soğutmalı ve hava soğutmalı chiller sistemlerinin enerji performans karşılaştırması* (Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi).
- [20] Seven, İ. (2020). *Evaporatif soğutma ile chiller veriminin artırılması* (Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi).
- [21] Benkhalfallah, M. S., Kouah, S., & Harous, S. (2025). Predicting the energy consumption in chillers using machine learning. *Energies*, 18(14), 3672.
- [22] Hussein, L. A., Ateeq, A. A., & Homod, R. Z. (2022). Energy saving by reinforcement learning for multi-chillers of HVAC systems. *IMDC-IST 2021 Conference Proceedings*.
- [23] Eylül Global. (n.d.). *Endüstriyel soğutma sistemleri: Chiller hakkında her şey*. <https://eyulglobal.com/endustriyel-sogutma-sistemleri-chiller-hakkinda-her-sey/>
- [24] Chiller.com.tr. (n.d.). *Daikin chiller arıza kodları*. <https://www.chiller.com.tr/daikin-chiller-ariza-kodlari/>
- [25] Arora, A., & Kaushik, S. C. (2009). Theoretical analysis of a vapour compression refrigeration system with R502, R404A and R507A. *International Journal of Refrigeration*, 32(5), 1187–1195.
- [26] Sinokaydeli. (n.d.). *Water-cooled screw chiller specification for air compressor in HVAC*. <https://www.sinokaydeli.com/tr/product/560hp-450ton-460rt-water-cooled-screw-chiller-specification-chiller-for-air-compressor-in-hvac.html>
- [27] Montgomery, R. L., & Johnson, W. (2018). *Refrigeration and air conditioning technology* (8th ed.). Cengage Learning.
- [28] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2020). *ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment*. ASHRAE.
- [29] Dossat, R. J., & Horan, T. J. (2002). *Principles of refrigeration* (5th ed.). Pearson Education.
- [30] Eraco Chillers. (n.d.). *Chiller cihazlarında kompresör seçimi*. <https://www.eracochillers.com/makaleler/chiller-cihazlarinda-kompresor-secimi>
- [31] Wtk heat exchangers - ACES Group
- [32] Microchannel Condensers | Kaltra
- [33] Frigoduman. (n.d.). *TX-2 iç den rak exp valf 068Z3206 MP20*. <https://www.frigoduman.com.tr/tx-2-ic-den-rak-exp-valf-068z3206-mp20>