

**TÜRKİYE VE DÜNYADA
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ**

Editör: Doç.Dr.Ali DURMUŞ

yaz
yayınları

**Türkiye ve Dünyada
Elektrik-Elektronik ve Haberleşme
Mühendisliği**

Editör

Doç.Dr. Ali DURMUŞ

yaz
yayınları

2025

**Türkiye ve Dünyada Elektrik-Elektronik
ve Haberleşme Mühendisliği**

Editör: Doç.Dr. Ali DURMUŞ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-40-6

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Diyamanyetik Malzemelerin Manyetik Alan Yardımıyla Isı Eldesi.....	1
<i>Haşim AYMAZ, Mehmet Ali EREN, Sertaç GÖRGÜLÜ</i>	
Deterjanmatik Tasarımı	11
<i>Serkan ELLEK, Sertaç GÖRGÜLÜ</i>	
AI and Deep Learning Applications in Renewable Energy Systems	17
<i>Hidir Selcuk NOGAY</i>	
Delta Robotlar İçin Uygun Tahrik Sistemlerinin Analizi DC, STEP ve SERVO Motor Yaklaşımları	43
<i>Fatmanur ATEŞ, Ramazan ŞENOL</i>	
Dron Teknolojisinde Yol Planlama Algoritmalarının Önemi	60
<i>Fatmanur ATEŞ, Ramazan ŞENOL</i>	
Deep Learning-Based Image Processing: Theoretical Foundations, Architectural Evolution, and Healthcare Applications	79
<i>Ali DURMUŞ, Hatice SÜNGER</i>	
An Overview of Electric Vehicles Technology.....	102
<i>Abdurrahim ERAT</i>	
Biyosensörler: Çeşitleri, Karakterizasyon Yöntemleri ve Uygulama Alanları.....	123
<i>Ali Can TÜFEKÇİ, Ahmet Enes KARACA, Burak TAŞ, Özge TÜZÜN ÖZMEN</i>	

Simbiyotik 6G Ağlarında Sürdürülebilir Haberleşme ve Fiziksel Katman Güvenliği: Enerji Hasadı, Gizlilik Oranı ve Anten Tasarımlarına Bütüncül Bir Bakış.....	144
<i>Muhammed Yusuf ONAY</i>	
Fractional Order Lorenz Chaotic System-Based Pseudo-Random Number Generation	164
<i>Erman ÖZPOLAT</i>	
Smart Grid Architecture and Distribution Automation	187
<i>Serdar KAŞIKCI, Ercan KÖSE</i>	
Kanal İstanbul Projesi Hafriyatının Yapay Enerji Adaları Yoluyla Yenilenebilir Enerji Üretiminde Değerlendirilmesi	210
<i>Ömer Ali KARAMAN, Mustafa SAĞLAM, Cebirail TÜRKERİ</i>	
Görüntü İşlemede Metasezgisel Algoritmalar ve Uygulamaları	230
<i>Selami PARMAKSIZOĞLU</i>	
Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerinden Derin Öğrenme Tabanlı Akciğer Kanseri Analizi	259
<i>Fatih UYSAL, Merve DEMİRCİ</i>	

"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."

DIYAMANYETİK MALZEMELERİN MANYETİK ALAN YARDIMIYLA ISI ELDESİ

Haşim AYMAZ¹

Mehmet Ali EREN²

Sertaç GÖRGÜLÜ³

1. GİRİŞ

Giderek artan nüfus ve hızla gelişen teknoloji, enerjiye olan talebi her geçen gün daha da artırmaktadır. Bu durum, enerji arzını sağlamak adına yeni ve yenilikçi teknolojilere olan ihtiyacı beraberinde getirmektedir. Bu yeni teknolojilerin temel hedefi; düşük üretim ve işletme maliyetlerine sahip, çevre dostu, sosyal sorumluluk bilinciyle uyumlu ve verimli bir şekilde enerji sağlama süreçlerini geliştirmektir (Kavak, 2005).

Günümüzde enerji politikalarının merkezinde verimli enerji kullanımı, etkin yönetim stratejileri, alternatif yakıt seçenekleri ve bunların uygulanabilirliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve enerji tüketiminin yol açtığı çevresel etkiler gibi konular yer almaktadır. Özellikle fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi ve nüfusun artış göstermesi,

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği, him10aymz@gmail.com, 0009-0003-0263-3119.

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği, malieren2001@gmail.com, 0009-0000-7135-4058.

³ Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği, sgorgulu@mehmetakif.edu.tr, 0000-0002-8394-5362.

alternatif enerji kaynaklarına yönelimi kaçınılmaz hale getirmiştir (TPAO, 2016; BP, 2015).

Karbondioksit emisyonlarındaki artış, tüm ülkeleri tehdit eden iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunların temelinde, üretim ve tüketim süreçlerinde gereken enerjinin büyük ölçüde yenilenebilir kaynaklar yerine fosil yakıtlardan elde edilmesi yatmaktadır. Fosil yakıtların yaygın şekilde kullanılması, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu artırarak sera etkisini güçlendirmekte ve yerkürenin karbon tutma kapasitesini azaltarak doğal atmosfer dengesinin bozulmasına neden olmaktadır (Şimşek vd., 2020).

Karbondioksit salınımlarının çevresel etkilerini tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da bu olumsuzlukları en aza indirmek için enerji ihtiyacının fosil yakıtlardan ziyade yenilenebilir enerji kaynakları ve yeni teknolojiler aracılığıyla karşılanması gerekmektedir (Çetintaş vd.,2017).

Bu çalışmada, diyamanyetik malzemelerin manyetik alan etkileşimi ile ısı elde edilmesi prensibine dayalı yenilikçi bir ısıtma sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Diyamanyetik malzemeler, manyetik alan etkisiyle elektron hareketlerinin değiştiği ve bunun sonucunda ısının ortaya çıktığı malzemelerdir. Bu özelliklerinden faydalanarak, manyetik alanın su veya başka bir ısı taşıyıcı madde üzerinde oluşturduğu etkileşimle verimli bir ısıtma sistemi tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında, asenkron motorlar ve neodyum mıknatıslar gibi güçlü manyetik alan kaynakları kullanılarak, diyamanyetik özelliklere sahip malzemelerle ısı elde edilmiş ve bu süreç çevre dostu, enerji verimli bir ısınma çözümüne dönüştürülmüştür.

2. ÇALIŞMA İÇERİĞİ

Çalışmada kullanılan malzemeler ve çalışma yöntemi bu bölümde verilmiştir.

2.1. Bakır Tel

Bakır tel, motorun stator ve rotor sargısında kullanılan iletken malzemedir. Elektrik enerjisinin motorun hareket enerjisine dönüşmesi için bakır teller, elektrik akımını taşır. Bakır, iyi bir elektrik iletkeni olduğu için, motorun verimli çalışması açısından tercih edilir.

2.2. Motor Kondansatörü

Motor kondansatörleri, alternatif akım (AC) motorlarında kullanılan ve motorun başlangıç hareketini sağlamak amacıyla kullanılan özel kondansatörlerdir. Bu kondansatörler, AC motorun çalışmaya başladığı anda aniden artan başlangıç akımını sağlar ve motorun düşük hızda yüksek tork üretmesini destekler. Böylece, motor kondansatörleri AC motorun başlatılmasına yardımcı olur ve düşük hızda yüksek torkla verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca, bu kondansatörler motorun rotorunda sabit bir manyetik alan oluşturarak motorun verimli şekilde çalışmasına katkıda bulunur. Motor kondansatörleri, AC motorların güç faktörünü iyileştirerek enerji tüketimini düşürür ve enerji verimliliğini artırır. Farklı AC motor türleri için çeşitli boyut ve kapasitelerde mevcuttur ve motorun teknik özelliklerine uygun olarak seçilmelidir (Gamak, 2023).

2.3. N35 Neodyum Mıknatıs

Neodyum mıknatıslar, yüksek manyetik enerji yoğunluğu ile bilinen ve $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ bileşiğinden üretilen kalıcı mıknatıslardır. “N35” sınıfı, mıknatısın manyetik enerjisinin 35 MGOe (Mega Gauss Oersted) olduğunu ifade eder; bu da N35 sınıfındaki mıknatısların belirli bir hacimdeki manyetik enerji yoğunluğunun 35 MGOe olduğu anlamına gelir. Bu özellikleri nedeniyle, N35

neodyum mıknatıslar, elektrik motorları, jeneratörler, hoparlörler ve manyetik tutucular gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Magneteksan, 2025).

2.4. Tek Fazlı Asenkron Motor

Tek fazlı asenkron motorlar, üç fazlı gerilimin bulunmadığı ev aletleri, ofis ekipmanları ve düşük güçlü endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedenleri; gelişmiş ve oturmuş bir üretim teknolojisine sahip olmaları, basit ve sağlam yapıları sayesinde arıza oranlarının düşük olması, bakım gereksinimlerinin az olması ve işletme maliyetlerinin ekonomik olmasıdır (Mergen vd., 2005, Tuncer vd., 2017).

2.5. Alüminyum Radyatör

Alüminyum radyatörler, hafif yapısı ve yüksek ısı iletkenliği sayesinde ısıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Hızlı ısınma özelliğiyle verimli bir ısı dağılımı sağlar ve çelik veya demir radyatörlere göre daha az su tüketir. Korozyona karşı dayanıklı olup, estetik tasarımlarıyla dekoratif bir seçenek sunar. Hafif olması montaj kolaylığı sağlarken, geri dönüştürülebilir yapısıyla çevre dostu bir çözümdür (Radıpan ,2022).

2.6. Santrifüj Pompa

Santrifüj pompalar, sıvıyı çarkın merkezine yönlendirerek ve santrifüj kuvvetiyle çevresine dağıtarak çalışan basit fakat etkili bir prensibe dayanır. Yapısal olarak sağlam, ekonomik ve yüksek hızlarda çalışabilme özelliğine sahip olduğundan, doğrudan bir asenkron motorla kullanılabilir. Bu pompalar, sürekli sıvı akışı sağlama avantajına sahiptir ve akış hızı, pompanın zarar görmesine neden olmadan kontrol edilebilir. Sıvı, pompa girişinden dönmekte olan çarkın merkezine ulaşır ve burada hız kazanarak çevresine doğru hareket eder. Bu mekanizma, yüksek verimlilik sunar ve temiz sıvıların taşınması

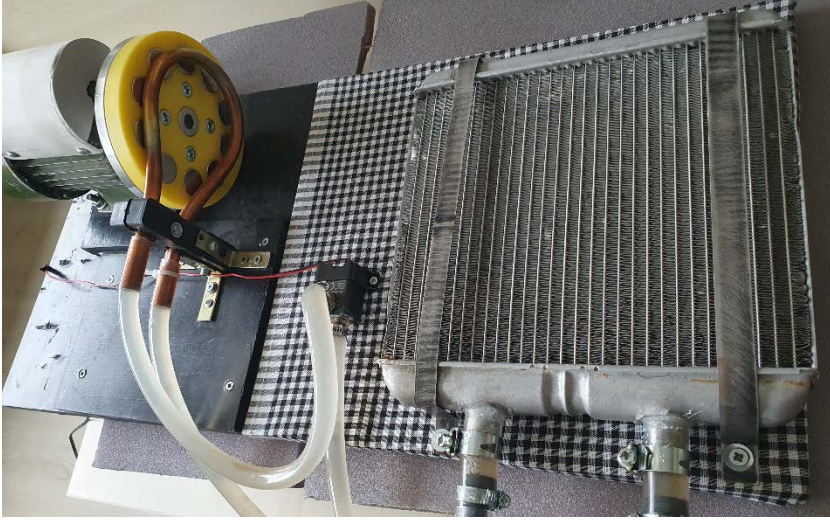
için idealdir. Ancak, atık su pompaları gibi içinde katı madde barındıran sıvıları taşımak için kullanılan pompalar, tıkanmayı önleyecek şekilde özel tasarlanmış çarklara sahiptir (Sumak, 2025).

2.7. Bakır Boru

Bakır borular, içme suyu tesisatlarından yakıt ve gaz sistemlerine kadar birçok alanda güvenilirliği, mekanik dayanımı ve antibakteriyel özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Yüksek mekanik dayanımı sayesinde basınca karşı dirençlidir ve farklı sıcaklıklarda tavlı, yarı tavlı veya sert olarak kullanılabilir. Düşük yüzey pürüzlülüğü sayesinde sürtünme katsayısı azdır, bu da basınç ve enerji kayıplarını en aza indirir. Lehimleme ve uyarılama etkinliği sayesinde basınç kayıplarını önemli ölçüde azaltabilir. (Onuk, 2013)

2.8. Yöntem

Şebekeden gelen elektrik enerjisiyle birlikte motor çalışmaktadır. Motor üzerinde neodyum mıknatısların sabitleştirilmiş olan tahta plakayı döndürmektedir. Döner mıknatıslar döner manyetik alan oluşturmakta ve bu manyetik alan içerisine diyamanyetik malzeme olan bakır boruyu konumlandırıldığında bakırın yüzeyinde girdap akımlarından dolayı ısı meydana gelmektedir. Bu bakır borunun içerisine su konulduğu zaman su ısıyı absorbe eder. Suyun bakır boru ve radyatör arasındaki dolaşımı su pompası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isınan su radyatörü ısıtmaktadır ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Çalışma için tasarlanan sistem Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan sistem

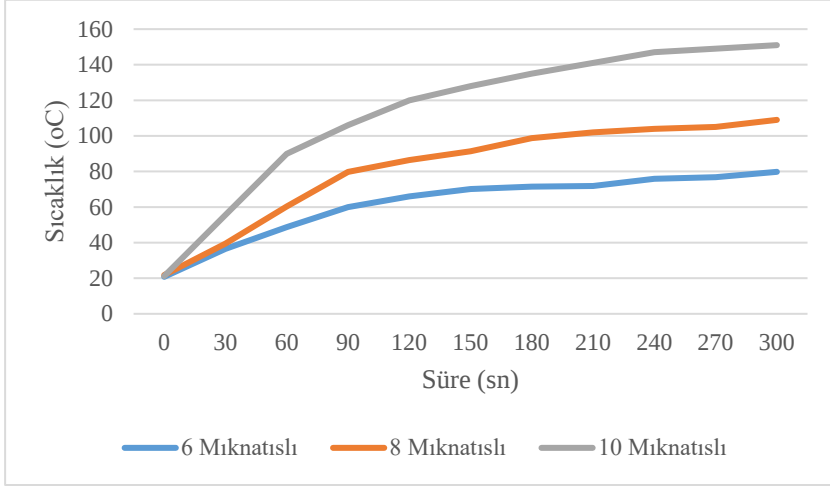
3. SONUÇ

6, 8 ve 10 adet neodyum mıknatısla kurulan sistemin çalıştırılması sonucunda mıknatısların etkisiyle oluşan girdap akımlarından dolayı bakır boru yüzeyinde ortaya çıkan sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Termal kamera ile yapılan ölçümler sonucu alınan sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. 6, 8, 10 adet mıknatısın bakır boru yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık değerleri

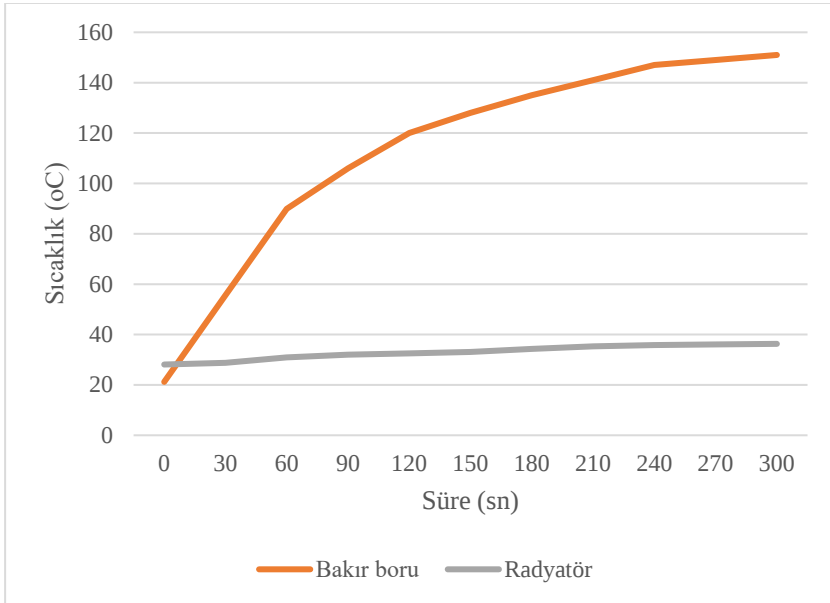
		SICAKLIK (°C)		
		6 Mıknatıslı	8 Mıknatıslı	10 Mıknatıslı
SÜRE (sn)	0	20,8	21,8	21,2
	30	36,5	39,5	55,6
	60	48,7	60,3	89,9
	90	60	79,8	106
	120	66	86,4	120
	150	70,1	91,4	128
	180	71,5	98,7	135
	210	71,8	102	141
	240	75,9	104	147
	270	76,8	105	149
	300	79,8	109	151

Bakır boru yüzeyinde ortaya çıkan sıcaklık değişim grafiği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bakır boru yüzeyinde ortaya çıkan sıcaklık değerleri

Radyatördeki sıcaklık değişim grafiği Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Radyatördeki sıcaklık değişim grafiği

Bu sonuçlara göre mıknatıslar bakır boruyu 1,5 dakika gibi bir sürede 100 °C'ye çıkartırken, sistem içerisinde dolaşan suyun radyatörü ısıtması çok daha az olmuştur. Sistem 1,5 dakikada suyun sıcaklığı yalnızca 4 °C arttırabilmiştir.

KAYNAKÇA

- BP. (2015). BP energy outlook 2035. <https://www.bp.com> (Erişim Tarihi: 18.12.2024)
- Çetintaş, H., Biçil, İ. M., & Türköz, K. (2017). Türkiye’de enerji üretiminde fosil yakıt kullanımı ve CO₂ emisyonu ilişkisi: Bir senaryo analizi. EconWorld Working Paper Series, (2017-002), 1–12.
- Gamak. (2023). Motor kondansatörleri teknik kataloğu. İstanbul: GAMAK Elektrik Motorları Sanayi ve Tic. A.Ş.
- Kubilay, K. (2005). Dünyada ve Türkiye’de enerji verimliliği ve Türk sanayisinde enerji verimliliğinin incelenmesi (Uzmanlık tezi, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara).
- Magneteksan. (2025). Neodyum mıknatıs teknik kataloğu. İstanbul: Magneteksan Manyetik Sistemler.
- Mergen, A. F., & Zorlu, S. (2005). Elektrik makineleri II: Asenkron makineler. İstanbul: Birsan Yayınevi.
- Onuk, A. G. H. (2013). Hava, su ve gaz dağıtım sistemlerinde bakır boru kullanımı ve yaşam kalitesi üzerine etkisi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17–20 Nisan 2013, İzmir.
- Radipan. (2025). Neden alüminyum radyatör? Retrieved April 18, 2025, from <https://www.radipan.com.tr/neden-aluminyum-radyator/>
- Şimşek, B., Pençe, İ., Naz, M.Y., Güngör, A. (2020). The Future of Fossil Energy Sources and The Change of Global Energy Policies. Techno-Science, 3(1), 46-49.
- TPAO. (2016). Yılı ham petrol ve doğal gaz sektör raporu. Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı.

Tuncer, S., Güldemir, H., Tuncer, S. (2017). Tek fazlı asenkron motorların dolaylı rotor alan yönlendirmeli denetimi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(1), 237–245.

DETERJANMATİK TASARIMI

Serkan ELLEK¹

Sertaç GÖRGÜLÜ²

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi, ev içi cihazların daha akıllı, enerji verimli ve kullanıcı odaklı hale gelmesini sağlamaktadır. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT), duyuşal izleme ve otomasyon alanındaki ilerlemeler, geleneksel ev aletlerinin çalışma biçimini önemli ölçüde değiştirmiştir. Akıllı beyaz eşya sistemleri; enerji yönetimi, kullanıcı alışkanlıklarının analizi ve otomatik kontrol gibi yeteneklerle hem konforu artırmakta hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Luque et al., 2019; Sevim & Duran, 2021).

Çamaşır makineleri, enerji ve su tüketiminin yanı sıra deterjan kullanım miktarı açısından da sürdürülebilirlik hedefleriyle yakından ilişkili önemli ev içi cihazlardır. Araştırmalar, kullanıcıların %30'dan fazlasının deterjanı önerilen miktardan fazla kullandığını, bunun hem çevresel hem de ekonomik olumsuz sonuçlara yol açtığını göstermektedir (Ammendolia & Walker, 2019). Aşırı deterjan kullanımı; su kaynaklarının kimyasal yükünü artırmakta, makinelerde köpüklenme ve kalıntı birikimine neden olarak cihaz ömrünü azaltmakta ve yıkama performansını olumsuz etkilemektedir (Miele Technical Report, 2020). Bu nedenle deterjanın doğru ve

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık Fakültesi, Elektrik, Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0004-6328-7624.

² Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-8394-5362.

otomatik dozajlanması, hem sürdürülebilir tüketim hem de kullanıcı deneyimi açısından kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Son yıllarda büyük üreticiler tarafından geliştirilen otomatik dozajlı çamaşır makineleri, sensör tabanlı ölçüm yaklaşımları ve kapalı çevrim kontrol algoritmalarıyla deterjan tüketimini optimize etmeyi hedeflemektedir. Bu sistemlerin yetersiz kaldığı en önemli nokta ise farklı deterjan tipleri, değişken su sertliği, yük ağırlığı ve kirlilik düzeyinin hassas bir şekilde modellenmesi gerekliliğidir (Paepen et al., 2022).

Bu çalışma, çamaşır makinelerinde kullanılan deterjanın doğru, verimli ve otomatik olarak dozajlanmasını sağlayan yenilikçi bir Deterjanmatik Sistemi tasarımını ele almaktadır. Tasarlanan sistem; sensör verilerinden yararlanarak çamaşır türü ve kirlilik derecesine bağlı olarak doğru deterjan türünü ve miktarını seçmekte, ayrıca zorlu lekeler için uygun katkı maddelerini otomatik olarak eklemektedir. Bu sistem, kullanıcı müdahalesini en aza indirirken deterjan kullanımını optimize etmeyi ve çevreye duyarlı bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

2. ÇALIŞMA İÇERİĞİ

Çalışmada kullanılan malzemeler ve çalışma yöntemi bu bölümde verilmiştir.

2.1. Arduino Uno

Arduino, günlük yaşamda karşılaşılan çeşitli fiziksel parametrelerin algılanması, ölçülmesi ve kontrol edilmesine olanak tanıyan bir mikrodenetleyici platformudur. Açık kaynaklı mimarisi, sade ve kullanıcı dostu donanım yapısı ile bu donanımın programlanmasını sağlayan bütünleşik yazılım araçları sayesinde hem eğitim hem de prototipleme süreçlerinde geniş bir kullanım alanı sunmaktadır (Arduino, 2024).

2.2.Yük Hücre Sensörü

Yük hücreleri, uygulanan mekanik kuvveti ölçülebilir elektriksel sinyallere dönüştüren sensörlerdir. Temel olarak kütle ve kuvvetin hassas biçimde ölçülmesi amacıyla kullanılan bu sensörler, metal malzemelerin üzerine uygulanan yük altında meydana gelen elastik deformasyon prensibine dayalı olarak çalışmaktadır (Yaşar, 2020).

2.3.Ağırlık Sensörü

Yük hücresinden gelen veriyi analogdan dijitale çevirmek için üzerinde HX711 entegresi bulunmaktadır. Aynı zamanda yapısında dahili sinyal kuvvetlendirici bulunmaktadır (Yaşar, 2020).

2.4. Motor Sürücü

Çift H-köprülü bir motor sürücü modülü olan bu yapı, iki DC motorun hız ve yön kontrolünün eşzamanlı ve bağımsız biçimde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Modül, 5–35 V aralığında beslenen DC motorları desteklemekte olup, motor başına 2 A tepe akım kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde sistemde kullanılan motorların her iki yönde kararlı ve etkin bir şekilde sürülmesini sağlamaktadır (Sonugür, 2025).

2.5. Doğru Akım (DA) Motoru

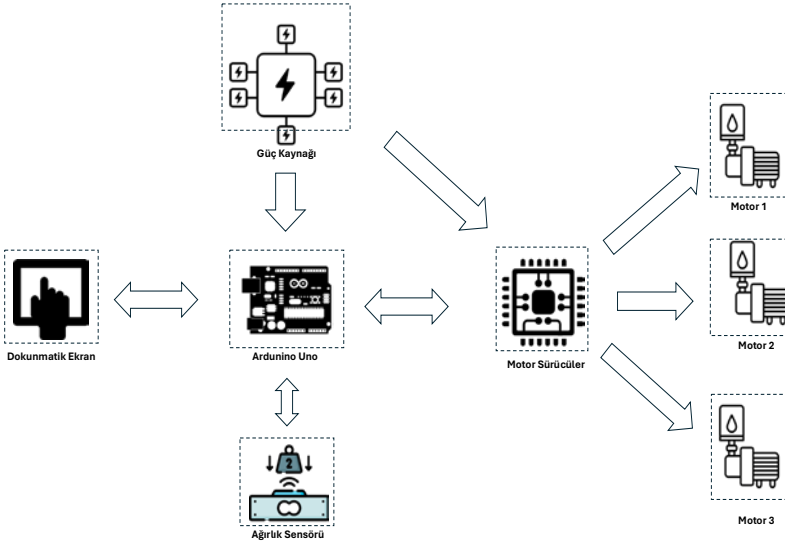
Sıvı deterjanların doğru ve kontrollü bir şekilde dozajlanabilmesi amacıyla DA motorlar tercih edilmiştir. Deterjanmatik sisteminde 3 farklı deterjan için 3 adet DA motor kullanılmıştır.

2.6. Ekran

Kullanıcının program seçimi yapabilmesi için kullanılmıştır.

2.7. Yöntem

Kullanıcı arabirimi olan dokunmatik ekran üzerinden öncelikli olarak kullanıcının leke türü bilgisi girmesi istenir. Kategori seçiminden sonra yük hücresi aracılığıyla çamaşırın ağırlığı ölçülür. Bu ağırlık ve leke türüne göre deterjan çeşidi ve miktarı belirlenir (deterjan, yağ çözücü deterjan, oksijen bazlı deterjan). Sistem tarafından seçilen deterjan çeşidi ve miktarı yıkama haznesine aktarılır ve yıkama işlemi gerçekleştirilir. Çalışma için tasarlanan sistemin blok şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan sistemin blok şeması

3. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Deterjanmatik Sistemi, çamaşırların sahip olduğu leke türü ve çamaşır miktarını analiz ederek en uygun deterjan türünü ve gerekli deterjan miktarını otomatik olarak belirleyen, Arduino tabanlı mikrodenetleyici kontrollü akıllı bir otomasyon çözümüdür.

Sistem, yanlış deterjan seçimi ve gereğinden fazla deterjan kullanımı gibi kullanıcı kaynaklı hataların önüne geçmeyi; buna bağlı olarak oluşan ekonomik kayıpları ve çevresel olumsuz etkileri azaltmayı hedeflemektedir. Bu sayede, daha verimli, kontrollü ve sürdürülebilir bir temizlik sürecinin sağlanması amaçlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ammendolia, J., & Walker, T. R. (2019). Household laundry practices and detergent overuse: Environmental implications. *Journal of Cleaner Production*, 219, 275–285.
- Arduino. (2024). *Arduino Uno*. 12 Aralık 2024 tarihinde <https://www.arduino.cc> adresinden erişildi.
- Luque, A., Rodríguez, A., & Morales, L. (2019). Smart home technologies and IoT-based appliance optimization. *Energy and Buildings*, 188, 58–72.
- Miele Technical Report. (2020). Automatic detergent dispensing systems and washing performance. Miele Corporate Publications.
- Paepen, J., Verbruggen, S., & De Baets, B. (2022). Sensor-based dosing systems for sustainable laundry applications. *Sensors*, 22(3), 811.
- Sevim, E., & Duran, Ö. (2021). Akıllı ev sistemlerinde enerji verimliliği ve otomasyon uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 134–149.
- Sonugür, G., (2025). Veri Güdümlü Kontrolde Veri Kalitesinin Kritik Rolü: Bir DA Motor Uygulaması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 13(2), 397-411.
- Yaşar E. (2020). Bir Tartım Otomasyonunda, Platform Tipi Yük Hücrelerinin, S-tipi Olarak Kullanılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 221-227.

AI AND DEEP LEARNING APPLICATIONS IN RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Hidir Selcuk NOGAY¹

1. INTRODUCTION

The shift toward renewable energy has emerged as one of the foremost challenges of the 21st century. Motivated by the pressing need to counteract climate change, lower greenhouse gas emissions, and secure sustainable electricity supply, renewable resources—including solar, wind, hydro, and biomass—are being incorporated into modern power systems at an accelerating pace. Unlike conventional fossil-based systems, renewable energy resources are intermittent and highly variable, creating complex challenges in forecasting, operation, and maintenance. Consequently, advanced computational tools are required to improve efficiency, reliability, and long-term sustainability (Yang and Long 2024; He et al., 2025; Sampene et al., 2024).

In recent years, Artificial Intelligence (AI) and Deep Learning (DL) have become powerful tools for tackling these issues. AI-driven techniques are capable of analyzing the large volumes of data produced by renewable energy systems and identifying useful patterns that traditional statistical or physics-based models often fail to capture. As a subset of AI, Deep Learning allows for the automatic extraction of complex, high-level representations from raw inputs, minimizing the need for manual feature design and enhancing model generalization. Within DL methods, Convolutional Neural Networks (CNNs)

¹ Professor, Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9105-508X.

have shown exceptional performance in tasks such as image analysis, fault detection, object identification, and classification, which makes them highly suitable for applications in the renewable energy domain (Shoaei et al 2024; Qin 2024).

For instance, CNNs can be applied to image-based problems in renewable energy systems, such as the detection of dust accumulation on photovoltaic (PV) panels, identification of faulty components in wind turbines, and classification of environmental conditions affecting power generation. Likewise, Recurrent Neural Networks (RNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) architectures have demonstrated strong effectiveness in handling time-series prediction problems, such as wind speed prediction or load demand forecasting. By integrating CNNs with other DL architectures (e.g., CNN-LSTM hybrids), researchers can simultaneously capture spatial and temporal features, opening new opportunities for accurate prediction and intelligent decision-making in renewable energy systems (Alçin et al., 2025; Wang and Yin 2024; Houran et al., 2023).

Moreover, the growing availability of high-resolution monitoring data, remote sensing imagery, and Internet of Things (IoT) sensors in energy infrastructures provides fertile ground for AI-driven innovations. With AI/DL, it is possible to enhance predictive maintenance of renewable energy assets, optimize energy storage operations, and support real-time grid management. These advances not only improve technical performance but also contribute to lowering operational costs, reducing downtime, and maximizing the economic viability of renewable energy projects (Akkur et al., 2024; Nandish and Pushparajesh 2025; Kuaban et al., 2025).

In summary, renewable energy systems face inherent variability and operational complexity that require innovative solutions. Artificial Intelligence and Deep Learning, particularly

CNNs, provide powerful tools to address these issues by enabling efficient forecasting, intelligent monitoring, and automated fault detection. This chapter examines the use of CNNs and various other deep learning techniques within renewable energy applications, emphasizing their benefits, existing limitations, and their capacity to support and accelerate the worldwide shift toward sustainable energy.

2. OVERVIEW OF RENEABLE ENERGY SYSTEMS

Renewable energy systems represent a cornerstone of sustainable development, offering clean and inexhaustible alternatives to fossil fuels. Their integration into modern power grids has accelerated in recent decades, supported by technological advances, decreasing costs of renewable technologies, and global commitments to decarbonization. Each renewable energy resource exhibits unique characteristics, technical requirements, and operational challenges, which must be considered for efficient utilization. This section provides an overview of four prominent areas of renewable energy: solar energy, wind energy, vehicle-to-grid (V2G) technologies, and energy storage systems (Ohanu et al., 2024 Emrani and Berrada 2024; Deguenon et al., 2023).

2.1. Solar Energy Systems

Solar photovoltaic (PV) technology has experienced remarkable growth due to its scalability, modularity, and rapidly declining costs. PV panels convert sunlight directly into electricity, making them one of the most widely adopted renewable technologies worldwide. However, PV systems are susceptible to various environmental and operational issues, including dust accumulation, shading, temperature fluctuations, and material degradation. These factors can significantly reduce energy conversion efficiency. Monitoring and diagnosing faults

in PV arrays, as well as predicting performance under changing weather conditions, are therefore critical. Artificial intelligence and deep learning techniques—especially convolutional neural networks (CNNs)—offer powerful means for performing image-based assessments of PV modules, detection of dust or cracks, and optimization of maintenance schedules (Okumus 2025; Kishor et al., 2025).

2.2. Wind Energy Systems

Wind energy is another rapidly expanding renewable energy resource, driven by its potential to deliver large-scale, carbon-free electricity generation. Wind turbines capture the kinetic energy carried by airflow and transform it into electrical energy. The variability of wind speed and direction, however, poses a major challenge for grid integration and forecasting. Turbines are also subject to structural stress, material fatigue, and environmental effects, leading to failures such as blade erosion, cracks, and imbalance. Accurate wind speed prediction and early fault detection are essential for maximizing energy output and ensuring turbine reliability. Sophisticated AI techniques, including long short-term memory (LSTM) networks and combined CNN–LSTM models, have shown promise in addressing these challenges by capturing both spatial and temporal patterns in wind data (Misurovic and Mujovic 2022; Hu et al., 2023; Yessef et al., 2022).

Regional characteristics, environmental conditions, and operational constraints play a decisive role in the performance and long-term reliability of wind energy systems. Studies conducted in Türkiye, for example, have demonstrated that wind energy potential can vary significantly across neighboring regions due to local climatic dynamics and terrain complexity (Ersöz et al., 2013). Environmental assessments further highlight the importance of site-specific factors—such as land use

characteristics, atmospheric conditions, and ecological impacts—in determining both the feasibility and sustainability of wind energy conversion systems (Kocabey et al., 2009). In addition, effective maintenance and management strategies, including those developed for offshore and onshore wind energy conversion structures (OWECS), are essential for ensuring operational continuity, minimizing downtime, and meeting long-term energy demand (Nogay, 2016). These findings highlight the importance of sophisticated prediction and monitoring systems—particularly those utilizing AI and deep learning—to ensure dependable wind turbine performance and seamless integration into the power grid.

2.3. Vehicle-to-Grid (V2G) Integration Methods

The growing prevalence of electric vehicles (EVs) has opened up new possibilities for enhancing grid operations through Vehicle-to-Grid (V2G) systems. V2G allows electricity to flow both to and from EV batteries, enabling functions such as load leveling, frequency stabilization, and peak demand reduction. The effectiveness of V2G systems depends on accurate forecasting of aggregated vehicle battery capacity, user behavior patterns, and grid demand. Deep learning methods, including recurrent and feedforward architectures, can model these nonlinear dynamics and provide robust predictions of available capacity. Integrating AI into V2G systems can therefore enhance grid stability, reduce reliance on fossil-based peaker plants, and accelerate the transition to smart and sustainable energy infrastructures (Ali et al., 2023).

2.4. Power Storage and Management Systems

Power storage is a vital component of renewable energy systems element of renewable energy infrastructures, addressing the intermittency of solar and wind power by storing excess electricity for later use. Lithium-ion (Li-ion) batteries are the most widely deployed storage technology, owing to their high

energy density, efficiency, and declining costs. However, challenges such as capacity degradation, safety risks, and complex electrochemical behaviors must be carefully managed. Estimating battery health status (SOH) and future service lifespan (RUL) is critical for ensuring reliability and safety. AI and deep learning approaches, particularly CNNs combined with electrochemical impedance spectroscopy (EIS) or time-series sensor data, are increasingly applied for automated feature extraction, anomaly detection, and lifetime prediction. In addition to batteries, other storage technologies such as supercapacitors and hydrogen-based systems are also benefiting from AI-driven optimization methods (Madani et al., 2024; Lyu et al., 2025; Kostenko and Zaporozhets 2024).

3. DEEP LEARNING APPROACHES IN RENEWABLE ENERGY

Artificial Intelligence (AI) and Deep Learning (DL) play a crucial role in managing the variability and complexity inherent in renewable energy systems. Traditional physics-based models and statistical techniques often fall short in capturing the nonlinearities of environmental factors, equipment degradation, and grid dynamics. DL methods, by contrast, can automatically extract high-level representations from large and diverse datasets, making them well-suited for forecasting, fault detection, and optimization tasks (Nogay & Akıncı, 2012; Akıncı & Nogay, 2012).

The following part examines three key deep learning paradigms widely used in renewable energy applications: Convolutional Neural Networks (CNNs) for image-oriented analyses, Recurrent Neural Networks (RNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) architectures for time-series prediction,

and hybrid frameworks that combine multiple learning models to enhance overall performance.

3.1. Convolutional Neural Networks (CNN) for Image-Based Tasks

CNNs have been widely adopted in renewable energy research where visual data plays a critical role. Their ability to perform feature extraction directly from raw images makes them particularly effective for applications such as fault detection and condition monitoring in energy infrastructures. For instance, CNNs can be employed to identify dust accumulation on photovoltaic (PV) panels (Nogay, 2024a), cracks in turbine blades, or faulty components in energy transmission lines (Nogay 2023a ; Nogay 2023b).

Pretrained CNN architectures such as AlexNet, ResNet, and SqueezeNet can be fine-tuned through transfer learning to achieve high classification accuracy, even with limited datasets. Moreover, employing augmentation operations such as rotation, scaling, and flipping helps enhance model robustness by simulating diverse environmental conditions (Nogay, 2024b). Recent advances also combine CNNs with object detection frameworks (e.g., YOLO, Faster R-CNN), enabling real-time monitoring of solar arrays or wind turbines. These capabilities highlight CNNs as a powerful tool for visual inspection and automated maintenance in renewable energy systems.

3.2. Recurrent Neural Networks (RNN) and LSTM for Time-Series Forecasting

Renewable energy systems generate vast amounts of time-series data, such as wind speed, solar irradiance, power output, and load demand. Modeling these sequential patterns is critical for improving forecasting accuracy and enhancing grid stability. Early studies using artificial neural networks (ANNs) demonstrated strong applicability of time-series modeling for

wind forecasting (Nogay et al., 2012; Nogay & Akıncı, 2012; Şeker et al., 2013), paving the way for more advanced RNN-based architectures.

Recurrent Neural Networks (RNNs) are built to handle sequential data by maintaining contextual information from earlier time steps, allowing them to model temporal relationships. Nonetheless, standard RNN architectures frequently encounter difficulties such as vanishing and exploding gradients, particularly when the input sequences are long.

Long Short-Term Memory (LSTM) models overcome these challenges through the use of specialized memory units and gating structures that enable the retention of long-range dependencies. LSTMs have demonstrated superior performance in tasks such as short-term wind speed forecasting (Akıncı et al., 2016), solar radiation prediction, and electricity demand forecasting. By capturing both short- and long-term patterns, LSTMs support more reliable scheduling of renewable resources and reduce the risk of imbalance in power grids. In practice, hybrid models that integrate LSTMs with statistical methods or exogenous features (e.g., weather forecasts) have shown even greater predictive capability.

Root Mean Squared Error (RMSE) is a commonly adopted performance metric in renewable energy forecasting applications, including wind speed and solar irradiance prediction. It quantifies the average magnitude of the prediction errors by comparing the model outputs $\hat{y}_i$ with the corresponding ground-truth values y_i , where N denotes the number of samples. A lower RMSE indicates that the model provides more accurate forecasts and can better capture the variability of renewable energy systems (see Eq. (1)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

3.3. Hybrid Models (CNN+LSTM, CNN+ML)

Hybrid architectures represent a growing trend in renewable energy research, combining the strengths of multiple learning paradigms. For example, CNN-LSTM models can simultaneously capture spatial features from images and temporal dynamics from sequential data. This is particularly useful for applications such as wind turbine monitoring, where image data of turbine components is complemented by time-series vibration or acoustic measurements.

Another hybrid approach is the integration of CNNs with conventional machine learning (ML) methods. In such cases, CNNs are used for feature extraction, while classifiers like Support Vector Machines (SVM) or K-Nearest Neighbors (KNN) perform the final decision-making. This strategy reduces training complexity while leveraging the representational power of CNNs. Hybrid models are especially beneficial when datasets are small or imbalanced, as they allow for flexible adaptation across different problem domains (Nogay & Akıncı, 2019; Akinci et al., 2025).

Overall, hybrid architectures expand the applicability of AI in renewable energy, offering enhanced accuracy, robustness, and generalization compared to single-model approaches. They represent a promising research direction for advancing intelligent, resilient, and efficient energy systems.

To provide a clear comparison of the deep learning methods most frequently applied in renewable energy research, Table 1 summarizes their main application areas, advantages, and

limitations. The table highlights the strengths of CNNs in image-based tasks, the capability of LSTM networks in capturing temporal dependencies, and the potential of hybrid CNN-LSTM models for combining spatial and temporal features.

Table 1. Comparison of Deep Learning Methods

Model	Application Area	Advantages	Limitations
CNN	Image-based tasks (PV, turbine)	Automatic feature extraction	Requires large datasets
LSTM	Time-series forecasting (wind, solar)	Captures temporal dependencies	Computationally heavy
CNN + LSTM	Hybrid tasks	Combine spatial + temporal features	Complexity, longer training

4. CNN APPLICATIONS IN RENEWABLE ENERGY

Convolutional Neural Networks (CNNs) have become an indispensable tool in renewable energy research, particularly for applications requiring image recognition, object detection, and pattern classification. By automatically learning multi-level representations from raw imagery, these models prove highly efficient in identifying faults, tracking system status, and improving overall operational performance. This section highlights key applications of CNNs in renewable energy, drawing from both the literature and practical case studies.

In addition to recent advances in the literature, several of our previous conference studies provided valuable methodological and experimental foundations for the CNN-based applications presented in this chapter. Earlier work on automated detection of dusty photovoltaic panels demonstrated that pretrained CNN architectures can effectively distinguish clean and dust-covered modules using visible-light images, achieving high accuracy even with limited datasets (Nogay, 2024a).

Similarly, our study on deep-learning-based classification of urban air pollution into six Air Quality Index categories offered practical insights into multi-class image classification and model evaluation using confusion matrices (Nogay, 2024b). Furthermore, operational considerations related to renewable energy infrastructures—particularly maintenance and management aspects of onshore and offshore wind energy conversion systems (OWECS)—were previously investigated in the context of Türkiye’s regional energy requirements (Nogay, 2016). These prior contributions provided essential experimental datasets, sample images, and classification outputs (e.g., confusion matrices and representative input images), which were adapted and expanded in the present chapter to illustrate CNN-based analysis across multiple renewable energy domains.

4.1. Solar Panels: Dust and Fault Detection

Dust accumulation, cracks, and hotspots are among the most common factors that reduce the efficiency of photovoltaic (PV) panels. Traditional inspection methods rely on manual visual checks or thermal imaging, which require considerable time and often lead to manual inaccuracies. CNNs provide a more robust alternative by automating the analysis of PV images and identifying subtle patterns associated with performance degradation. As shown in Figure 1, example images of photovoltaic (PV) panels under clean and dusty conditions were used as input to the CNN model for binary classification (Nogay 2024a).



Figure 1. Example images of photovoltaic (PV) panels illustrating clean and dusty conditions used for CNN-based classification (adapted from Nogay, 2024a).

Studies in the literature have demonstrated the effectiveness of pretrained models such as AlexNet, ResNet, and VGG for detecting surface dust, microcracks, and cell defects in PV modules. Transfer learning has proven particularly valuable in cases with limited datasets. In one of our own applications, a pretrained CNN was successfully used to classify clean versus dusty solar panels, achieving high accuracy and demonstrating the feasibility of deep learning for real-time PV monitoring. Such methods can significantly improve maintenance scheduling and ensure optimal energy production.

Figure 2 presents the confusion matrix obtained for the testing dataset, illustrating that the CNN model was able to correctly distinguish between clean and dusty PV panels with high accuracy (Nogay 2024a).

True Class	Clean	Dusty
	Predicted Class	
Clean	46	2
Dusty	2	45

Figure 2. Confusion Matrix Obtained for Testing (adapted from Nogay, 2024a)

Accuracy is a fundamental metric to evaluate CNN-based classification models. It calculates the proportion of correctly classified samples, where TP and TN indicate correctly predicted positive and negative cases, respectively, and FP and FN correspond to misclassified positive and negative cases (see Eq. (2)).

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

4.2. Air Pollution Classification

Environmental factors, such as urban air quality, play a critical role in the efficiency and sustainability of renewable energy systems. CNNs have been applied to classify air pollution levels using satellite images, ground-based sensors, and environmental datasets. Image-based CNN models can categorize pollution levels into multiple classes, offering valuable insights for energy demand forecasting and urban planning. Figure 3 displays representative examples of the six air pollution categories defined by the Air Quality Index (AQI), which were used as inputs for CNN-based classification (Nogay 2024b).

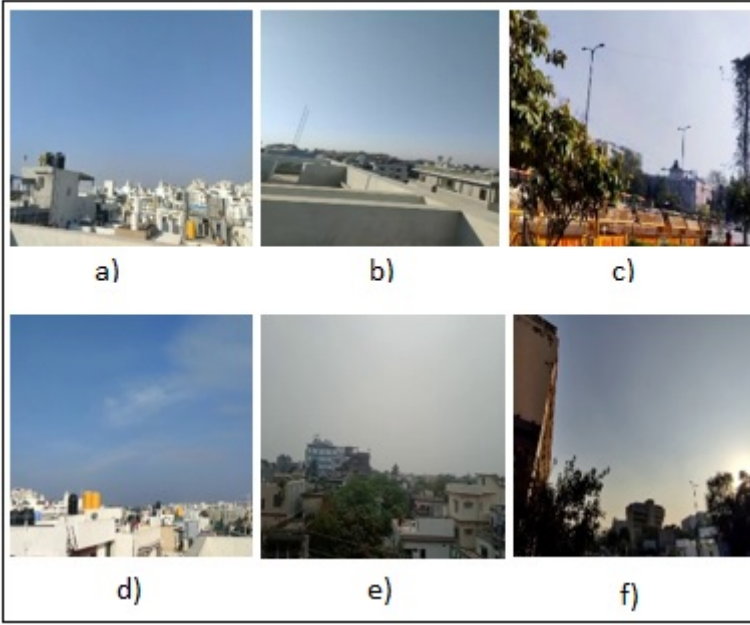


Figure 3. Example images from the air pollution dataset showing six categories based on the Air Quality Index (AQI) (adapted from Nogay, 2024b): a) Good, b) Moderate, c) Severe, d) Unhealthy of Sensitive Group, e) Unhealthy

As a case study, our research applied CNN-based classification to categorize urban air pollution into six levels, showing that CNNs can outperform conventional ML techniques in handling complex visual patterns from environmental data. Such applications highlight the broader potential of CNNs not only in energy systems but also in supporting environmental sustainability and public health monitoring. As shown in Figure 4, the confusion matrix highlights the strong performance of the CNN model in correctly categorizing urban air pollution levels across six AQI-based classes, with minimal misclassification.

True Class	Good	17			3		
	Moderate		20				
	Severe			20			
	Uhhealthy_for_Sensitive_Groups				20		
	Unhealthy					20	
	Very_Unhealthy						20
		Good	Moderate	Severe	Uhhealthy_for_Sensitive_Groups	Unhealthy	Very_Unhealthy
		Predicted Class					

Figure 4. Confusion Matrix Obtained for Testing (adapted from Nogay, 2024b)

Precision reflects the ratio of true positive predictions to the total number of samples labeled as positive by the model (see Eq. (3)). Recall—also known as sensitivity—indicates how effectively the model captures all actual positive instances (see Eq. (4)). The F1-score, defined as the harmonic mean of precision and recall, provides a balanced measure that accounts for both metrics (see Eq. (5)). In the context of renewable energy, these metrics are highly relevant for air pollution classification, as they evaluate how well CNN models detect high pollution events without producing excessive false alarms.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$F1 = 2 \times \left[\frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \right] \quad (5)$$

4.3. Wind Turbine Condition Monitoring

Wind turbines are subject to a variety of structural and operational faults, including blade erosion, cracks, and misalignment. Recent studies have leveraged CNNs to analyze images and vibration patterns for automated fault detection. For example, thermal images of wind turbine components can be classified using CNNs to detect overheating, while drone-acquired visual data can be used to identify structural cracks. These methods reduce the reliance on manual inspections and enhance the reliability of wind power systems (Wang and Yin 2024).

4.4. Battery Health and Energy Storage Monitoring

Lithium-ion batteries, widely used in renewable energy storage, undergo degradation processes that affect performance and safety. CNNs have been employed to analyze electrochemical impedance spectroscopy (EIS) data, thermal images, and acoustic signals to estimate the health condition (SOH) of batteries and their projected operational lifespan (RUL). Literature examples demonstrate that CNN-based feature extraction can outperform traditional signal processing methods, offering more accurate and reliable predictions. Such approaches are critical for extending battery lifespan, ensuring grid stability, and minimizing operational costs in renewable energy applications (Madani et al., 2024; ; Lyu et al., 2025; Kostenko and Zaporozhets 2024).

4.5. Other Emerging Applications

Beyond solar, wind, and batteries, CNNs are also being explored in a wide range of renewable energy applications (Kuaban et al., 2025; Nogay 2023a; Nogay 2023b). Examples include:

- Automated detection of faulty isolators and transmission line components.

- Remote sensing–based biomass potential estimation.
- Hybrid CNN models integrated with IoT platforms for smart grid monitoring.

5. CHALLENGES AND FUTURE DIRECTIONS

Although Convolutional Neural Networks (CNNs) and other deep learning methods have demonstrated strong performance in renewable energy applications, several limitations still need to be overcome before their full capabilities can be realized. These issues primarily arise from constraints related to data availability, issues with model generalization, deployment in real-time environments, and the need for more advanced architectures. This section discusses these challenges and outlines possible future research directions.

5.1. Data Scarcity and Quality Issues

A major obstacle in renewable energy–related deep learning studies is the scarcity of high-quality, well-labeled datasets. For example, annotated photovoltaic (PV) images reflecting diverse dust accumulation levels or fault scenarios are limited, and wind turbine fault records are frequently kept confidential by industry partners, restricting public access. Moreover, the data that are available often suffer from noise, class imbalance, or missing information, all of which can degrade model accuracy and reliability. To address these shortcomings, future studies may benefit from employing techniques such as data augmentation, generating synthetic samples through Generative Adversarial Networks (GANs), and adopting federated learning frameworks that allow collaborative model training across organizations without requiring direct data exchange.

5.2. Model Generalization

Deep learning models often perform well under controlled experimental conditions but struggle to generalize to real-world scenarios. For example, a CNN trained to detect dust on PV panels in one geographic region may perform poorly when applied to another region with different environmental characteristics. Similarly, wind speed forecasting models may fail when operating conditions change unexpectedly. Enhancing model generalization requires larger and more diverse training datasets, domain adaptation techniques, and robust validation frameworks. Future research should prioritize developing models that are less sensitive to local variations and more transferable across regions and technologies.

5.3. Real-Time and Edge Deployment

Many renewable energy applications require immediate or rapid-response decision processes. Examples include fault detection in wind turbines, monitoring of solar arrays, and predictive control of vehicle-to-grid (V2G) systems. Deploying CNN models in real-time settings is challenging due to computational complexity, memory requirements, and energy consumption. Edge computing and hardware acceleration (e.g., GPUs, TPUs, and FPGA-based solutions) offer promising pathways for overcoming these challenges. Future directions include lightweight CNN architectures, model compression, pruning, and quantization techniques that make models suitable for embedded and IoT-based renewable energy systems.

5.4. Hybrid Models and Advanced Architectures

Renewable energy systems exhibit complex behaviors that demand models capable of learning both spatial structures and temporal dynamics. Integrated or hybrid modeling strategies—such as combining CNNs with LSTM networks, transformer architectures, or various machine learning (ML)

classifiers—offer an effective solution for capturing these multi-dimensional dependencies. For example, CNN-LSTM hybrids can analyze image-based features while simultaneously modeling temporal trends, enabling more accurate wind speed forecasting or battery degradation prediction (Wang & Yin, 2024; Michalakopoulos et al., 2026). Transformers, originally developed for natural language processing, are now being explored in energy forecasting tasks, offering advantages in handling long-term dependencies and large-scale datasets (Fu et al., 2026; Xia et al., 2026). Future research should continue to explore these advanced architectures and investigate their interpretability and scalability in renewable energy applications.

6. CONCLUSIONS

Renewable energy systems are indispensable in achieving global sustainability goals, yet they present inherent challenges such as intermittency, variability, and complex operational dynamics. Traditional methods for monitoring, forecasting, and fault detection are often inadequate for addressing these challenges, which demand more sophisticated analytical approaches. Within this landscape, Artificial Intelligence (AI) and Deep Learning (DL) have become essential technologies that support precise forecasting, intelligent system supervision, and automated decision processes in renewable energy domains.

This chapter has explored the role of Convolutional Neural Networks (CNNs) and other deep learning models in renewable energy systems. We first reviewed the fundamental characteristics of solar, wind, vehicle-to-grid (V2G), and energy storage technologies. We then highlighted the use of CNNs for image-based tasks, LSTM and RNN models for time-series forecasting, and hybrid approaches that integrate multiple architectures. Practical applications were discussed, including

dust detection in photovoltaic panels, air pollution classification, wind turbine fault diagnosis, and battery health monitoring. These examples demonstrate how CNN-based methods can significantly enhance efficiency, reliability, and sustainability in renewable energy systems.

Despite these advances, several challenges remain. Data scarcity, model generalization, real-time deployment, and the need for advanced hybrid architectures continue to limit the widespread adoption of CNN-based solutions in renewable energy. Future research must address these limitations by developing robust, lightweight, and transferable models, exploring transformer-based architectures, and leveraging edge computing for real-time decision-making.

In conclusion, CNNs and deep learning represent a transformative opportunity for renewable energy research and practice. By harnessing the potential of these technologies, the renewable energy sector can achieve more efficient resource utilization, lower operational costs, and improved system reliability. Ultimately, the integration of AI and DL will play a pivotal role in accelerating the global transition to cleaner, smarter, and more resilient energy systems.

REFERENCES

- Akıncı, T. Ç., & Nogay, H. S. (2012). Wind speed correlation between neighboring measuring stations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(4), 1007–1019.
- Akıncı, T. Ç., Nogay, H. S., Guseinoviene, E., Dikun, J., & Şeker, Ş. S. (2016). Application of ANN for short term forecasting of wind power density. In *Proceedings of the 15th International Scientific Conference on Renewable Energy & IT (RE & IT 2016)* (pp. 157–163). Smolyan, Bulgaria.
- Akinci, T. C., Nogay, H. S., Penchev, M., Martinez-Morales, A. A., & Raju, A. (2025). A hybrid approach to wind power intensity classification using decision trees and large language models. *Renewable Energy*, 250, 123388.
- Akkur, M. S., Panwar, V., ..., & Misra, D. D. (2024). *IoT-based monitoring and control system for renewable energy generation*. International Journal of System Assurance Engineering and Management. Advance online publication.
- Alçın, Ö. F., Aslan, M., & Ari, A. (2025). *SolPowNet: Dust detection on photovoltaic panels using convolutional neural networks*. *Electronics*, 14(21), 1–15. <https://doi.org/10.3390/electronics142128xx>
- Ali, M., Kaddoum, G., Mahmoud, M. M., Gagnon, F., & Poor, H. V. (2023). *A smart digital twin enabled security framework for vehicle-to-grid cyber-physical systems*. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 18, 5258–5271.

- Deguenon, L., Yamegueu, D., & Gomna, A. (2023). *Overcoming the challenges of integrating variable renewable energy to the grid: A comprehensive review of electrochemical battery storage systems*. *Journal of Power Sources*, 580, 233328. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233328>
- Fu, B., Wang, W., & Li, K. (2026). *A frequency loss function based dynamic convolutional transformer model with data denoising for short-term wind speed forecasting*. *Expert Systems with Applications*, 299, 130166. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130166>.
- Emrani, A., & Berrada, A. (2024). *A comprehensive review on techno-economic assessment of hybrid energy storage systems integrated with renewable energy*. *Journal of Energy Storage*, 84, 109236.
- Ersöz, S., Akıncı, T. Ç., Nogay, H. S., & Doğan, G. (2013). Determination of wind energy potential in Kırklareli-Türkiye. *International Journal of Green Energy*, 10(1), 103–116.
- He, Z. W., Lee, C. C., & Sharma, S. S. (2025). The impact of geopolitical risks on the renewable energy transition. *Energy Economics*, 143, 107427. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107427>
- Houran, M. A., Bukhari, S. M. S., ..., & Chen, W. J. (2023). *COA-CNN-LSTM: Coati optimization algorithm-based hybrid deep learning model for PV/wind power forecasting in smart grid applications*. *Applied Energy*, 349, 121706. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121706>
- Hu, P. F., Li, Y. J., ... Blaabjerg, F. (2023). Inertia estimation of renewable-energy-dominated power systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 183, Article 113559.

- Kishor, I., Mamodiya, U., Naik, N., & colleagues. (2025). AI-integrated autonomous robotics for solar panel cleaning and predictive maintenance using drone and ground-based systems. *Scientific Reports*, 15(1)
- Kocabey, S., Nogay, H. S., Akıncı, T. Ç., Fidan, C. B., Dursun, B., Görgülü, S., & Gökçöl, C. (2009). Environmental assessment of wind energy conversion systems in Türkiye. In *Proceedings of the Conference on Sustainable Development in Southeast Europe* (Environmental Protection and Ecology, pp. 321–329). Tekirdağ, Türkiye.
- Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2024). Transition from electric vehicles to energy storage: Review on targeted lithium-ion battery diagnostics. *Energies*, 17(20).
- Kuaban, G. S., Nkemeni, V., & Czekalski, P. (2025). *An analytical framework for optimizing the renewable energy dimensioning of Green IoT systems in pipeline monitoring*. *Sensors*, 25(10), 1–24.
- Lyu, Z., Li, X. E., Zhang, Y., Chen, H., & Wu, L. X. (2025). Data-driven state of health for lithium-ion batteries: Feature engineering, estimation approaches, and future directions. *Batteries & Supercaps*. (Early Access)
- Madani, S. S., Ziebert, C., Buchholz, D., & Sadrnezhaad, S. K. (2024). Recent progress of deep learning methods for health monitoring of lithium-ion batteries. *Batteries*, 10(6).
- Michalakopoulos, V., Zakynthinos, A., & Askounis, D. (2026). *Hybrid short-term wind power forecasting model using theoretical power curves and temporal fusion transformers*. *Renewable Energy*, 256, 124008. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124008>

- Misurovic, F., & Mujovic, S. (2022). Numerical probabilistic load flow analysis in modern power systems with intermittent energy sources. *Energies*, 15(6), 1–20.
- Nandish, B. M., & Pushparajesh, V. (2025). *Economic operation of residential load using IoT-based renewable energy management system*. *Electrical Engineering*, 107(1), 37–52.
- Nogay, H. S. (2024a). Automated detection of dusty solar panels using pre-trained convolutional neural networks. In *Proceedings of the 3rd International Congress on Engineering and Sciences* (pp. 97–104). Istanbul, Türkiye.
- Nogay, H. S., (2023a). Classification of Energy Transmission Line Cables by Using Deep Learning. 5th International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches. (pp.276-281). İstanbul, Turkey
- Nogay, H. S. (2024b). Deep Learning – Based Classification of Urban Air Pollution Into Six Categories With High Accuracy. 3rd International Congress on Engineering and Sciences (pp.82-88). Istanbul, Türkiye
- Nogay, H. S., (2023b). Detection of Faulty Isolators in Energy Transmission Line by Using Convolutional Neural Networks, International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches. (pp.282-287). İstanbul, Turkey
- Nogay, H. S., & Akıncı, T. Ç. (2019). Application of decision tree methods for wind speed estimation. *European Journal of Technique*, 9(1), 74–83.
- Nogay, H. S., & Akıncı, T. Ç. (2012). Long term wind speed estimation for a randomly selected time interval by using artificial neural networks, Amasra, Türkiye. *Energy*

Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 28(2), 759–772.

- Nogay, H. S., Akıncı, T. Ç., Marija, Eidukeviciute M.(2012). Application of artificial neural networks for short term wind speed forecasting in Mardin, Türkiye. *Journal of Energy in Southern Africa*, 23(4), 2–7.
- Nogay, H. S., (2016). The Evaluation of OWECs Maintenance and Management Characteristics and Structuring Status in Türkiye with Regard to Energy Requirement . 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition – Afyonkarahisar, Türkiye, 2016 (pp.858-862). Afyonkarahisar, Türkiye
- Ohanu, C. P., Rufai, S. A., & Oluchi, U. C. (2024). *A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration*. Heliyon, 10(3).
- Okumus, H. (2025). Improving photovoltaic module inspection with convolutional neural networks and classifier integration. *Signal, Image and Video Processing*, 19(10), 1–15.
- Qin, M., Hu, W., ..., & Chang, T. Y. (2024). *Do the benefits outweigh the disadvantages? Exploring the role of artificial intelligence in renewable energy*. Energy Economics, 131, 107488. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107488>
- Sampene, A. K., Li, C., & Wiredu, J. (2024). An outlook at the switch to renewable energy in emerging economies: The beneficial effect of technological innovation and green finance. *Energy Policy*, 187, 113743. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.113743>

- Şeker, Ş. S., Akıncı, T. Ç., & Nogay, H. S. (2013). Forecasting of wind speed and directions in Kırklareli, Türkiye by simple multilayer perceptron. In *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Development* (pp. 54–59). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.
- Shoaei, M., Noorollahi, Y., ..., & Moosavian, S. F. (2024). A review of the applications of artificial intelligence in renewable energy systems: An approach-based study. *Energy Conversion and Management*, 306, 118430. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118430>
- Wang, T., & Yin, L. F. (2024). A hybrid 3DSE-CNN-2DLSTM model for compound fault detection of wind turbines. *Expert Systems with Applications*, 242, 122987. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122987>
- Xia, X., Luo, Y., & Huang, L. (2026). Systematic evaluation of transformer-based time series forecasting models for post-processing WRF-simulated wind speed and predicting short-term power output. *Applied Energy*, 403, 127070. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127070>
- Yang, X. Q., & Long, L. S. (2024). Renewable energy transition and its implication on natural resource management for green and sustainable economic recovery. *Resources Policy*, 89, 107109. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.107109>
- Yessef, M., Bossoufi, B., ... Chojaa, H. (2022). Overview of control strategies for wind turbines: ANNC, FLC, SMC, BSC, and PI controllers. *Wind Engineering*, 46(6), 1820–1837.

DELTA ROBOTLAR İÇİN UYGUN TAHRİK SİSTEMLERİNİN ANALİZİ DC, STEP VE SERVO MOTOR YAKLAŞIMLARI

Fatmanur ATEŞ¹

Ramazan ŞENOL²

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte robotik sistemlerde yaşamın her alanında hayatımıza girmiştir. Robotik sistemler endüstride ve günlük yaşamda insanların iş yüklerini azaltırlar, riskli görevleri üstlenip can güvenliğini sağlayabilirler ve süreçleri daha verimli hale getirebilirler.

Robotik sistemler sağlıktan lojistiğe, tıptan spora kadar geniş bir alanda kullanılırlar ve tasarlanan amaca göre hata oranlarını düşürmesi, hızlı, hassas ya da akıllı çözüm sunmaları, yüksek tekrarlanabilirlik sunmaları vb. özelliklere sahip olmaları istenir. Robotik sistemlere duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır (Karaca, 2024).

Robotik teknolojiler içerisinde en öne çıkan sistemlerden biri de delta robotlardır. Delta robotlar yüksek hız, hassasiyet ve tekrarlanabilirlik gerektiren uygulamalarda kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır. Hafif yapıya sahip olmaları, hızlı tepki verebilmeleri sayesinde özellikle paketleme, montaj,

¹ Arş. Gör., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-5465-2483.

² Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-7078-3229.

sınıflandırma gibi uygulamalarda kolaylık sağlamaktadır (Ayyıldız ve Ayyıldız, 2020).

Delta robotlar yüksek doğruluk payı, tekrarlanabilirliğe sahip olduğundan ve enerji verimliliği sağlayabildiğinden üretim süreçlerinde hem maliyet açısından hem de performans açısından kullanımı cazip bir seçenek olmaktadır. Bu yönleriyle delta robotlar, endüstriyel otomasyonun en etkili teknolojilerinden biri olmaya devam etmektedir (Aladağ, 2025).

Bir delta robotun kullanım amacında üstün bir performans sağlayabilmesi için tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken mühendislik problemleri vardır. Robotun tasarlanacağı amaca göre taşıyacağı yük, gerekli hız ve tork, hassasiyet düzeyi, kontrol kabiliyeti gibi parametrelerde motor seçimi özellikle çok önemli olmaktadır (Közkurt vd., 2012).

Delta robotlarda tork, hız aralığı, maliyet, kontrol hassasiyeti gibi farklı özellikler sunabilen adım motor, servo motor ve DC motor gibi farklı tahrik türleri kullanılmaktadır. Kullanılacak amaca göre tasarlanmış olan robotik sistemin, verimli ve güvenli çalışması için motor seçiminin önemi çok büyüktür.

Bu çalışmada, delta robotlarda tercih edilebilecek tahrik sistemlerinin seçimine yönelik bir analiz yapılmıştır. İlk olarak DC, step ve servo motorların çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları açıklanmıştır. Daha sonra delta robotların farklı uygulama alanları, seçilen motor türü, incelenen çalışmada en önemli gereksinimlerin örnekleri verilmiştir. Böylece çalışmanın, delta robot tasarımı yapacak araştırmacılar için motor seçimi konusunda yol gösterici bir kaynak olması amaçlanmıştır.

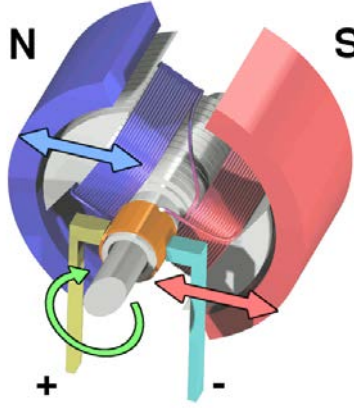
2. DELTA ROBOTLARDA KULLANILAN MOTOR TURLERİ

Bu bölümde delta robotlarda kullanımı tercih edilen motor türlerinin özellikleri, avantajları ve dezavantajları kısaca açıklanmıştır.

2.1. Doğru Akım (DC) Motorları

Doğru akım motorları elektrik enerjisini, mekanik enerjiye dönüştürebilen motorlardır. Devrelerde uygun bağlantı yapılarak jeneratör olarak da kullanılabilirler.

Bir iletken telden doğru akım geçtiği zaman iletkenin etrafında sabit bir manyetik alan meydana gelmektedir. Bu manyetik alan, tıpkı bir mıknatısın N ve S kutuplarıyla oluşturduğu manyetik alan gibi davranır. Manyetik alanlar aynı kutuplarda birbirini iter ve zıt kutuplarda ise birbirini çeker. N kutbundan S kutbuna doğru oluşan bu çekme ya da itme etkisine “manyetik akı” adı verilmektedir. DC motorlarda rotor ile stator arasındaki etkileşimin temelinde bu manyetik alan mantığı yer almaktadır. Stator (motorun sabit kısmı), genellikle sabit bir manyetik alan üretir; rotor (motorun hareketli kısmı) üzerindeki iletken sargılardan akım geçtiğinde rotor da kendi manyetik alanını oluşturur. Bu iki manyetik alan (tıpkı mıknatıstaki N ve S kutuplarında olduğu gibi) birbirini iter veya çeker. Bu itme-çekme etkisi sonucu rotor dönmeye başlar. N kutbundan S kutbuna doğru oluşan bu manyetik kuvvet, motorun sürekli dönüş hareketini sağlayan temel prensiptir (Elektrik Rehberiniz, 2011). Şekil 1’de DC motor çalışma mantığının olduğu görsel yer almaktadır.



Şekil 1. DC Motor Çalışma Mantiğı (Wapcaplet, 2004)

Şekil 1'deki görselde, fırçalı bir DC motorun çalışma mantığı yer almaktadır. Motorun dışındaki (stator kısmı) sabit mıknatıslar (N ve S kutupları) sabit bir manyetik alan oluştururken, rotor üzerindeki bobinden akım geçtiğinde rotor da kendi manyetik alanını (kendi N ve S kutuplarını) üretir. Bu iki alanın itme-çekme etkisi rotorun dönmesini sağlar. Komütatör ve fırçalar, bobinden geçen akımın yönünü her yarım turda değiştirerek rotorun sürekli aynı yönde dönmesine imkân tanır. Böylece elektrik enerjisi mekanik dönme hareketine dönüşmüş olur (Maheriya ve Parikh, 2016).

Avantajları

- Yüksek doğruluk sağlayabilirler (Tarhan ve Kalyoncu, 2024).
- Geniş hız kontrol aralığına sahiptirler (Tarhan ve Kalyoncu, 2024).
- Basit yapıları vardır (Tarhan ve Kalyoncu, 2024).
- Düşük maliyetlidirler (Tarhan ve Kalyoncu, 2024).
- Kontrolleri kolaydır (Aydınla, 2024).

- Uygun hız-tork özelliklerine sahiptirler (Ayinla, 2024).

Dezavantajları

- Genellikle yüksek çalışma gürültüsüne sahiptirler (high operating noise) (Gerçekçioğlu, 2025).
- Verimleri düşüktür (Gerçekçioğlu, 2025).
- Periyodik muayene gereklilikleri bulunmaktadır (Gerçekçioğlu, 2025).

2.2. Adım Motorları

Adım motorlar, elektrik enerjisini mekanik dönüş hareketine çeviren elektromekanik aygıtlardır ve adım adım hareket etme özelliği sayesinde hassas konum kontrolü sağlarlar. Girişlerine uygulanan pals sinyalleri doğrultusunda rotor, belirli açılarla (örneğin 90° , 45° , 18° , 7.5° veya 1.8°) adım adım döner. Temel olarak stator ve rotor olmak üzere iki ana bileşenden oluşan bu motorlar, basit yapıları ve düşük maliyetleri sayesinde özellikle hassas hareket ve konum kontrolü gereken uygulamalarda tercih edilmektedir (Aktaş; Hüner, 2018). Adım motorlar tek faz enerjili (Wave Mode), iki faz enerjili (Full-Step Mode), yarım sürüş (Half-Step Mode) ve Mikro adımlama (Mikrostepping) ile sürme olmak üzere farklı sürme tekniklerine sahiptirler.

2.2.1. Tek Faz Enerjili Sürüş (Wave Mode)

Tek faz enerjili sürüşte sadece A+, A-, B+, B- gibi tek faza enerji verilir. Faz enerjilendirme uygun sırada yapılarak step motor hareketi sağlanır. Rotor her adımda 90° döner. Tek sargı akım taşıdığı için tork bu sürüşte en küçüktür (Fiore, 2025). Tek faz enerjili sürüş düşük hız, düşük güç çalışılması gereken uygulamalar için tercih edilir ve tam adımlamadan daha az tork üretir (Gupta, 2022).

2.2.2. İki Fazlı Enerjili Sürüş (Full-Step Mode)

Adımlar tek fazlı enerjili sürüşe benzerdir ancak burada iki faz enerjilendirilerek hareket sağlanır. Yine motorun doğru hareket etmesinde enerjilendirme sırası önemlidir. Rotor iki fazlı enerjili sürüşte de 90°'lik açılarla hareket eder. Tork tek fazlı enerjili sürüşe göre daha yüksek olur, çünkü toplam akım/manyetik alan bu sürüş yönteminde daha yüksektir (Fiore, 2025). Yüksek tork ve düşük çözünürlüklü çalışmalarda kullanımı tercih edilir (Gupta, 2022).

2.2.3. Yarım Adım Sürüş (Half-Step Mode)

Bu sürüşte tek faz iki faz karma sürüş mevcuttur, tek faz ve iki faz sürüşlerinin birleşimidir. Karma sürüş adım boyunu yarıya düşürür (Örneğin; 90°'dan 45°'e düşer). Bu sürüşte tork sabit değildir (Fiore, 2025).

2.2.4. Mikro adımlama (Mikrostepping)

Motorun bir adımı pek çok adıma bölünerek çok küçük adımlar atmasının sağlandığı sürüştür. Her faza verilen akım sürekli ayarlanır. Böylece motor açısı küçük adımlarla sürekli döndürülür. Mikro adımlama ile çok yüksek çözünürlük ve daha sessiz, düzgün çalışma elde edilir (Fiore, 2025).

Avantajları

- Basit bir tasarıma sahiptir (Monolithic Power Systems, 2022).
- Yüksek performansta hassasiyet sağlayabilirler (Aykurt, 2019).
- Çok geniş bir hız aralığında çalıştırılabilirler (Aykurt, 2019).
- Dayanıklılırlar, aşırı yüklerde zarar görme ihtimalleri çok düşüktür (Aykurt, 2019).

- Fırçasız yapı mevcuttur (Monolithic Power Systems, 2022).
- Bakım gerektirmez (Monolithic Power Systems, 2022; Aykut, 2019).
- Geri bildirim mekanizması gerektirmez (Monolithic Power Systems, 2022).
- Yüksek ivme ve güç oranına sahiptir (Monolithic Power Systems, 2022).

Dezavantajları

- Adım açıları sabittir, sonradan değiştirilemez (Aykut, 2019).
- Verimleri kullanılan sürücüye göre değişir (Aykut, 2019).
- Yüksek yükler kullanıldığında adım atlanabilir, konum hatası meydana gelebilir (Aykut, 2019).
- Çıkış momenti ve gücü sınırlıdır (Aykut, 2019).

2.3. Servo Motorlar

Servo motorlar temel olarak fırçasız bir DC motor, redüktör, kontrol devresi ve bir geri besleme elemanından oluşan sistemlerdir (Qiang, 2016; The Pi Hut, 2019). Servo motorlar içerisinde DC motor bulundurur ayrıca dişli mekanizması da mevcuttur. Dişliler sayesinde motorun hızı düşürülürken torku artırılır ve servo motorun yavaş, güçlü ama kontrollü hareket etmesi sağlanır. Bazı servo modellerinde maliyeti düşürmek için plastik dişliler tercih edilirken, daha profesyonel servolarda dayanıklılığı artırmak için metal dişliler kullanılır. Ayrıca servo motorun en önemli kısımlarından biri son dişliye bağlı olan milin gerçek açısını izleyen geri bildirim sensörüdür. Mikrodenetleyici, hedef açı ile gerçek açı arasındaki farktan hesaplama yaparak bir

hata sinyali oluşturur. Oluşturulan hata sinyaline göre motor gerekli yönde ve hızda sürülür. Bazı gelişmiş servo motorlarda hız geri bildirimi de alınarak daha akıcı, titreşimsiz ve hassas bir hareket kontrolü sağlanır (Seeed Studio, 2019).

Servo motorlar genellikle ileri geri 180°'lik açı ile dönerler. Servoya hareket komutu verildiğinde, dışardan kuvvet uygulansa hareket durumunu korumaya direnç gösterir, göstereceği maksimum direnç kuvveti servo motorun tork değeridir (The Pi Hut, 2019).

Servolar DC motorlar gibi sadece dönme hareketi yapmazlar, aynı zamanda belli bir açığa, hıza veya konuma hassas bir şekilde ulaşır orada sabit kalabilir (Ceylan, 2023).

Avantajları

- Servo motorlarla hassas konum ve hız kontrolü yapılabilir (Ceylan, 2023).
- Yüksek verimliliğe sahiptir ve enerji tasarrufu sağlar (Ceylan, 2023).
- İçerisinde geri besleme sistemi bulundurur ve güvenilir çalışır (Ceylan, 2023).
- Yüksek tork ve hız performansına sahip olduğundan endüstriyel uygulamalara uygundur (Ceylan, 2023).

Dezavantajları

- Step motorlara kıyasla maliyetleri yüksektir (Ceylan, 2023).
- Sistem daha karmaşıktır (Ceylan, 2023).
- Mekanik parçalarda zamanla bakım yapılması gerekebilir (Ceylan, 2023).

3. DELTA ROBOTLARDA KULLANILAN MOTORLARA DAİR ÖRNEKLER

Yüksek hız ve hassasiyetin önemli olduğu çalışmalarda delta robotlar sıklıkla tercih edilirler. Delta robotların performanslarını belirleyen en önemli seçimlerden biri tercih edilecek motor çeşididir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde çalışmanın türüne, robotun görevine, çalışma alanına, beklenen doğruluk düzeyine, maliyetine gibi durumlarda motor seçiminin değiştiği gözlemlenmektedir. Tablo 1’de bazı çalışmalar delta robotlarda motor seçiminin önemini anlamak için özetlenmiştir. Bu çalışma, motor tiplerinin performansa etkisini anlamak ve farklı uygulama alanlarına yönelik tercihleri karşılaştırmak için bir çerçeve sunmaktadır.

Tablo 1. Literatürde delta robot uygulamalarına ve tahrik elemanı seçimine örnekler

Referans	Tercih Motor Türü	Uygulama Alanı	Delta Robotun Amacı	Çalışmada İstenen Önemli Parametreler
Elsherbiny vd., 2025	Adım Motor	Akıllı Tarım	Aeroponik dut büyümesinin izlenmesi amacıyla geliştirilmiş makine görüşüne sahip IoT delta robotu geliştirmişlerdir.	Yüksek hassasiyet, hareket doğruluğu
Cong vd., 2025	Servo Motor	Ürün Sınıflandırma	Derin öğrenme destekli kaju sınıflandıran delta robot geliştirmişlerdir.	Hızlı tepki ve hassas konumlandırma
Parra vd., 2023	Adım Motor	Üretim	Üç boyutlu yazıcı olarak çalışan delta robot üzerinde çalışmışlardır.	Hız, hassasiyet, doğruluk
Şlajpah vd., 2024	Servo Motor	Tarım/Gıda Endüstrisi	Yeşil kuşkonmaz hasadı için tasarlanmış delta robot geliştirmişlerdir.	Doğruluk, konumlandırma.
De Reu vd., 2025	Servo Motor	Spor	Masa tenisi topu vurma için uygun maliyetli bir delta paralel robot sistemi geliştirmişlerdir.	Hız, hassasiyet, doğruluk
Mojtahedi vd., 2024	Adım Motor	Gıda paketleme	Çikolata parçalarının düzenlenip 24 çikolatalı eklenebilen bir çikolata kutusunun içine taşınmasını sağlayan iki parmaklı tutucu içeren delta robot tasarlamışlardır.	Hız, hassasiyet, doğruluk

Jalali vd., 2023	Servo Motor	Geri dönüşüm	Atık ayırma işlemini gerçekleştirebilen delta robot çalışmışlardır.	Doğruluk, hız
Pu vd., 2024	Servo Motor	Deniz ürünü toplama	Su altı yakalama işlemini gerçekleştirmek için delta robot tasarlama çalışılmıştır.	Hız, dayanıklılık, kararlılık
Tang vd., 2025	Adım Motor	Tıbbi Teknoloji	Daralmış aort kapağını mekanik olarak genişleterek, kalbin sol karıncığından ana atardamar olan aorta doğru olan kan akışını anında iyileştirmek amacıyla kullanılan valvüloplasti balonlarının çaplarını otomatik, temassız ve optik bir yaklaşımla yüksek hassasiyetle ölçmek amacıyla kullanılan delta robot çalışmışlardır.	Yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik, düşük hızda stabilize
Zhong vd., 2025	Servo	Zorlu Ortam Robotikleri	Nükleer reaktör havuzlarının derinliklerine düşen cıvata, somun, tel gibi yabancı nesneleri hassas bir şekilde yakalamak ve geri çıkarma amacıyla delta robot çalışması yapılmıştır.	Hız ve tork, yük altında pozisyon kontrolü
Ochoa ve Mo, 2025	Servo step motor	Tarım/Gıda Endüstrisi	Çilek hasadı için bir delta robot tasarlamışlardır.	Yüksek hız, yüksek verimlilik, hassasiyet
Mitsantisuk vd., 2015	Servo Motor	Haptik Cihazlar (Dokunsal Geri Bildirim Cihazı)	Pahalı kuvvet sensörü kullanmak yerine, motor torkunu kullanarak kullanıcının uyguladığı dış kuvveti tahmin etmek amacıyla delta robot geliştirmişlerdir.	Tork

4. SONUÇ

Delta robotlarda tahrik sistemlerinin doğru seçilmesi robotun kullanılacağı alandaki performansı için önemlidir. Bu çalışma delta robotlarda motorların performansa etkisini karşılaştırarak farklı uygulama alanlarında motor seçimine dair bir çerçeve sunmaktadır. Literatürdeki örnek çalışmalar incelendiğinde hız, hassasiyet, yük kapasitesi, maliyet, çalışma ortamı ve beklenen doğruluk gibi faktörlere göre motor seçiminin

değiştği görülmektedir. Çalışmada aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tekrarlanabilirlik ve yüksek hassasiyet gerektirip hız ihtiyacının çok yüksek olmadığı uygulamalarda genellikle adım motor kullanımı tercih edilir. Genellikle üretim, paketlenme, tıbbi ölçümleme gibi çalışmalarda tercih edilmesi bu ifadeyi destekler.
- Yüksek hız, dinamik tepki, doğru konumlandırma gibi özelliklere sahip olan servo motorlar ağır yük altında stabil hareket gerektiren zorlu ortam uygulamalarında, sınıflandırmada, spor uygulamalarında, tarım robotlarında kullanımı verimli performans sunmaktadır.
- Basit yapıya ve uygun maliyete sahip olan DC motorlar temel düzeyde hareket gerektiren hassasiyetin çok önemli olmadığı sistemlerde kullanımı mantıklı bir seçenek olabilir. Ancak delta robotlar genellikle hız, hassasiyet, konumlandırma, tork gibi özelliklerin önemli olduğu uygulamalar için tasarlandığından genellikle step ve servo sistemler delta robot için tercih edilir.
- Literatürdeki örnekler incelendiğinde motor seçiminin robotun görevi ile ilişkili olduğu gözlemlenebilir. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda genellikle servo motor kullanımı tercih edilirken; hassasiyetin öne çıktığı çalışmalarda genellikle adım motor kullanımı tercih edilmektedir.
- Delta robot uygulamalarında genellikle tahrik sistemi seçimi, robotun performansını, maliyetini, verimliliğini ve kullanım ömrünü etkiler. Bu nedenle uygulamalarda motor seçimi, sistemin tasarım sürecinin en kritik adımlarından biridir.

Bu çalışmada delta robot tasarımlarında farklı motor tiplerinin avantaj ve dezavantajları araştırılmış, uygulamaya özel tahrik sisteminin seçimine vurgu yapılmış ve örnek çalışmalar yer verilmiştir. Delta robot tasarlayan araştırmacı ve mühendisler için bir yol haritası sunmak amaçlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Aktas, M. (tarih yok). Step Motoru (Adım Motoru) [PDF]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
Erişim: https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mustafa.aktas/137354/Step_Ad%C4%B1m%20Motoru.pdf
- Aladağ, N. C. (2025). Hatalı ürünlerin görüntü işleme yöntemleri ile tespiti ve delta robot ile elenmesi (Master's thesis, Necmettin Erbakan University (Turkey)).
- Ayinla, S. L., Amosa, T. I., Ibrahim, O., Rahman, M. S., Bahashwan, A. A., Mostafa, M. G., & Yusuf, A. O. (2024). Optimal control of DC motor using leader-based Harris Hawks optimization algorithm. Franklin open, 6, 100058.
- Aykurt, D. C. (2019). Step Motorlar. IEEE Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Erişim: <https://ieee.omu.edu.tr/step-motorlar>
- Ayyıldız, M., & Ayyıldız, E. A. (2020). Lineer Delta Robotun Doğruluk ve Tekrarlanabilirlik Performansı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(1), 869-879.
- Ceylan, E., (2023). Servo Motor Nedir? Nasıl Çalışır? Revantechnology. Erişim: <https://revantechnology.com/blog/servo-motor/>
- Cong, V. D., Ngoc, L.Q. & Hanh, L.D. (2025). Development of a Cashew Nut Grading System Using a Delta Robot Arm with Intelligent Computer Vision. Results in Engineering, 108355.
- De Reu, V., Hsu, H. C., Wu, B. Y., Tseng, H., Kao, S. H., & Chiu, H. L. (2025). AI-Powered Delta Robot System for Real-Time Table Tennis Ball Tracking and Striking. In 2025 9th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS) (pp. 394-399). IEEE.

- Elektrik Rehberiniz. (2011). DC Motor Nedir?. ElektrikRehberiniz.com. Erişim: <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-motorlari/dc-motor-nedir-454/>
- Elsherbiny, O., Gao, J., Ma, M., Qureshi, W. A., & Mosha, A. H. (2025). Developing an IoT-driven delta robot to stimulate the growth of mulberry branch cuttings cultivated aeroponically using machine vision technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, 110111.
- Fiore, C. (2025). Stepper Motors: Types, Uses, and Working Principles. *Monolithic Power Systems*. Erişim: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses>
- Gerçekcioğlu, H. S. (2025). Düşük Güçlü Elektrikli Araçlar İçin Akı Tersleyen Motor (Atm) Tasarımı Ve Optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 13(2), 412-425.
- Gupta, G. S., Tripathi, P. R., Kumar, S., Ghosh, S., & Sinha, R. K. (2022). Prototype design for bidirectional control of stepper motor using features of brain signals and soft computing tools. *Biomedical Signal Processing and Control*, 71, 103245.
- Hüner, E. (2018). Düşük Çözünürlüklü Eksenel Akı Sürekli Mıknatıslı Step Motorun Manyetik Analizi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7(3), 77–84.
- Jalali, H., Garjani, S., Kalhor, A., Masouleh, M. T., & Yousefi, P. (2023). Practical implementation of real-time waste detection and recycling based on deep learning for delta parallel robot. In *2023 13th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCCKE)* (pp. 246-252). IEEE.

- Karaca, M. (2024). Robotik sistemler: Özellikleri, ilgili mesleklerin geleceği ve yükseköğretimde robotik programlar. Özgür Yayınları.
- Közkurt, C., Fenercioğlu, A., & Akar, M. (2012). Otomatik depolama sistemlerindeki robotlar için servo motor seçimi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, (1), 97-104.
- Maheriya, S., & Parikh, P. (2016). A review: Modelling of Brushed DC motor and Various type of control methods. *Journal for Research*, 1.
- Mitsantisuk, C., Stapornchaisit, S., Niramitvasu, N., & Ohishi, K. (2015). Force sensorless control with 3D workspace analysis for haptic devices based on delta robot. In *IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 001747-001752). IEEE.
- Mojtahedi, M. M., Mohammadi, A., & Masouleh, M. T. (2024). Experimental study on autonomous food packaging with delta parallel robot and two fingered gripper. In *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Monolithic Power Systems. (2022). Selecting a Stepper Motor System. Erişim adresi: <https://www.monolithicpower.com/>
- Ochoa, E., & Mo, C. (2025). Design and Field Evaluation of an End Effector for Robotic Strawberry Harvesting. In *Actuators* (Vol. 14, No. 2, p. 42). MDPI.
- Parra, D. M., Aguilar, M. A., & Aguilar, F. J. (2022). RoPar3D: Delta Type Parallel Robot-Based 3D Printer. In *International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering* (pp. 327-341). Cham: Springer International Publishing.

- Pu, H., Yang, M., Xiao, L., Sun, Y., Wang, M., Ding, J., Chen, C., & Jia, W. (2024). Design and trajectory planning of a underwater delta robot for marine harvest. In 2024 4th International Conference on Industrial Automation, Robotics and Control Engineering (IARCE) (pp. 162-165). IEEE.
- Qiang L., Zhang, Q. N., Wang, L. W., & Wang, L. (2016). Sliding Mode Control Technology Research About Underwater Vehicle Servo.
- Sseed Studio. (2019). DC Motor vs Stepper Motor vs Servo Motor – Which to choose?. Sseed Studio Blog. Erişim: <https://www.sseedstudio.com/blog/2019/04/01/choosing-the-right-motor-for-your-project-dc-vs-stepper-vs-servo-motors/>
- Šlajpah, S., Munih, M., & Mihelj, M. (2023). Mobile robot system for selective asparagus harvesting. *Agronomy*, 13(7), 1766.
- Tang, J., Huang, X., Williams, T., Hildick-Smith, D., Aviles-Espinosa, R., & Rendon-Morales, E. (2025). Assessing the Characteristics of Modern Valvuloplasty Balloons Using a Robotic Non-Contact Optical Approach. *Hearts*, 6(4), 25.
- Tarhan, A., & Kalyoncu, M. (2024). Arı Algoritması Kullanılarak Bir Dc Motor İçin Optimum Pıd Kontrolcü Tasarımı Design Of Optimal Pıd Controller For A Dc Motor Using The Bees Algorithm.
- The Pi Hut. (2019). What's the Difference Between DC, Servo & Stepper Motors?. The Pi Hut Tutorials. Erişim: <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/whats-the-difference-between-dc-servo-amp-stepper-motors>

- Wapcaplet. (2004). Electric motor cycle 1 [Şema / Görsel].
Wikimedia Commons. Lisans: CC BY-SA 3.0. Erişim:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_motor_cycle_1.png
- Zhong, M., Gao, Z., Mao, Z., Lyu, R., & Liu, Y. (2025). An Underwater Salvage Robot for Retrieving Foreign Objects in Nuclear Reactor Pools. *Drones*, 9(10), 714.

DRON TEKNOLOJİSİNDE YOL PLANLAMA ALGORİTMALARININ ÖNEMİ

Fatmanur ATEŞ¹

Ramazan ŞENOL²

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojinin sunmuş olduğu en önemli yeniliklerden birisi farklı kullanım alanlarına sahip olan dronlardır. Dronlar otonom veya manuel olarak kontrol edilebilirler. Dronlar otonom kullanımlarda bir insanın yönlendirmesine ihtiyaç duymadan çalışabilirler. Hareketlerini havada gerçekleştirdikleri için geleneksel olan karasal trafik yoğunluklarından etkilenmezler. Karayollarında karşılaşılan trafik yoğunlukları sebebiyle kara taşıtlarına göre daha hızlıdır. Ayrıca km başına transfer maliyetlerinin de daha düşük olduğu ifade edilmiştir (Ha vd., 2018; Ekechi vd., 2025).

Dronlar kullanılacakları alanlara göre üzerlerinde farklı donanımları bulundurabilecek şekilde tasarlanıp kullanılabilir. Böylece insan yaşamını tehlikeye sokabilecek önemli görevlerde tasarlanıp kullanılabilirler. İlaçlama gibi tarımsal amaçlarla kullanıldıklarında, ilaçtan ve zamandan tasarruf etmeyi sağlayabilirler. Bir bölgenin haritasını çıkarıp, analiz etmeyi sağlayabilirler ve bunlar gibi daha birçok alanda kullanım avantajlarına sahiptirler. Dronların vahşi hayatın gözlenmesi, altyapının kontrolü, acil ilaç teslimi, inşaat, tarım,

¹ Arş. Gör., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-5465-2483.

² Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-7078-3229.

eğlence, taşımacılık, hedef izleme, haritalama gibi farklı alanlarda kullanımları gözlemlenmektedir (Nakıboğlu, 2020).

Dronların farklı uygulama alanlarında kullanımlarında, kullanım amacına bağlı olarak uçuş süresinin optimize edilmesi öne çıkmaktadır. Dronların kullanımlarını kısıtlayan en önemli faktörlerden birisi havada kalma süresinin yetersizliğidir. Dronun uçuş süresi genellikle 20-50 dakika arasında değişmektedir ancak uçuş süresini uzatmak için farklı çözüm araştırmaları mevcuttur (Özgüven vd., 2022). Bu alanda yapılan çalışmalar son yıllarda dronun otonom kullanımdaki yol planlaması üzerine yoğunlaşmaktadır (Tong vd., 2022).

Yol planlama probleminin çözümünde, bir aracın başlangıç noktasından hedef noktasına en uygun rotanın ve optimum maliyetin bulunma amacı vardır. Yol planlama problemlerinin çözümünde Dijkstra algoritması, tabu arama algoritması, genetik algoritma, karınca koloni algoritması, hibrit algoritmalar, A* algoritması vb. algoritmaların kullanımı mevcuttur (Hudoud, 2021; Ugwoke vd., 2025).

Bu çalışmada farklı sektörlerde kullanılan dronların yol planlama algoritmalarının önemi üzerinde durulmuştur. Dronlarda yol planlamanın önemi vurgulanarak literatürde farklı algoritmaların kullanıldığı bazı çalışmalardan örnekler verilmiştir. Böylece araştırmacılara bir bakış açısı oluşturmak amaçlanmıştır.

2. DRONLARA DAİR TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde dronlar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

2.1. Dronlar

İnsansız hava araçları veya dronlar içerisinde fiziksel olarak insanın bulunmadığı uçan araçlardır. Bazen helikopter anlamına gelen dokuçar sözcüğü de insansız hava aracı anlamında

kullanılabilmektedir (Vikipedi, 2023). Dronlar; motorlar, pervaneler ve sensörler kullanılarak otonom olarak uçabilir veya uzaktan kontrol edilebilirler. Dronlar kullanım alanlarına göre GPS, kızılötesi kamera, lidar, ana kamera gibi bazı donanımları üzerinde bulundurlar (Yakar, 2021). Dronların kontrolü genellikle manuel ve otomatik olmak üzere iki farklı modda gerçekleştirilir. Manuel modlu kontrolde insan müdahalesi vardır. Otomatik modda ise dron bir komut alır ve bunu gerçekleştirir. Örneğin; önceden tanımlanmış bir rotada uçuş görevinde araştırma alanının ve rotanın tanımlanması gerekir (Momeni vd., 2022). Dronlar; araştırma, insani yardım çalışmaları, afet risk yönetimi, ulaşım, acil sağlık durumları sırasında tıbbi malzemeleri taşımak için veya savunma sanayiinde gözetleme gibi durumlarda kullanım alanlarına sahiptir (Ayamga vd., 2021). Dronlar farklı sayıda rotordan oluşabilir. Örnek olarak 4 rotorlu ve 6 rotorlu iki dron görseli şekil 1’de verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 1. Örnek dron görselleri (a) 4 Rotorlu dron (Potushaft, 2020)
(b) 6 Rotorlu dron (Hagdorn, 2021)**

2.2. Dronlarda Kullanılan Temel Algılayıcılar

Bu bölümde dronlarda kullanılan temel algılayıcılar kısaca açıklanmıştır.

2.2.1. GPS (Global Positioning System) Sensörü

Türkçe ismi küresel konumlandırma sistemidir. GPS, düzenli olarak kodlanmış bilgi gönderen uydu ağıdır. Düşük güçlü radyo sinyali yayan uydular, dünya etrafındaki yörüngede bulunurlar. Yeryüzünde bulunan GPS alıcıları radyo sinyallerini alarak konum tespitini gerçekleştirebilir (Sağbaş ve Ballı, 2015).

2.2.2. Pusula

Manyetik alan sensörü olarak da adlandırılır. Dronun kuzey yönü ile ön kısmı arasında kalan açığı ölçmeyi sağlar (Villi ve Yakar, 2022).

2.2.3. Ultrasonik Sensörler

Nesnelere veya yüzeylere olan mesafenin ölçülebilmesi için yüksek frekansta ses dalgalarını kullanan sensörlerdir. Ses dalgasının yayılıp geri dönme süresinden mesafe ölçülür. Engel algılamada, engellerden kaçınmada kullanılır (Gül, 2023).

2.2.4. Kızılötesi Sensörler

Engelleri algılamak, mesafeleri ölçmek için kullanılan bir tür algılayıcıdır. Mesafe ölçümünün yapılabilmesi için IR radyasyonu yayar ve yansıyan dalganın da kullanılmasıyla mesafe ölçülmeye çalışılır (Gül, 2023).

2.2.5. Lidar (Light/Laser Detection and Ranging) Sensör

Lazer tarayıcı tarafından objeye gönderilen lazer ışının, objenin yüzeyinden yansıyıp alıcıya geri dönme süresi ile sensörle obje arasındaki mesafe hesaplamasını yapabilen sensördür (Ateş ve Şenol, 2023).

2.2.6. Kameralar

Dronlarda kullanılan kameralar iki veya üç boyutlu görüntü almak amacıyla kullanılabilir. Havadan fotoğraf çekmeyi ya da video çekmeyi sağlarlar.

2.2.7. Barometre

Otonom iniş ve kalkış durumlarında kullanılan dronun belli bir yükseklikte yoluna devam etmesini sağlayan önemli bir sensördür. Dronun yüksekliğini ölçmeye yarayan basınç sensörüdür (Akgüç, 2023).

2.2.8. İvmeölçer

Dronun havada iken sabit ve düz kalması için yani dronun stabilizasyonunun sağlanması için kullanılan sensördür. İvmeölçer tarafından dronun yönelimindeki değişiklikler tespit edilir ve uçuş kontrol cihazına sinyaller gönderilir. Daha sonra motorlar ayarlanarak drondaki dengenin korunması amaçlanır (Gül, 2023; Jaaffar vd., 2025).

2.2.9. Jiroskop

Daha çok pervanelerdeki hareket kabiliyetini kontrol altına almayı sağlayan sensördür. İvmeölçere benzer ancak ivmeölçer, tek bir koordinat üzerinden ivmeyi ölçerken; jiroskopta üç koordinata göre dönüş hızı ölçülür (Gül, 2023; Jaaffar vd., 2025).

3. YOL PLANLAMA ALGORİTMALARINA GENEL BAKIŞ

Yol belirleme, bir ortamda bulunan belirli bir noktadan yine belirlenmiş olan hedef noktasına ulaşmak için iki nokta arasında bulunan uygun yolları bulma olarak adlandırılmıştır. Bu yolların belirlenme şekli problemin çözümüne uygun olarak tercihe bağlıdır. Örneğin; en kısa yol, en uzun yol, en az

karmaşıklığa sahip olan yol, vs. olabilir (Çetin, 2017). Yol planlama çalışmaları hem dronlar için hem robotlar için literatürde çözümü araştırılan konulardandır. Yol planlama teknikleri global ve yerel olarak temelde ikiye ayrılır. Global yaklaşım aynı zamanda çevrimdışı olarak da adlandırılır. Global yaklaşımda ortam ya önceden keşfedilmiştir ya da haritası bellidir. Veriler ortamdan bilgi olarak güncellenemediği için dinamik engellerden kaçınılamaz. Yerel yaklaşım ise çevrimiçi olarak ifade edilir. Yerel yaklaşımda robotun bulunduğu ortam hakkında bilgi sahibi olunmasa bile, içerdiği algılayıcılar sayesinde bulunduğu çevreyi algılayarak engeller fark edilebilir (Torun vd., 2019).

Yol planlama algoritmaları klasik algoritmalar ve sezgisel algoritmalar olmak üzere genelde iki ana başlık altında incelenmiştir. Klasik algoritmalar; hücre ayrışması, potansiyel alan, örnekleme tabanlı yöntemler, alt hedef algoritması olarak incelenirken, sezgisel algoritmalar ise temelde yapay sinir ağları, bulanık mantık, doğadan ilham alan algoritmalar ve hibrit algoritmalar başlıkları altında incelenmektedirler (Dere, 2019).

4. YOL PLANLAMA ÇÖZÜMLERİNE ÖRNEK ÇALIŞMALAR

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte hayatımızda yer alan dronlar tarım, fotoğrafçılık, haritacılık vb. alanlarda yaygın bir kullanıma sahiptir. Özellikle son yıllarda bazı e-ticaret siteleri ve lojistik şirketleri teslimatları dronlarla yapmaya başlamışlardır. Bu uygulama teslimatların maliyetlerini azalttığı gibi teslimat verimliliğini de artırmaktadır. Ancak sadece dron ile teslimat yapmak, taşıma kapasitesi göz önüne alındığında sınırlayıcı bir faktöre sahip olduğundan kamyonların ve dronların koordineli olarak çalışıp gerçekleştireceği teslimatlar yoğun ilgi görmeye başlamıştır. Tong vd., toplam teslimat süresini en aza

indirmeyi amaçlayan, kamyon-dron teslimatı için en uygun rota planlama modelini oluşturmayı amaçlamışlardır. Sistemin matematiksel modelini oluşturup değişken tabu komşuluk arama algoritması ile modelin çözümünü araştırmışlardır. Sonuçta geleneksel kamyon teslimatıyla karşılaştırıldığında, kamyon-dron teslimatının sayısal deneyde teslimat süresini %20,1 oranında azaltabildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca daha fazla kamyon ve dronun, toplam teslimat süresini etkili bir şekilde azaltabildiğini ancak marjinal faydayı giderek azalttığını belirtmişlerdir. Yalnızca kamyon hızının veya dron hızının arttırılması teslimat süresini en aza indiremediğini ve yalnızca kamyon hızı ve dron hızının eşzamanlı olarak arttığında teslimat süresinin önemli ölçüde azaltılabildiğini vurgulamışlardır (Tong vd., 2022).

Dronlar tarımsal ilaçlama gibi uygulamalarıyla tarım alanlarında da önemli görevler üstlenmektedir. Kullanım olarak bazı avantajlar sağlamasına karşın dayanıklılıklarının zayıf ve ilaçlama için tank kapasitelerinin küçük olması operasyon verimliliğini azaltabilir. Dronların mahsullere ilaçlama yaparken operasyon verimliliğini de artıracak rota planlama çözümlerine ihtiyaç duyulmuştur. Hu vd., dış bükey çokgen bölgeler için atılan pestisit homojenliğinin sağlandığı, minimum enerji - pestisit tüketiminin sağlanacağı rota problemini çözmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında ilk olarak dışbükey çokgen bölgesinin köşeleri, ayrıca kalkış ve iniş noktaları dahil olmak üzere çevrimdışı bilgiler girildiğini daha sonra bu bilgilerin Dünya koordinat sisteminden düzlem koordinat sistemine dönüştürüldüğünü belirtmişlerdir. İkinci olarak, düzlem koordinat sistemindeki alt bölgeye dayalı bir rota oluşturma yöntemini tanıtmışlardır ve yöntem aracılığıyla farklı başlangıç yön açılarına sahip farklı rotalar üretilmiştir. Daha sonra, farklı rotaların üç değerlendirme kriterine göre niceliksel olarak analiz edildiğini ifade etmişlerdir. Niceliksel değerlendirmeyi rota

mesafesi, dönüş sayısı ve pestisit atık oranını (ilaçlama işlemi sonrasında tankta kalan sıvı miktarı) değerlendirme kriterleri olarak kullanarak yapmışlardır. Ayrıca, koordinat dönüştürme yoluyla Dünya koordinat sisteminde en uygun rotanın bulunduğunu ifade etmişlerdir. Son olarak, bu rota planlama yönteminin uygulanabilirliğini simülasyon yoluyla yapmışlardır. Sonuçta optimum rotanın dönüş sayısını, rota mesafesini ve pestisit atık oranını sırasıyla %60, %17,65 ve %38,18 oranında azalttığını belirtmişlerdir (Hu vd., 2021).

Dronlar tarımın hasat bölümünde de kullanılmaktadırlar. Elle, manuel olarak hasat yapmak zahmetli ve zaman alıcı olmaktadır. Ayrıca tarım sektöründe çalışan insan işgücünde yaşanan kayıplar ve bu insan gücünün tarım dışı sektörlere kaymasıyla hasat yapacak otonom sistemler geliştirmenin önemi ortaya çıkmaktadır. Hasat için hem karasal hem havada hareket eden otonom sistemler geliştirilmektedir. Ancak karasal makinelerle karşılaştırıldığında dronlar araziye iyi uyum sağlayabilme ve yüksek verimlilik avantajlarına sahip olabilme gibi özelliklerinden dolayı meyve toplama görevini başarıyla gerçekleştirebilirler. Li vd., longan (Ejder gözü) meyvesi toplamak için dron tasarlamışlardır. İHA' ya monte ettikleri 3 boyutlu kameradan aldıkları görüntülerle üç sınıflandırma etiketine sahip (meyve veren bir ana dalın kesmeye uygun ana sapı, sadece meyvesi ve meyve veren bir ana daldaki ilk daldan son dala kadar bir longan meyvesi kümesi) veri seti oluşturmuşlardır. Görüntüleri tanımak için MobileNet-YoloV4 mimarisini eğitip kullanmayı tercih etmişlerdir, görüntüleri 68 ms'de %89.73 mAP değeriyle sınıflandırmışlardır. Daha sonra uygun kesme noktalarından İHA üzerinde bulunan makas yardımıyla meyve toplama işlemini gerçekleştirmişlerdir. İHA'nın konumlandırılmasında hedefin RGB görüntüsündeki koordinat noktası bilgisi ve hedefin mesafe bilgisinin önemli

olduğunu belirtip İHA' nın konumlandırma problemini çözmüşlerdir (Li vd., 2021).

Tarımda ürünlerin kalitesini ve miktarını artırırken aynı zamanda tarlaların ekimi ve sürülmesi için gerekli olan zamanı, işgücünü ve finansal maliyetleri azaltmakta önemlidir. Tarım uygulamalarında dronların farklı amaçlarla kullanımları mevcut olmakla birlikte tarımda yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri de kara araçlarına göre operasyon sürelerinin daha kısa olmasıdır. Tevyashov vd., tarımsal bir amaç için kullanılan çok dronlu sistemin simulasyon ortamında yol planlama problemini ele alan bir çalışma yapmışlardır. Simulasyon ortamında ayçiçeklerinin bulunduğu bir tarım alanı tasarlamışlardır. Önerdikleri yol planlama algoritması dört aşamadan oluşmaktadır; öncelikle belirli bir alanın koordinatları Kartezyen'e (metrik sistem) dönüştürülür. Daha sonra gruptaki her bir dron tarafından kapsanacak şekilde belirlenen alt alanlara bölünür. Her bir dron için uçuş yörüngesi (planı) oluşturulur ve atanan alt alanları kapsamak için gereken maksimum süre, yinelemeli olarak en aza indirilir (Tevyashov vd., 2022).

Dronlar aynı zamanda devriye gezme çalışmalarında da karasal takip sistemleri ile kıyaslandığında görevlilere büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin, ormanlık alanlarda klasik devriye sistemlerinin kullanılması durumunda bazı rotaların geçilmesinin zor olması sebebiyle tüm alanların gözlenememesine yol açabilir. Ancak ormanlarda gelişebilecek bir yangının en erken zamanda tespit edilmesi çok önemlidir. Momeni vd., orman izleme çalışmalarında insansız hava araçları ve bu araçların şarj işlemlerinde kullanılmak üzere kamyonların koordineli kullanımını amaçlayan bir sistemi ele alarak çok amaçlı bir matematiksel model üzerinde çalışmışlardır. Kamyon ve dronların eş zamanlı matematiksel modeli tasarlandığı takdirde tüm alanlar en kısa sürede ve en düşük maliyetle izlenebileceğini savunmuşlardır. Çalışmada oluşturulan bu matematiksel modelin

artırılmış epsilon kısıtlaması (AEC) algoritmasıyla ve benders (BD) algoritmasıyla çözüldüğü ifade edilmiştir. Ayrıca dronların çeşitli yerlerde devriye gezip şarj olmak üzere kamyonlara döndüğü ifade edilmiştir. Sonuçta analiz edilen dron-kamyon sisteminin devriye gezmek için uygun maliyetli olduğunu ve operasyon süresini de oldukça azalttığını ifade etmişlerdir (Momeni vd., 2022).

Dron veya dron sürüleri son yıllarda arama – kurtarma çalışmaları için de kullanılmaktadır. Du 2023 yılında yapmış olduğu çalışmada, İHA' lara görev atama ile rota planlamayı birleştiren gelişmiş A* algoritmasını tasarlamıştır. Önce 2 boyutlu bir ortamda sadece engellerden kaçınma ve arama kurtarma görevine odaklanan bir yaklaşım önermiş daha sonra ise bu işlemi 3 boyutlu ortama uyarlamaya çalışmıştır. Klasik A* Algoritmasının belirlemiş olduğu bölgeyi 72,653799 saniyede taradığını ifade ederken, görev atama ve rota planlamayı birleştirmiş olduğu A* algoritmasının aynı bölgeyi toplamda 26,462905 saniyede taradığını ifade etmiştir. Deneyleri MATLAB simulasyon ortamında gerçekleştirmiştir (Du, 2023).

Dronların afet ve acil durum yönetiminde rota planlaması açısından kullanımına yönelik yapılan çalışmalar arasında Bose vd. (2024) çalışması da örnek verilebilir. Araştırmacılar dron ambulans operasyonlarında gerçek zamanlı en kısa yol optimizasyonu için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çalışmalarında uydu görüntülerinden CNN ile mekânsal özellik çıkarımı ve dinamik, engellerle dolu afet ortamlarının modellenmesi için GNN tabanlı bir rota optimizasyonu entegre edilmiştir. Önerilen hibrit CNN–GNN modeli, modelin performansı, doğruluk, yol uzunluğu ve hesaplama verimliliği gibi metriklerde değerlendirmişlerdir. Sonuçta dronla acil sağlık müdahalelerinin daha hızlı ve güvenilir şekilde gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir (Bose vd., 2024).

Arama kurtarma çalışmaları sadece kaza gibi durumlarda değil aynı zamanda yangın, deprem ve çevrede gerçekleşen diğer afetler gibi insan hayatının tehlikede olduğu durumlarda da oldukça önemlidir. Bu durumlarda arama-kurtarma çalışmaları genellikle hayatlarını riske atan uzman ekipler tarafından gerçekleştirilmektedir. İHA'lar arama kurtarma çalışmalarını iyileştirmek ve uzman ekiplerin hayatlarının riskini azaltmak için önemli otonom araçlardır. Ancak İHA görev planlamasında yol planlama probleminin çok iyi çözümlenmesi gerekir. Juan vd. bu amaçla simülasyon ortamında La Palma 'da 2016 yılında gerçekleşen yangının 3. Gününün haritasını temel alarak arama – kurtarma deneyleri gerçekleştirmiştir. La Palma yangın haritasının görselini 24x24 boyutunda ızgaralara ayırıp bulanık mantıkla her hücrede insanların bulunma olasılığını hesaplamaya çalışmışlardır. Sonrasında yol planlama için çekim algoritması, bulanık mantık, ANFİS ve PSO algoritmasını kullanmışlardır. Simülasyonları tek İHA ile ve birden fazla İHA ile ayrı ayrı deneyerek gerçekleştirmişlerdir. Sonuçları karşılaştırmışlardır. ANFİS yaklaşımının genel anlamda en iyi yaklaşım olduğu ifade edilmiştir (San Juan vd., 2018).

Deprem sonrası arama kurtarma ve bina hasar araştırması amaçlanan bir çalışma Cheng ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Cheng vd. çalışmalarında deprem bölgelerinin İHA ile eğik fotoğraflamalarının yapıp rota planlarının oluşturulması üzerinde çalışmışlardır. Önce k-ortalama kümeleme algoritması ile tasarlanan rotayı drona aktarmışlar, ardından belirlenen rotadan eğik fotografik görüntüler üzerinden 3 boyutlu yeniden yapılandırma uygulamışlardır. (Cheng vd., 2021).

Dronlar yenilenebilir enerji ile ilgili alanlarda da uzmanlara yardımcı olmak için kullanılırlar. Örneğin; rüzgar türbinlerinin düzenli olarak denetimlerinin yapılması gerekir. İple erişim yöntemini kullanan bir teknisyenin yapmış olduğu görsel denetim en yaygın olan denetim şeklidir. Ancak bu teknik hem

maliyetli, hem zaman alıcıdır. Dronlar bu alanda kullanım için uzmanlara oldukça fayda sağlamaktadır. Baik ve Valenzuela bu konuyu inceleyen araştırmacılarıdır. Çalışmalarında simulasyon ortamında bir dizi rüzgar türbininin bulunduğu bir alanı denetlemek için kara aracının üzerinde yer alan dronla rota optimizasyon problemi üzerinde çalışmışlardır. Rüzgar türbinlerini kümeleyerek ve tamsayı doğrusal programlama modelini kullanarak klasik gezici satıcı probleminin çözülmesiyle her kümedeki drone rotalamasını oluşturmuşlardır. Ayrıca, bir tamsayı doğrusal programlama modeli kullanarak genelleştirilmiş gezgin satıcı problemini çözüp kara aracının rotasını belirlemişlerdir. Önermiş oldukları optimizasyon probleminde K-means kümeleme algoritmasını ve iki tamsayı doğrusal programlama formülasyonunu kullanmışlardır. Sonuçta rotalama problemini çözmenin türbin alanı incelemesinin toplam çalışma süresini azalttığını ifade etmişlerdir (Baik ve Valenzuela, 2021).

Dronlar boyama, ortam dezenfekte etme gibi operasyonlarda da kullanılabilir. Örneğin, son yıllarda adı sıkça duyulan Covid-19 vb. salgınların önlenmesi için çaba gösterilmektedir. Buna yönelik özellikle kamusal alanların dezenfeksiyon edilmesi Covid-19 vb. hastalıklarından korunmak için önemli operasyonlardır. Vazquez-Carmona vd., İHA ile iki boyutlu bir alanın dezenfeksiyonunun planlamasına yönelik bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında, dezenfeksiyon alanının paraboloid modelini oluşturmuşlar, splinkler modellemesi yapmışlardır. Ayrıca ayak izi belirlendikten sonra yol planlama algoritmasını önermişlerdir. Sonuçta yapmış oldukları deneylerde dezenfeksiyon alanının kaplandığını ifade etmişlerdir (Vazquez-Carmona vd., 2022).

5. SONUÇLAR

Günümüzde dronlar hayatı kolaylaştırmak, insanın can güvenliğini riske atan faktörleri en aza indirmek gibi farklı amaçlarla kullanılan önemli araçlardır. Dronların çalışmasını sınırlandıran en önemli etkenlerden biri havada kalma süresidir. Dronun mevcut havada kalma süresi içerisinde optimum işi yaptırabilmek için dronun otonom kullanımında yol planlama algoritmaları kullanılır. Bu çalışmada yol planlama algoritmalarının önemine vurgu yapılmış, literatürde farklı amaçlarla yapılan çalışmalardan örnekler verilmiştir. Aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Taşımacılıkta kullanılan dronlar maliyetleri azaltabilir ve teslimat verimliliğini artırabilir. Ancak taşıma kapasitesi açısından ve taşıma süresi açısından sınırlamalara sahiptir. Uygun rota planlama ile teslimat süresi azaltılabilir.
- Tarımsal ilaçlama dronların kullanıldığı bir diğer önemli alandır. Ancak hem atılacak pestisit uygun miktarda kullanmak ve böylece çevre kirliliğine sebep olmamak için hem de homojen olarak dağılmasını sağlamak için araziye ilaçlayacak drona uygun bir rota planlama yapılması önemlidir.
- Arama-kurtarma çalışmalarında kullanılan dronlar için de yol planlamanın uygun yapılmasının önemi büyüktür. Örneğin; taranacak bir enkaz alanında bulunan her bölgeyi optimum sürede tarayabilen bir dron hayat kurtarabilir. Veya ormanlık alanı optimum sürede tarayabilen bir dron yangın yayılmadan müdahale edilmesini sağlayabilir.
- Covid-19 gibi salgın hastalıkların yayılmasını önlemek için özellikle kamu alanlarında yapılan dezenfeksiyon

işlemlerinde kullanılabilecek dronlar içinde rota planlanması, hem işlemin erken tamamlanma süresi açısından hem de uygun miktarda dezenfektan kullanılması açısından önem arz eder.

Yol planlama algoritmalarının bu kadar önemli olmasının iki temel nedeni vardır. Birincisi, dronun havada kaldığı süre içinde mümkün olan en fazla verimi sağlamaktır. İkincisi ise dronun görevini en kısa sürede tamamlamasına yardımcı olmaktır. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte dronlar farklı sektörlerde çeşitli amaçlarla daha yaygın kullanılmaya başlamış, bu nedenle dronların kullanım verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar da artarak devam etmektedir.

KAYNAKÇA

- Akgüç, B. (2023). Döner/Sabit kanatlı İHA’larda Uçuş Kontrol Kartları (Otopilot). <https://avdesodrone.com/ucus-kontrol-kartlari/> internet sitesinden 24.10.2023 tarihinde alınmıştır.
- Ateş, F. Ve Şenol, R. (2023). Tarımda Modern Teknolojiler: Lidar Görüntüleme. Mühendislikte Yenilikçi Çalışmalar, 247-265.
- Ayamga, M., Akaba, S., & Nyaaba, A. A. (2021). Multifaceted applicability of drones: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120677. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120677>
- Baik, H., & Valenzuela, J. (2021). An optimization drone routing model for inspecting wind farms. *Soft Computing*, 25(3), 2483-2498. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05316-6>
- Bose, S., Maheswaran, N., Logeswari, G., Anitha, T., Prabhu, D., & Gokulraj, G. (2024). Adaptive Deep Learning Techniques for Real-Time Shortest Path Optimization in Drone Ambulance Operations during Disaster. In 2024 8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC) (pp. 1860-1866). IEEE.
- Cheng, X., Lin, J., Zhao, X., & Xiao, S. (2021). Research on UAV Oblique Photography Route planning in the investigation of building damage after the earthquake. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 783, No. 1, p. 012081). IOP Publishing. Doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/783/1/012081>
- Çetin, H. (2017). “Bilinen Ortamlarda, Otonom Hareketlerin Ve Yol Planlamasının Olduğu Robotik Sistem Tasarımı”,

Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, KONYA.

Dere, M.E. (2019). “Mobil Robotlar için Optimum Yol Bulma”, Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi, KONYA.

Du, Y. (2023). Multi-UAV Search and Rescue with Enhanced A Algorithm Path Planning in 3D Environment. International Journal of Aerospace Engineering, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1155/2023/8614117>

Ekechi, C. C., Elfouly, T., Alouani, A., & Khattab, T. (2025). A survey on UAV control with multi-agent reinforcement learning. Drones, 9(7), 484. Doi: <https://doi.org/10.3390/drones9070484>

Gül, E.N. (2023). Dronlarda Kullanılan Sensörler. <https://medium.com/@elifnr.gull/dronlarda-kullan%C4%B1lan-sens%C3%B6rler-e09fe68ba46d> internet sitesinden 24.10.2023 tarihinde alınmıştır.

Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., & Hà, M. H. (2018). On the min-cost traveling salesman problem with drone. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 86, 597-621. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.11.015>

Hagdorn, M. (2021). Hagdorn’s drone flying piccolo [Fotoğraf]. Wikimedia Commons. Lisans: CC BY-SA 2.0. Erişim: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hagdorn%27s_drone_flying_piccolo_\(40370093540\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hagdorn%27s_drone_flying_piccolo_(40370093540).jpg)

Hu, S., Xu, T., & Wang, B. (2021). Route-planning method for plant protection rotor drones in convex polygon regions. Sensors, 21(6), 2221. Doi: <https://doi.org/10.3390/s21062221>

- Hudoud, K. M. K. (2021). Rota optimizasyonu için dinamik tahminleme ve planlamada en kısa yol algoritmalarının uygulanması (Doctoral dissertation, Kastamonu Üniversitesi).
- Jaaffar, M. N., & Soh, M. J. C. (2025). Arduino-Based Real-Time Drone Performance Monitoring with MEMS Sensor Application. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 6(2), 120-127.
- Li, D., Sun, X., Elkhouchlaa, H., Jia, Y., Yao, Z., Lin, P., Li, J., & Lu, H. (2021). Fast detection and location of longan fruits using UAV images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106465. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106465>
- Momeni, M., Soleimani, H., Shahparvari, S., & Afshar-Nadjafi, B. (2022). Coordinated routing system for fire detection by patrolling trucks with drones. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102859. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102859>
- Nakıboğlu, G. (2020). Drone taşımacılığı ve son-adım teslimatta kullanımı. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 24(2), 285-298.
- Özgüven, M. M., Altaş, Z., Güven, D., & Arif, Ç. A. M. (2022). Tarımda Drone Kullanımı ve Geleceği. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 64-83. Doi: <https://doi.org/10.54370/ordubtd.1097519>
- Potushaft. (2020). Drone Mavic Pro may2020.jpg. Wikimedia Commons. Lisans: CC BY-SA 4.0. Erişim: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drone_Mavic_Pro_may2020.jpg

- Sağbaş, E. A., & Ballı, S. (2015). Akıllı Telefon Sensörlerinin Kullanımı ve Ham Sensör Verilerine Erişim. Akademik Bilişim Konferansı, 4-6.
- San Juan, V., Santos, M., & Andújar, J. M. (2018). Intelligent UAV map generation and discrete path planning for search and rescue operations. *Complexity*, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6879419>
- Tevyashov, G. K., Mamchenko, M. V., Migachev, A. N., Galin, R. R., Kulagin, K. A., Trefilov, P. M., ... & Goloburdin, N. V. (2022). Algorithm for multi-drone path planning and coverage of agricultural fields. In *Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the First International Conference, ADOP 2021, St. Petersburg, Russia, June 7–9, 2021* (pp. 299-310). Springer Singapore. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3349-2_25
- Tong, B., Wang, J., Wang, X., Zhou, F., Mao, X., & Zheng, W. (2022). Optimal Route Planning for Truck-Drone Delivery Using Variable Neighborhood Tabu Search Algorithm. *Applied sciences*, 12(1), 529. Doi: <https://doi.org/10.3390/app12010529>
- Torun, Y., Ergül, Z., & Aksöz, A. (2019). Aiming of Optimum Energy Efficiency with Rapidly-Exploring Random Tree and Artificial Bee Colony Path Planning Algorithm for Autonomous Robots. Doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.607996>
- Ugwoke, K. C., Nnanna, N. A., & Abdullahi, S. E. Y. (2025). Simulation-based review of classical, heuristic, and metaheuristic path planning algorithms. *Scientific Reports*, 15(1), 12643. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96614-2>

- Vazquez-Carmona, E. V., Vasquez-Gomez, J. I., Herrera-Lozada, J. C., & Antonio-Cruz, M. (2022). Coverage path planning for spraying drones. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108125. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108125>
- Vikipedi, (2023). İnsansız hava aracı. https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0nsans%C4%B1z_hava_arac%C4%B1 internet adresinden 18.10.2023 tarihinde alınmıştır.
- Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73-100. Doi: <https://doi.org/10.51534/tiha.1189263>
- Yakar, U. (2022). Spordan Tarıma Kadar Pek Çok Alanda Kullanılan Drone Nedir, Ne İşe Yarar ve Nasıl Çalışır?, <https://www.webtekno.com/drone-nedir-ne-ise-yarar-nasil-calisir-h118528.html> internet adresinden 18.10.2023 tarihinde alınmıştır.

DEEP LEARNING-BASED IMAGE PROCESSING: THEORETICAL FOUNDATIONS, ARCHITECTURAL EVOLUTION, AND HEALTHCARE APPLICATIONS

Ali DURMUŞ¹

Hatice SÜNGER²

1. INTRODUCTION

The fields of image processing and computer vision underwent an unprecedented transformation in the first decade of the 21st century with Deep Learning methods based on artificial neural networks (Voulodimos et al., 2018). Traditional methods, relying on hand-crafted feature extraction, persisted for many years (Sun et al., 2022). However, these traditional approaches have given way to end-to-end models that can automatically learn complex and hierarchical visual representations from data. This shift represents not only a technical advancement but also a significant change in the understanding of visual data processing.

This technological shift is most clearly demonstrating its most effective and transformative results in the healthcare sector (Jiang et al., 2017). The rapid increase in the amount of data generated by imaging methods such as Magnetic Resonance Imaging (MRI), Computed Tomography (CT), and digital pathology has increased the cognitive load on radiologists and

¹ Assoc. Prof. Dr., Kayseri University, Dept. Of Electrical-Electronics Engineering, ORCID: 0000-0001-8283-8496.

² Electrical-Electronics Engineer, Kayseri University, Dept. Of Electrical-Electronic Engineering, ORCID: 0009-0008-3009-2213.

clinicians to unmanageable levels. Human errors due to fatigue and biological limitations in detecting microscopic patterns at the level have transformed AI-powered "Second Opinion" systems from a privilege in clinical processes to a necessity for diagnostic accuracy (Shen et al., 2017). Medical imaging data is inherently distinct from general object recognition datasets (e.g., ImageNet). The difficulty of accessing data due to patient privacy, the high cost of data labelling processes requiring specialist doctors, and the expectation of "zero error" in medical diagnosis make it challenging to use standard deep learning models directly. These structural constraints have accelerated the development of specialised segmentation architectures such as U-Net (Ronneberger et al., 2015), which offer high accuracy with limited data, Generative Adversarial Networks (GANs) (Goodfellow et al., 2020) used to address data scarcity, and Transfer Learning strategies that facilitate knowledge transfer.

This study examines the multi-layered development in the field of image processing through fundamental research that is considered a significant turning point in the literature. This section will first focus on the technical foundations of Convolutional Neural Networks (CNNs) (Simonyan & Zisserman, 2015; He et al., 2016) and task-specific architectures such as U-Net and YOLO (Redmon et al., 2016). Subsequently, the emergence of the Vision Transformer (ViT) architecture, which represents the most recent and radical change in this field by ending the dependence on CNNs, and the topic of "architectural evolution" will be addressed (Dosovitskiy et al., 2021). Finally, Explainable Artificial Intelligence (XAI) approaches, which shed light on the "black box" character of these technologies, will be evaluated in the context of reliable applications in the healthcare sector, theoretical foundations, and practical results.

2. ARCHITECTURAL SPECIALISATION AND OVERCOMING LIMITATIONS

Modern methods in image processing are defined by the transition from extracting handcrafted features to data-driven representational learning. Traditional edge detection and feature extraction techniques have been replaced by the layered abstraction capabilities of deep structures. This section addresses specialised architectures, which are important milestones in the field, and strategies developed to overcome the structural limitations (data, cost, computational power) of deep learning.

2.1. Fundamental Image Processing Tasks and Specialised Architectures

The most important requirement for medical image analysis is to accurately distinguish anatomical structures or diseases within an image. This process is known as semantic segmentation and necessitates assigning each pixel in the image to a specific category (tumour, tissue, background, etc.) (Shen et al., 2017).

Precise Segmentation: U-Net Architecture The greatest challenge in biomedical imaging is the lack of labelled datasets required for training. The U-Net architecture shown in Figure 1, developed by Ronneberger et al. (2015), has become the industry standard for solving this problem. Featuring a symmetric encoder-decoder structure, U-Net uses "skip connections" to directly transfer low- level spatial information from the encoder section to the decoder section (Ronneberger et al., 2015). This mechanism prevents the loss of contextual information, enabling the production of high- resolution and accurate segmentation maps even when trained with a small amount of data. Although alternative segmentation models in the literature, such as DeepLab, have also aimed to capture contextual information

(Chen et al., 2017), U-Net maintains its success in medical imaging.

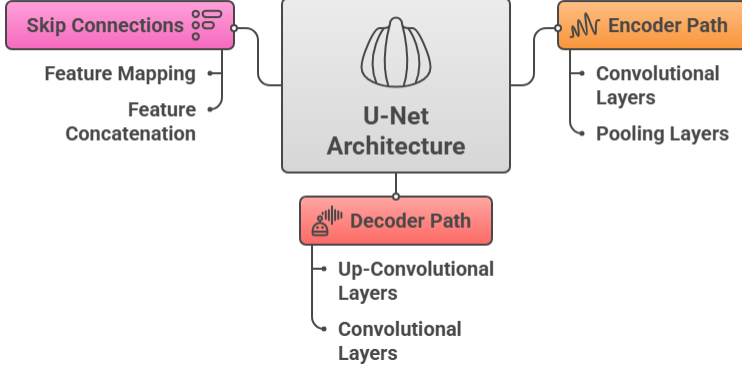


Figure 1. U-Net Architecture

Connection to Medical AI: A successful segmentation tool such as U-Net solidifies the place of deep learning in medical image analysis and general healthcare. These studies highlight how deep learning improves diagnosis and quantitative assessment by replacing human-designed features.

Real-Time Object Detection: In addition to segmentation, determining the position of objects in an image (object detection) is critical for autonomous systems and surgical tracking processes. While traditional methods (such as the R-CNN family) perform region proposal and classification in two separate stages, the YOLO (You Only Look Once) architecture has changed this paradigm. Redmon and colleagues (2016) treated object detection as a single regression problem and processed the entire image with a single convolutional neural network (CNN), simultaneously predicting class probabilities and bounding box coordinates (Redmon et al., 2016). This unified architecture enabled the model to achieve speeds of 45 frames per second (FPS), paving the way for real-time applications. Although methods such as Focal Loss were later proposed for class

imbalance issues (Lin et al., 2017), YOLO stands out for its speed.

YOLO: While classical object detection systems (e.g., R-CNN derivatives) typically use two-stage processes (first region proposal, then classification), YOLO frames this task as a single regression problem. A single Convolutional Neural Network directly estimates bounding boxes and class probabilities from an image. This unified architecture makes it fast enough to operate in real-time. YOLO's fundamental trade-off is that, despite an increase in localisation errors, the probability of making false positive predictions on the background is lower. Figure 2 illustrates a visual representation of real-time object detection using YOLO.

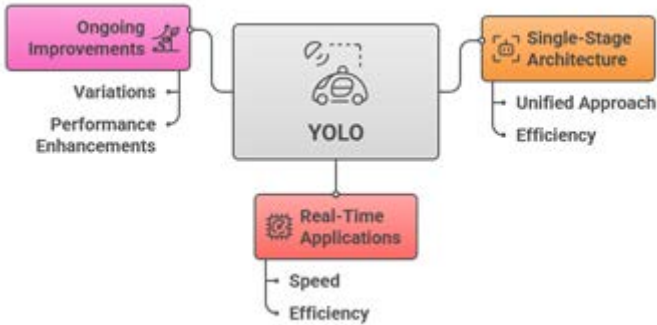


Figure 2. YOLO: Real-time object detection

Generative Modelling and Data Augmentation: GANs
Another radical solution to the problem of insufficient data is synthetic data generation. Generative modelling is another fundamental subfield of image processing, and GANs have revolutionised this field. Generative Adversarial Networks (GANs), proposed by Goodfellow et al. (2020), construct a game theory-based "min-max" game. A generator network produces fake images, while a discriminator network attempts to determine whether these images are real or fake (Goodfellow et al., 2020).

This competitive training process enables the production of synthetic derivatives of hard-to-obtain data, such as medical images, at a quality indistinguishable from the real thing. In subsequent studies, derivatives such as CycleGAN have increased data diversity by performing style transfer between unpaired images (e.g., converting CT images to MRI images) (Zhu et al., 2017). An illustration related to GANs and data augmentation is provided in Figure 3.

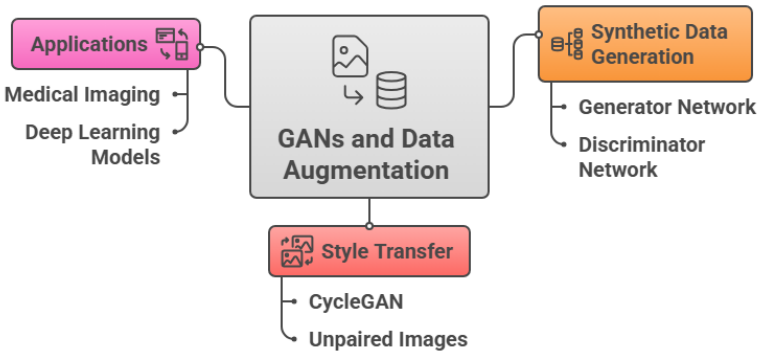


Figure 3. GANs and Data Augmentation

Edge Detection Review: Edge detection is one of the most fundamental steps in image processing. Sun and colleagues' review systematically examines the development from traditional filter-based methods to contemporary AI-driven approaches. This review is important in that it demonstrates how hierarchical features learned by deep networks (as discussed in Voulodimos' review) can extract edge and boundary information, the first step in complex visual tasks, more accurately and robustly.

2.2. Overcoming Limitations: Data, Cost, and Architectural Evolution

The success of deep learning models, particularly in real-world scenarios with hardware and data constraints, is directly related to the efficiency and transferability of the architecture. The studies reviewed reveal two main strategies developed to

overcome these constraints: Transfer Learning and Changing Architectural Paradigms (Transition from CNNs to Transformers).

Deep Transfer Learning (DTL) The most common strategy for overcoming the "small data" problem in healthcare is Deep Transfer Learning (DTL). This approach relies on transferring the weights of models trained on large-scale, general-purpose datasets (e.g., ImageNet) to a more specific and constrained target task (e.g., lung nodule detection) (Deng et al., 2009; Iman et al., 2023). Zeiler and Fergus (2014) demonstrated that CNNs learn universal visual features such as edges and textures in their early layers (Zeiler & Fergus, 2014). Reusing these universal features dramatically reduces training time and cost while increasing the model's generalisation ability in diagnosing rare diseases (Jiang et al., 2017).

Architectural Paradigm Shift: From CNNs to Transformers (ViT) In recent years, the undisputed dominance of CNNs in image processing has been challenged by the impact of Transformer architectures, which have revolutionised the field of Natural Language Processing (NLP). The work of Vaswani et al. (2017), based on the "attention mechanism" (Vaswani et al., 2017), has been adapted to visual data. Dosovitskiy et al. (2021) treated an image as a sequence of 16x16 patches using the Vision Transformer (ViT) model and achieved results comparable to CNNs using a pure attention mechanism, without the need for convolution (Dosovitskiy et al., 2021). While CNNs focus on local features (Voulodimos et al., 2018), the ViT's "self-attention" mechanism can model long-range relationships across the entire image (global context). This signals a new era in terms of scalability and performance, particularly for large datasets.

Resolved Constraints: This strategy dramatically reduces the training time and energy consumption of a new model.

Furthermore, it eliminates the need to train models from scratch, particularly in areas with scarce labelled data, such as the diagnosis of rare diseases (as mentioned by Shen et al. and Jiang et al.). This makes DTL a viable solution for deploying deep learning models on edge devices with limited processing power. Zeiler and Fergus's models, trained on ImageNet, easily set new performance records on the Caltech-101 and Caltech-256 datasets by simply retraining the classifier layer, providing experimental evidence of DTL's power.

The undisputed dominance of CNNs (Voulodimos et al.) in image processing has begun to be questioned alongside the rise of the Transformer architecture in Natural Language Processing (NLP). Dosovitskiy and colleagues' work introducing the Vision Transformer (ViT) marks the most significant architectural evolution in this field.

Vision Transformers (ViT - Dosovitskiy et al.): The Transformer architecture, traditionally standard in NLP (Natural Language Processing), has also revolutionised image processing. ViT treats images as a sequence of 16x16 patches and applies a pure Transformer directly to these sequences. This work demonstrated that dependence on CNNs is not a prerequisite and proved that when pre-trained on large datasets, ViT can achieve results comparable to, or even better than, modern CNNs, while requiring fewer computational resources. This represents the culmination of architectural evolution and the quest for scalability in image processing.

Self-Attention vs. CNNs: While CNNs extract hierarchical features through local receptive fields (Zeiler & Fergus), the self-attention mechanism at the heart of ViT gives it the ability to compute global dependencies, modelling the relationship of each patch in the sequence with all other patches.

This enables the model to instantly gain information about the entire image.

Scalability and Success: When pre-trained on large-scale datasets (such as JFT-300M), ViT has achieved results comparable to, and even better than, state-of-the-art CNNs in classification tasks. Furthermore, ViT's requirement for significantly fewer computational resources for training has proven its superiority in terms of scalability. This demonstrates a significant shift in AI architecture, from local feature extraction (CNN) to global relationship modelling (Transformer).

3. CURRENT APPLICATIONS: THE INTEGRATION OF DEEP LEARNING INTO CLINICAL AND CRITICAL AREAS

The theoretical success of deep learning architectures has been translated into practical applications in fields requiring high precision, particularly in medicine. This section analyses the concrete reflections of the architectures examined in previous sections (U-Net, CNN, YOLO, GAN) in medical imaging, real-time monitoring, and synthetic data generation, based on the literature.

3.1. Medical Imaging and Precision Diagnosis Systems

The fundamental objective in medical image analysis is to automate disease detection and quantitative evaluation processes (Shen et al., 2017). In this context, two main tasks stand out: precise segmentation and pattern classification.

The Clinical Equivalent of Precise Segmentation The U-Net architecture proposed by Ronneberger et al. (2015) has become the "gold standard" for biomedical image segmentation. It is particularly crucial to distinguish neuronal structures, cell nuclei, or cancerous tissues at the pixel level in MR and

microscopy images (Ronneberger et al., 2015). The structure of U-Net, supported by data augmentation techniques, demonstrates high success even in the detection of rare pathologies with limited labelled data. The success of this architecture has also inspired advanced segmentation models developed later, such as DeepLab, which aims to capture the multi-scale context (Chen et al., 2017).

Automatic Diagnosis and Decision Support Systems The detection of patterns that are difficult to discern with the human eye in modalities such as X-rays, mammograms, and fundus images (e.g., early-stage lung nodules or signs of diabetic retinopathy) is the area where deep CNN architectures are most powerful. Deep networks such as VGG (Simonyan & Zisserman, 2015) and ResNet (He et al., 2016) form the backbone of these classification tasks. Jiang et al. (2017) note that artificial intelligence has evolved beyond image analysis alone to become multimodal systems that integrate electronic health records and genomic data to provide personalised treatment recommendations (Jiang et al., 2017).

General Health Integration: Jiang and colleagues' review demonstrates that artificial intelligence is not limited to image analysis alone, but is also combined with other health data such as electronic health records and genomic data to provide personalised treatment recommendations and disease prognosis predictions.

3.2. Real-Time Detection and Surgical Monitoring

Real-time object detection technologies developed for autonomous vehicles and security systems are being adapted for surgical navigation and patient monitoring systems in the healthcare sector. **YOLO Architecture and Instant Detection** The YOLO (You Only Look Once) architecture, developed by Redmon and colleagues (2016), solves object detection as a

single-stage regression problem, enabling processing in less than a second (Redmon et al., 2016). This speed, developed for detecting pedestrians and traffic signs in autonomous driving, has been successfully transferred to tasks such as real-time detection of polyps during endoscopy and colonoscopy in the medical field or instantaneous tracking of surgical instruments in robotic surgery. Video Analysis and Patient Safety Deep learning-based video analysis methods (Voulodimos et al., 2018), used for anomaly detection in industrial processes, are employed in hospitals to monitor intensive care units, detect falls, and automatically identify violations of patient safety.

3.3. Creative Applications and Data Synthesis

Data privacy and labelling costs are the biggest obstacles to medical artificial intelligence. Generative models play a critical role in overcoming this constraint. Synthetic Data Generation (GANs) Generative Adversarial Networks (GANs), introduced to the literature by Goodfellow et al. (2020), enable the generation of synthetic images statistically equivalent to real data without sharing actual patient data (Goodfellow et al., 2020). This is used to enrich training datasets, particularly for rare diseases. Additionally, it is used to generate highly realistic synthetic training data that can be utilised in areas with scarce labelled data, such as medical imaging (to solve the few-data problem for U-Net) or the simulation of rare events. Furthermore, architectures such as CycleGAN enable cross-modal data synthesis by transforming between unpaired images (e.g., converting an MRI image to a CT image) (Zhu et al., 2017).

Image Enhancement and Super-Resolution The enhancement of noisy images taken with low-dose radiation or the sharpening of low-resolution microscopy images with super-resolution is another output of GAN-based approaches entering routine clinical practice. Generative Adversarial Networks

(GANs) (Goodfellow et al.) have demonstrated that artificial intelligence is capable not only of analysis but also of production.

3.4. Future-Oriented Approaches: Scalability and Trust

The future of image processing is built on architectures that can process larger data sets and systems that can explain the decisions of these architectures. Global Analysis with Vision Transformer (ViT) Unlike the structure of CNNs, which focus on local features, the Vision Transformer (ViT) presented by Dosovitskiy et al. (2021) can model the relationship with the image as a whole thanks to the self-attention mechanism (Dosovitskiy et al., 2021). This capability offers superior potential compared to CNNs, particularly in the analysis of gigapixel-sized digital pathology slides (whole slide imaging), in terms of discovering long-range relationships between tissues.

Explainable Artificial Intelligence (XAI) and Trust In medical diagnosis, "black-box" models are difficult to accept. Visualisation techniques pioneered by Zeiler and Fergus (2014) reveal which region of the image the network focuses on when making decisions (Zeiler & Fergus, 2014). Such Explainable Artificial Intelligence (XAI) approaches are becoming a legal and ethical imperative to ensure doctors trust AI decisions and to detect potential biases.

4. FUTURE TRENDS: HYBRID PARADIGMS AND ETHICAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Artificial intelligence research in the field of image processing, building upon past CNN-based successes (Voulodimos et al., 2018), will deepen in three main areas in the future: architectural flexibility, diversity of generative modelling, and explainable reliability. Recent developments in the literature

indicate an evolution from purely performance-focused models towards efficient and understandable systems.

4.1. Convolution-Free Architectures: The Dominance of Transformers

The most prominent trend in future projections is the replacement of CNNs in image processing by the Transformer architecture or the creation of hybrid structures with them. The Evolution of Attention Mechanisms The "Attention" mechanism developed by Vaswani et al. (2017) for natural language processing (Vaswani et al., 2017) has yielded revolutionary results when adapted to visual data. The Vision Transformer (ViT), introduced by Dosovitskiy et al. (2021), processes images in patches, overcoming the local limitations of CNNs and demonstrating the ability to model global context (Dosovitskiy et al., 2021). Hybrid and Channel Attention Models However, rather than completely abandoning CNNs, combining their strengths with attention mechanisms is also a strong trend. In this context, the Squeeze-and-Excitation (SE) Networks proposed by Hu et al. (2018) have pioneered hybrid architectures by modelling cross-channel relationships, enabling the network to focus on important features (Hu et al., 2018). Future research will focus on such hybrid optimisations that combine the local feature extraction power of CNNs with the global perspective of Transformers.

Multimodal Models: Since Transformers were originally designed for text (NLP), the transition to multimodal models that combine image and text data within the same architecture (e.g., bridging vision and language) will accelerate. This will pave the way for systems that can describe visual content in natural language or generate images based on a natural language query.

4.2. Generative Artificial Intelligence and Probabilistic Modelling

Data scarcity and privacy issues will be addressed not only with GANs but also with different families of generative models.

GAN and VAE Diversity While Goodfellow et al.'s (2020) GAN architecture represents the pinnacle in high-resolution and realistic image synthesis (Goodfellow et al., 2020), Variational Autoencoders (VAEs), developed by Kingma and Welling (2014), offer a more organised latent space by learning the probabilistic distribution of the data (Kingma & Welling, 2014). In the future, approaches combining the sharpness of GANs with the mathematical consistency of VAEs will come to the fore in medical anomaly detection and rare disease simulations. Multimodal Synthesis Models that process text and images on the same plane will form the basis of systems that synthesise images from reports written in natural language by doctors or automatically generate reports from radiological images. Efforts to understand the "black box" nature of CNNs are becoming a legal requirement, particularly in high-risk areas such as healthcare (Jiang et al., 2017). Transparency of Decision Processes Visualisation techniques pioneered by Zeiler and Fergus (2014) form the basis of modern Explainable Artificial Intelligence (XAI) approaches. Future systems will not only provide the result "cancer present" but will also offer reasoned decisions such as "cancer is suspected due to tissue irregularities in this region of the image." This transparency will play a key role in establishing clinicians' trust in artificial intelligence.

Explainable Artificial Intelligence (XAI): Future models will not only offer high accuracy but will also present the reasoning behind their decisions in an understandable manner (e.g., showing which areas of the image they focused on when

detecting a tumour). Zeiler and Fergus' visualisation technique forms the basis of modern XAI approaches.

Model Robustness: The robustness of artificial intelligence systems against cyber-attacks and adversarial examples is a research priority, particularly for critical infrastructure and autonomous systems (YOLO).

4.3. Data Efficiency and Continuous Learning

Strategies developed to reduce dependence on large datasets (Deng et al., 2009) will become more autonomous. Iman and colleagues (2023) emphasise the importance of meta-learning strategies that automatically determine what information to transfer in Deep Transfer Learning (DTL) processes (Iman et al., 2023). Additionally, "Few-Shot Learning" methods, where the model can learn from a single example, will become standard in managing rare medical cases.

Smarter Transfer and DTL Optimisation: In the future, more complex meta-learning and continual learning strategies that automatically determine how much and which information to transfer to a task (as discussed in the Iman et al. review) will come to the fore.

Few-Shot Learning: The model's ability to learn from a single example or very few examples will be crucial, especially in rare medical conditions (as in U-Net's problem domain).

Synthetic Data and Simulation: Hyper-realistic synthetic data generated by GANs (Goodfellow et al.) will be used in a more systematic and scalable manner to bridge the gap in real-world labelled data.

4.4. Ethical Boundaries of Image Generation and Manipulation

The hyper-realistic increase in the visual synthesis capabilities of generative artificial intelligence models (especially

GANs), while beneficial in areas such as medical data production, has brought with it serious security risks and potential ethical violations. The Threat and Detection of Deepfakes The indistinguishability of images manipulated or entirely generated by artificial intelligence (deepfakes) from reality poses a critical threat to information security. Recent studies in the literature indicate that the focus of image processing should shift from production to "detection and verification". In this context, forensic analysis algorithms that capture anomalies in the frequency domain of generated images or detect the "fingerprints" left by GANs will be one of the most active research areas in the future. Along with the increase in realism, methods for detecting fake images and videos (deepfakes) and verifying their source will be one of the most critical security and ethical research areas in computer vision. Medical ethics and the risk of hallucination in the field of health, the biggest ethical boundary faced by generative models is the problem of "hallucination". A model simulating a rare disease producing tissues that contradict biological reality or adding a non-existent tumour to an image poses unacceptable risks in diagnostic processes. Therefore, future image processing architectures must not only offer high resolution but also incorporate "Conditional Generation" and ethical control layers that guarantee the biological and physical consistency of the generated data.

High Resolution and Conditional Generation: GAN architectures will continue to develop systems that are faster, more stable, and capable of generating images based on specific conditions (such as text or style) (conditional GANs).

These trends clearly demonstrate that the evolution of deep learning in image processing is not merely a technological race, but also a quest to build reliable, ethical, and resource-efficient systems.

5. CONCLUSIONS

The comprehensive literature analysis conducted in this study demonstrates that image processing paradigms in healthcare have irreversibly evolved from the era of "manual feature extraction" requiring human intervention to the era of "deep representational learning" that understands the nature of data and its hidden patterns. The fundamental architectures (U-Net, YOLO, GAN, and ViT) and strategies (Transfer Learning) examined prove that this transformation is not merely an algorithmic performance increase; it has created a tangible technological revolution in clinical diagnosis, treatment planning, and surgical intervention processes. The findings obtained and the general trend in the literature can be synthesised along four main axes.

5.1. Data Efficiency and Segmentation Accuracy

The critical limitation of medical imaging, namely the scarcity of labelled data, has been overcome thanks to specialised architectures. The U-Net architecture developed by Ronneberger and colleagues has achieved segmentation success that is considered the "gold standard" in biomedical imaging, even with a limited amount of data, thanks to its symmetric encoder-decoder structure and skip connections. This confirms that deep learning can be effectively used in the diagnosis of rare diseases not only with "Big Data" but also with "Small and Qualitative Data" through the right architectural designs.

5.2. Real-Time Capability and Clinical Applicability

The processing load created by traditional, multi-stage image processing systems has been eliminated by the based detection approach introduced by the YOLO architecture. This architecture, which solves object detection through a single neural network, has made deep learning a practical solution for "latency-critical" healthcare applications, such as robotic surgery and

endoscopic navigation, where milliseconds are crucial, with processing speeds exceeding 45 frames per second.

5.3. Paradigm Shift in Architecture and Global Context

The most recent and radical result highlighted by the study is the disruption of the dominance of Convolutional Neural Networks (CNNs). The Vision Transformer (ViT) presented by Dosovitskiy and colleagues breaks CNNs' dependence on local receptive fields by analysing images in patches rather than processing them pixel by pixel. This approach, which can model distant relationships and global context in images thanks to the attention mechanism, has opened up a new frontier of research, particularly in the analysis of gigapixel-sized digital pathology slides. Furthermore, this work has demonstrated that when pre-trained on large datasets, a pure Transformer architecture can outperform or compete with CNNs. This result challenges the undisputed dominance of CNNs in image processing and indicates that future architectural designs will focus more on the ability to model global dependencies (self-attention).

5.4. Balance Between Productivity and Reliability

Analyses show that artificial intelligence is transforming into a force that not only "analyses" but also "produces". GAN architectures democratise training processes by generating highly realistic synthetic data that can replace patient data that cannot be shared due to data privacy concerns. However, the acceptance of these "black box" models in clinical settings depends on Explainable Artificial Intelligence (XAI) studies pioneered by Zeiler and Fergus. Visualising the areas the model focuses on when making decisions is emerging as a fundamental ethical requirement that enables physicians to trust AI decisions. Redmon and colleagues' YOLO work has created a new classification that combines speed and performance by

transforming object detection into a single regression problem. The fact that YOLO's base model runs at 45 frames per second (FPS) (with Fast YOLO reaching 155 FPS) demonstrates that these technologies are practically applicable for autonomous vehicles and real-time surveillance systems. This speed is far ahead of traditional, multi-stage detection systems. This is a concrete quantitative result demonstrating that real-time standards in processing speed have become achievable through deep learning. Ronneberger, Fischer, and Brox's U-Net architecture has demonstrated that accurate segmentation is possible even with a limited number of training examples (thanks to data augmentation). By winning the 2015 ISBI cell tracking competition by a wide margin, U-Net demonstrated the superior ability of CNNs to distinguish complex structures in medical images at the pixel level. This is a qualitative result showing the successful combination of high accuracy and data efficiency in a critical area. Research has solidified three key findings that summarise deep learning's overall success in image processing. The table presented systematizes the core competency areas of modern deep learning models and the core evidence they provide to the literature along three main axes:

Table 1. Core result areas and effects of modern image processing models

Core Result Area	Core Evidence (Emphasis)
Feature Learning	Models have surpassed traditional methods by automatically learning Hierarchical Feature Representations from data rather than manually designed features.
Data and Cost Management	Transfer Learning (TL) strategies have solved the problem of limited labelled data and popularised artificial intelligence by reducing training costs (especially for edge devices).
Productivity Power	The adversarial training principle has demonstrated that artificial intelligence is not only capable of analytics but also of generating synthetic data and synthesising high-resolution images.

Reviews indicate that deep learning-based image processing is not a destination but a continuous evolutionary process. While CNNs (Voulodimos et al.) lay a strong foundation, specialised architectures such as U-Net, YOLO, and GANs have transformed this foundation into indispensable tools for specific tasks. The success of ViT indicates that the field will continue to discover new architectural paradigms and advance not only in visual analysis but also in ethics, reliability, and computational efficiency.

In conclusion, deep learning-based image processing technologies are not a rival system aiming to replace physicians in healthcare; rather, they are positioned as powerful "intelligent assistants" that extend their perceptual limits, automate tedious and repetitive tasks, and increase diagnostic accuracy. Future research will focus less on pure performance gains and more on integrating hybrid architectures (CNN-Transformer), explainable (XAI) and ethically bounded reliable.

REFERENCES

- Chen, L. C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., & Yuille, A. L. (2017). DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(4), 834–848.
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 248–255.
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. (2020). Generative Adversarial Networks. *Communications of the ACM*, 63(11), 139–144.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 770–778.
- Iman, M., Arabnia, H. R., & Rasheed, K. (2023). A review of deep transfer learning and recent advancements. *Technologies*, 11(2), 40.
- Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., Wang, Y., Dong, Q., Shen, H., & Wang, Y. (2017). Artificial

intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4), e000101.

Kingma, D. P., & Welling, M. (2014). Auto-encoding variational bayes. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Lin, T. Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2980–2988.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788.

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*, 9351, 234–241.

Shen, D., Wu, G., & Suk, H.-I. (2017). Deep learning in medical image analysis. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 19, 221–248.

Simonyan, K., & Zisserman, A. (2015). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Sun, R., Lei, T., Chen, Q., Wang, Z., Du, X., Zhao, W., & Nandi, A. K. (2022). Survey of image edge detection. *Frontiers in Signal Processing*, 2, 826967.

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 30, 5998–6008.

- Voulodimos, A., Doulamis, N., Doulamis, A., & Protopapadakis, E. (2018). Deep learning for computer vision: A brief review. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2018, 7068349.
- Zeiler, M. D., & Fergus, R. (2014). Visualizing and understanding convolutional networks. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 818–833.
- Zhu, J. Y., Park, T., Isola, P., & Efros, A. A. (2017). Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2223–2232.

AN OVERVIEW OF ELECTRIC VEHICLES TECHNOLOGY

Abdurrahim ERAT¹

1. INTRODUCTION

Electrification has become a defining trend in modern transportation systems, positioning electric vehicles (EVs) as a key technological response to growing energy efficiency and environmental sustainability requirements. Interest in electric transportation alternatives has grown dramatically as a result of rising energy consumption, diminishing unrenewable conventional energy supplies, expanding urbanization, and environmental regulations concerning achieving carbon neutrality. Many nations have hastened the development of EVs in an effort to minimize reliance on petroleum and harmful emissions. The adoption of EVs, particularly battery-electric cars, is seen as an opportunity to address environmental concerns and the energy crisis (Sun, Li, Wang, & Li, 2020). The proliferation of internal combustion engine vehicles that consume non-renewable conventional fuels presents significant global challenges concerning energy security and environmental sustainability. Urban-dominated transportation activity represents a significant source of atmospheric greenhouse gas release and harmful air contaminants, thereby intensifying the impacts of climate change and global temperature rise. In response, numerous nations have accelerated the development of EV technologies to mitigate oil dependence and reduce environmental pollution. New energy vehicles, such as EVs, offer

¹ Lecturer, Şırnak University, Şırnak Vocational College, Electrical and Energy Department, ORCID: 0000-0003-0606-9132.

advantages in low energy consumption and zero tailpipe emissions, positioning them to play a critical role in the systematic mitigation of carbon emissions across transport systems and the emergence of low-carbon cities. The electrification of transport is widely regarded as a promising solution to global public health and environmental issues, replacing conventional fuel-burning mechanical powertrain architectures with sustainable and clean power plants, thereby becoming a central development trend within the automotive industry (Barman et al., 2023; Bhatti, Salam, Aziz, Yee, & Ashique, 2016; Ehsani, Singh, Bansal, & Mehrjardi, 2021; Feng & Magee, 2020; Jahangir, Golkar, Ahmadian, & Elkamel, 2020; Kittner et al., 2020; Sun et al., 2020; Xiong et al., 2022).

Electric vehicles provide benefits such as emissions-free, ease of use, affordability, reliability, comfort, efficiency, weight and size, availability range of driving, charging period compared to traditional vehicles. Electric mobility is projected to assume a central position within smart city infrastructures, operating in synergy with collective transportation and mobility-sharing concepts. Therefore, further research is needed to enhance battery performance and simplify charging. The autonomy of EVs is their primary disadvantage. Nonetheless, scientists are developing better battery solutions to boost range for driving and reduce volume, expense, and timing for charging (Sanguesa, Torres-Sanz, Garrido, Martinez, & Marquez-Barja, 2021). Recent statistics from the IEA's Global EV Outlook 2025 reveal that electric vehicles reached a historic milestone in 2024, with sales surpassing 17 million units and constituting over 20% of worldwide passenger car demand. Furthermore, projections for 2025 indicate that annual EV sales will exceed 20 million units, representing approximately one-quarter of all vehicle sales (IEA, 2025). These figures clearly illustrate that electric vehicles are no longer an emerging niche technology but a dominant and rapidly

expanding component of the global automotive landscape. Figure 1 shows the global sales volume of electric vehicles between 2014 and 2024. BEV refers to battery electric vehicles, while PHEV refers to plug-in hybrid vehicles.

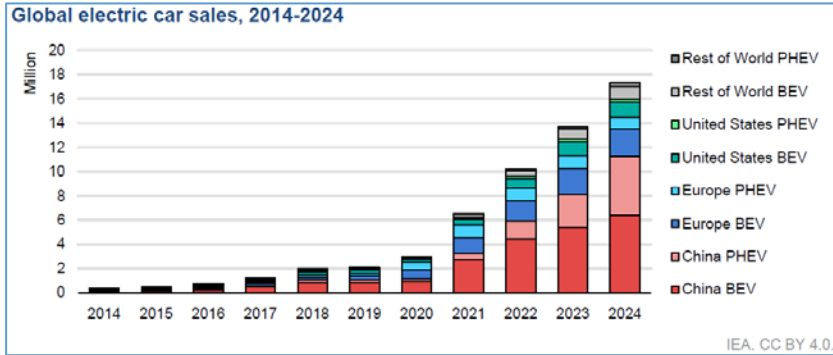


Figure 1. Global Sales Quantity of EVs between 2014 and 2024 (IEA, 2025)

Power electronics systems provide the essential foundation required for electric vehicles to attain peak performance levels and operational dependability (Pahlevani & Jain, 2020). By enabling the reliable and highly efficient management of energy within EVs, power electronics technology is critical for overcoming major industry hurdles, including improving mileage and efficiency while simultaneously addressing cost pressures. The rapid expansion of electric vehicle adoption is primarily attributed to transformative progress in power electronics, most notably the extensive utilization of wide-bandgap semiconductor materials such as silicon carbide and gallium nitride (Do, Trovão, Li, & Boulon, 2021). These materials, utilized in inverters, converters, and onboard chargers, significantly reduce energy losses and thermal constraints compared to conventional Silicon (Si) devices. The acceleration of EV technologies in recent years has also been significantly influenced by advancements in electric motor technology, similar to power electronics advancements. Charging infrastructure

development is another crucial element accelerating EV deployment.

Collectively, these advancements underscore the inherently multidisciplinary nature of EV technology, demonstrating its reliance on fields spanning material science, power electronics, control engineering, computer science, and energy systems. Building upon this multidisciplinary foundation, this review section aims to provide a comprehensive evaluation of the overall architectural structure and the key components constituting the electric vehicle system.

2. BRIEF HISTORY OF EVs

The architectural development of EVs has undergone a remarkable transformation over the past three decades, evolving from basic battery–motor configurations into highly integrated, software-defined mobility platforms. This evolution reflects advancements in battery packaging, power electronics, electric drive systems, vehicle control architectures, and thermal management strategies. As EV adoption accelerates globally, understanding the structural progression of EV architectures provides critical insight into current design philosophies and future mobility platforms.

The development of EVs began with early discoveries in electromagnetism. Faraday’s study in 1821 enabled Joseph Henry’s first electric motor, which later supported advancements in rechargeable batteries introduced by Sinstedden in 1854. Edison’s incandescent lamp in 1880 further contributed to the infrastructure needed for electric mobility (Harikrishnan et al., 2023). Gustave Trouve developed the first electric vehicle (EV), a tricycle, in 1881(Chandran, Palanisamy, Benson, & Sundaram, 2022). The initial prototype of an electrically autonomous vehicle, deemed suitable for large-scale production and featuring

a dual-occupant configuration, was publicly showcased by Romanov during the demonstrative activities of 1889 (Korneev, Niu, & Ibrahim, 2024). By the 1880s and 1890s, innovators such as Charles Jeantaud, Frank Sprague, William Morrison, and Morris and Salom produced various early EV designs, including commercial streetcars, experimental cars, and fleet-oriented electric cabs. Despite promising progress, the early twentieth century brought financial challenges and growing competition from affordable gasoline vehicles, especially after Ford's 1908 Model T. As internal combustion technology improved and petroleum became widely available, EV production declined sharply by 1915. Interest in EVs remained low until the 1970s, when oil price concerns renewed attention to alternative propulsion. Research funding from the U.S. Department of Energy and developments such as GE's hybrid vehicle in 1982 marked the beginning of modern EV research efforts (Harikrishnan et al., 2023; Korneev et al., 2024).

By the late 1980s, the electronics sector faced increasing pressure to enhance battery performance. Nickel-metal hydride (Ni-MH) technologies had already reached commercial availability, while lithium-based batteries - offering significantly greater energy density - were on the verge of practical deployment by 1991 (Alonso-Cepeda, Villena-Ruiz, Honrubia-Escribano, & Gómez-Lázaro, 2024; Banerjee et al., 2020). Electric vehicle progress accelerated from the mid-1990s onward. General Motors introduced the fully electric EV1 in 1996, followed shortly by growing interest in hybrid systems, highlighted by Toyota's launch of the Prius in 1997 and its global expansion by 2000. Rising fuel prices in the 2000s renewed momentum for EV development, leading Tesla to release the all-electric Roadster in 2008, which marked a major shift toward lithium-ion-based mobility. Throughout the late 2000s and early 2010s, several notable milestones demonstrated improvements in range,

performance, and engineering such as long-distance conversions, high-speed experimental EVs, and efficiency-focused prototypes. The commercial introduction of extended-range and plug-in hybrid models, including the Chevrolet Volt and Opel Ampera, further diversified the EV landscape. By the mid-2010s, mainstream manufacturers increased battery capacities and performance capabilities, while high-power EVs like Rimac showcased the upper limits of electric propulsion. Recent developments leading into the early 2020s have focused on extending driving range, improving battery reliability, enhancing safety features, expanding fast-charging infrastructure, and lowering vehicle costs-supporting broader global adoption of electric mobility (Alonso-Cepeda et al., 2024).

3. ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY

The fundamental design of an EV includes the entirety of hardware and software components that take power from the power grids and energy storage unit and transform it into the mechanical force that drives the wheels. This configuration must guarantee the highest level of safety, optimal performance, and uninterrupted operation during use. EV topologies are characterized by high-voltage electrical components, sophisticated power electronics, modular drive units, and integrated software layers that cooperate to provide extremely efficient propulsion, in contrast to traditional internal combustion engine systems. The fast adoption of electric mobility in recent decades has been largely driven by the ongoing advancement of these systems (Macharia, Garg, & Kumar, 2023).

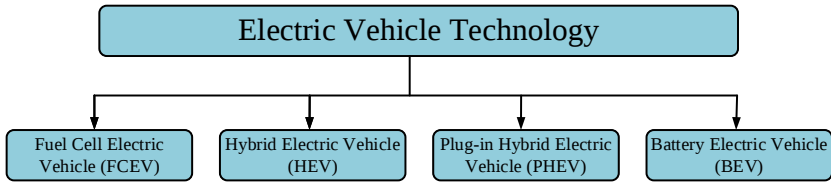


Figure 2. Major classes of electrified vehicle propulsion systems

As delineated in Figure 2, the taxonomy of vehicular technologies is typically segmented into four cardinal categories, wherein the degree of electrification demonstrates a systematic progression from the left terminus to the right terminus (Kumar, Panda, Naayagi, Thakur, & Panda, 2023). Fossil fuel based petroleum resources are finite and are expected to become increasingly scarce in the foreseeable future. Moreover, emissions originating from internal combustion engine driven vehicles constitute a major environmental and public health concern. These challenges have accelerated the development of alternative transportation technologies that rely on electrically powered systems. Within this context, fuel cell technology has emerged as a promising solution and has been increasingly integrated into electric vehicle platforms as well as other energy-related applications (Muthukumar et al., 2021). A fuel cell electric vehicle (FCEV) operates on an electric propulsion system similar to that of conventional battery electric vehicles; however, it generates electrical energy onboard through the electrochemical conversion of hydrogen stored in pressurized tanks rather than relying on externally supplied electrical energy. Since no combustion process occurs, the vehicle does not emit harmful exhaust gases during operation. Depending on the drivetrain architecture, fuel cell-based vehicles can be classified into two main configurations: pure fuel cell electric vehicles and fuel cell hybrid electric vehicles (FCHEVs). These classifications reflect differences in energy storage and power management strategies (Kumar et al., 2023). A simplified schematic representation of a typical FCEV configuration is illustrated in Figure 3. Fuel cell

technology represents a promising low-emission alternative for the automotive sector, particularly in applications requiring rapid refueling and high energy availability. Hydrogen, used as the primary energy carrier, produces no direct emissions of carbon dioxide or nitrogen oxides during vehicle operation and can be applied across various transportation and industrial sectors. Nevertheless, the widespread deployment of fuel cell electric vehicles remains constrained by regulatory complexity, limited standardization of refueling infrastructure, and the high costs associated with hydrogen production, storage, and distribution. Establishing a harmonized regulatory framework is therefore essential to enhance competitiveness and accelerate the commercialization of FCEVs (Asif & Schmidt, 2021).

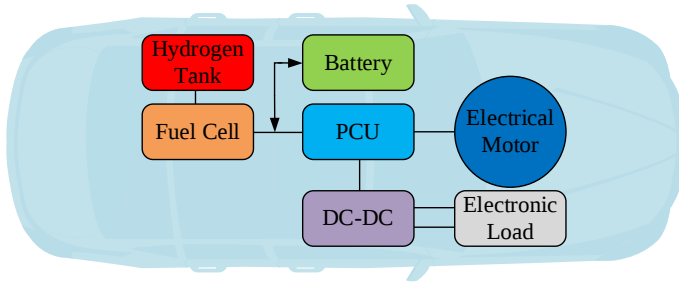


Figure 3. Schematic representation of an FCEV powertrain

A hybrid electric vehicle (HEV) combines a conventional combustion-based power unit with an electric drive system, allowing propulsion through both chemical fuel and stored electrical energy. This architecture is well suited to urban driving, as regenerative braking improves energy efficiency under frequent stop-and-go conditions. By optimizing the interaction between the two power sources, HEVs achieve reduced fuel consumption and lower emissions, making them a cost-effective near-term alternative to fully electric vehicles, despite the relatively high cost of battery systems (Singh, Bansal, & Singh, 2019). HEVs offer a viable alternative to conventional internal

combustion engine–based transportation by reducing emission-related impacts while maintaining compatibility with existing infrastructure and lowering operational costs. As implied by their designation, HEVs integrate an internal combustion engine powered by conventional fuel with an electric drive system supplied by a rechargeable battery pack. The vehicle can operate using either propulsion source individually or utilize both systems concurrently, depending on driving conditions, to achieve improved power and torque performance (Fantin Irudaya Raj & Appadurai, 2021). The fundamental configuration of a HEV is illustrated in Figure 4.

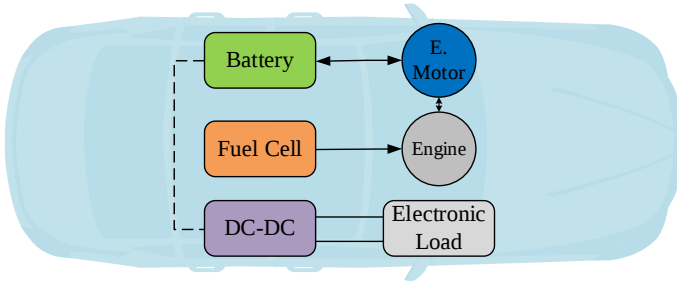


Figure 4. Schematic representation of an HEV powertrain

Plug in hybrid electric vehicles (PHEVs) integrate a combustion-based power unit with an electrically driven traction system and are increasingly recognized as a prominent component of next-generation mobility solutions. PHEVs are driven by a propulsion system that integrates a fuel-driven combustion engine with an electric motor supplied by an externally rechargeable power source (Kanimozhi, Natrayan, Angalaeswari, & Paramasivam, 2022). PHEVs can significantly reduce greenhouse gas emissions during vehicle operation when regular charging enables predominantly electric-mode driving (Mandev, Plötz, Sprei, & Tal, 2022). Although PHEVs provide notable economic and environmental advantages, their increasing integration into residential areas introduces new challenges for electricity distribution networks. To examine these effects, a

detailed analytical framework is established that represents essential vehicle parameters and consumer-driven charging patterns, while also considering projected adoption rates and expected growth in household electricity demand for future evaluation(Shafiee, Fotuhi-Firuzabad, & Rastegar, 2013). Figure 5 illustrates the fundamental configuration of a plug-in hybrid electric vehicle. Electrical energy is mainly supplied by the battery, while an additional energy source supports the system. A DC-DC converter regulates and distributes electrical power to the on-board electronic loads and the traction system. The electric motor delivers drive torque from electrical power, whereas the combustion engine supplements propulsion in hybrid operation. This configuration enables flexible energy management, allowing the vehicle to operate in electric, hybrid, or combined propulsion modes with improved efficiency and reduced emissions.

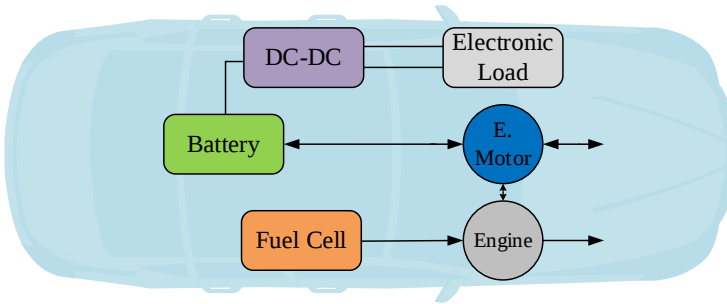


Figure 5. Schematic representation of a PHEV powertrain

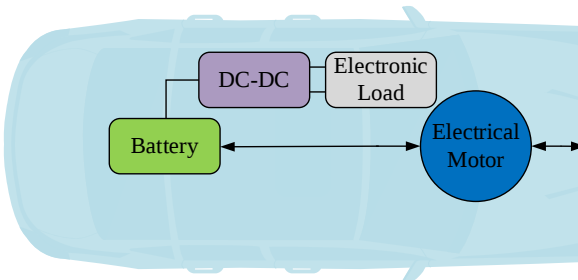


Figure 6. Schematic representation of a BEV powertrain

Battery electric vehicles (BEVs) operate exclusively on electrical energy stored in an onboard battery pack. The battery is replenished through external charging infrastructure, while additional energy recovery is achieved via regenerative braking. The driving range of a BEV is primarily determined by the capacity of its battery system (Hasan, Mahmud, Ahasan Habib, Motakabber, & Islam, 2021). It represents a fundamental departure from internal combustion engine cars, as it possesses zero tailpipe emissions and requires no gasoline or diesel. Figure 6 represents a battery-based electric propulsion layout. The battery acts as the main energy source and delivers power through a DC-DC converter, which adjusts the voltage level for vehicle operation. Regulated power is supplied to the on-board electronic loads and to the electric motor. The electric motor converts electrical energy into mechanical output to propel the vehicle, enabling fully electric driving without support from an internal combustion engine.

4. CHARGING AND ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

EVs are primarily composed of a battery system and a charging interface. Electric vehicle charging architectures are commonly divided into vehicle-integrated and externally located solutions, while charging units are additionally distinguished by their power transfer capability as either one-way or two-way. Externally mounted chargers are deployed at dedicated charging sites, whereas integrated chargers are embedded within the vehicle structure. The design of on-board chargers is constrained by limitations in size, weight, available space, and overall cost. In a unidirectional charging system, electrical energy flows solely from the grid to the vehicle, whereas a bidirectional charger enables energy exchange in both directions, allowing power

transfer not only from the grid to the vehicle but also from the vehicle to the grid (Sujitha & Krithiga, 2017). Unidirectional charging is often preferred in early implementations due to reduced hardware complexity, simpler connectivity, and lower impact on battery aging. In contrast, bidirectional charging enables both grid-to-vehicle and vehicle-to-grid operation, requiring efficient power conversion and stable energy exchange capabilities. On the other hand, EV chargers can be categorized based on connection configuration, charging level, installation type, and energy source. Owing to limitations related to size, weight, and cost, conventional on-board chargers are typically unsuitable for high-power applications; integrating the electric drive system with charging functions has been proposed as a potential solution (Kumar et al., 2023).

Several battery charging system architectures are commonly employed, such as universal battery charging systems, stand-alone photovoltaic-based EV charging systems, grid-connected photovoltaic EV charging systems, and grid-connected wind turbine generator-based EV charging systems (Sujitha & Krithiga, 2017). Many EV charger studies model battery loads as static, overlooking the state of charge -dependent dynamics of the charging process. Since charging behavior and voltage characteristics vary with the battery state of charge, different state of charge levels result in distinct load responses, highlighting the need for dynamic EV load modeling (Haidar & Muttaqi, 2016).

The efficacy and broad deployment of EVs fundamentally rely on the sophistication of their associated charging infrastructure, a system governed by advanced power electronics architectures designed for high-fidelity AC-DC conversion. Modern charging equipment, ranging from high-power off-board DC fast chargers utilizing rectifiers and converters, to compact onboard chargers, increasingly leverages wide bandgap semiconductors like silicon carbide and gallium nitride. This

transition facilitates significantly higher switching frequencies, resulting in reduced component size, lower energy losses, and system efficiencies. Beyond core power transfer, the evolution towards smart charging and vehicle-to-grid functionality-enabled by bidirectional converter topologies and communication standards like ISO 15118-is crucial for managing grid stability, allowing EVs to serve as decentralized energy storage buffers, and fundamentally transforming the electric mobility paradigm into an integrated, flexible component of the smart energy ecosystem.

Although electric vehicles are designed to operate using alternative energy resources, their widespread implementation is still constrained by limitations associated with energy storage systems, including concerns related to safety, physical dimensions, economic cost, and system-level management. Energy storage systems play a critical role in electric power systems by providing flexible and continuous power support, thereby enhancing system reliability and mitigating the effects of transmission congestion and supply interruptions caused by high demand (Hannan, Hoque, Mohamed, & Ayob, 2017). Batteries, fuel cells, and ultracapacitors are the most widely employed energy storage devices in electric vehicles, where they may function either as primary power sources or as auxiliary units in hybrid configurations. Batteries represent a widely adopted and highly effective energy storage solution and are integral components of nearly all modern electronic devices (Podder, Chakraborty, Islam, Kumar, & Alhelou, 2021). For EV applications, battery systems must provide sufficient energy capacity to achieve the desired driving range while offering high power capability to support strong acceleration, efficient regenerative braking, and fast-charging operation. In addition, the battery lifetime should be comparable to that of conventional automotive components, and the system must exhibit durability

against environmental factors such as climatic and mechanical stresses. Furthermore, high tolerance to abusive operating conditions, including overcharging and internal short circuits, is essential to ensure safe and reliable vehicle operation (Dixon, 2010). Supercapacitors offer very high charge–discharge capability but have low energy density, making them unsuitable as primary EV energy sources. Instead, they are used to supply short-term peak power demands, providing rapid support similar to conventional capacitors in electronic systems (Kouchachvili, Yaïci, & Entchev, 2018). Fuel cells are electrochemical systems that directly transform the chemical energy of hydrogen into electrical power. Their fundamental structure comprises an electrolyte sandwiched between an anode and a cathode.

5. CONCLUSION

This study has presented a comprehensive and systematic overview of EV technology, addressing its historical evolution, architectural classifications, key components, and supporting energy infrastructures. The rapid global transition toward electric mobility has been shown to be driven not only by environmental and regulatory pressures but also by significant technological progress in power electronics, energy storage systems, and charging architectures. The comparative examination of major electrified vehicle categories—including BEVs, HEVs, PHEVs, and FCEVs—demonstrates that no single architecture represents a universal solution. Instead, each configuration offers distinct advantages and limitations depending on energy source availability, infrastructure maturity, driving patterns, and system cost. In this context, power electronics emerges as a unifying and enabling technology, ensuring efficient energy conversion, flexible power management, and reliable interaction between propulsion systems, energy storage units, and the electric grid.

Furthermore, the study emphasizes that advances in battery technologies, fuel cells, and supercapacitors are central to extending driving range, improving system reliability, and supporting fast and bidirectional charging capabilities. The growing integration of wide-bandgap semiconductor devices in converters, inverters, and chargers has substantially improved efficiency, power density, and thermal performance, thereby accelerating the commercialization and large-scale adoption of EVs. Notwithstanding recent progress, high energy storage expenses, limited charging network expansion, interoperability issues, and the need for holistic system optimization continue to constrain large-scale adoption. Overcoming these limitations demands long-term cross-disciplinary research efforts, harmonized regulatory strategies, and continuous financial commitment to intelligent charging solutions and grid-responsive technologies. Overall, the findings of this study confirm that EVs will play a pivotal role in the decarbonization of the transportation sector and the development of sustainable energy ecosystems, provided that technological innovation and infrastructure expansion progress in a coordinated and balanced manner.

REFERENCES

- Alonso-Cepeda, A., Villena-Ruiz, R., Honrubia-Escribano, A., & Gómez-Lázaro, E. (2024). A Review on Electric Vehicles for Holistic Robust Integration in Cities: History, Legislation, Meta-Analysis of Technology and Grid Impact. *Applied Sciences*, Vol. 14, p. 7147. <https://doi.org/10.3390/app14167147>
- Asif, U., & Schmidt, K. (2021). Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV): Policy Advances to Enhance Commercial Success. *Sustainability*, Vol. 13, p. 5149. <https://doi.org/10.3390/su13095149>
- Banerjee, P., Franco Jr, A., Xiao, R. Z., Naidu, K. C. B., Rao, R. M., Pothu, R., & Boddula, R. (2020). Advancement in Electrolytes for Rechargeable Batteries. In *Rechargeable Batteries* (pp. 87–98). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119714774.ch5>
- Barman, P., Dutta, L., Bordoloi, S., Kalita, A., Buragohain, P., Bharali, S., & Azzopardi, B. (2023). Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113518. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113518>
- Bhatti, A. R., Salam, Z., Aziz, M. J. B. A., Yee, K. P., & Ashique, R. H. (2016). Electric vehicles charging using photovoltaic: Status and technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 34–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.091>
- Chandran, M., Palanisamy, K., Benson, D., & Sundaram, S. (2022). A Review on Electric and Fuel Cell Vehicle Anatomy, Technology Evolution and Policy Drivers

- towards EVs and FCEVs Market Propagation. *The Chemical Record*, 22(2), e202100235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tcr.202100235>
- Dixon, J. (2010). Energy storage for electric vehicles. *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 20–26. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2010.5472647>
- Do, T. Van, Trovão, J. P. F., Li, K., & Boulon, L. (2021). Wide-Bandgap Power Semiconductors for Electric Vehicle Systems: Challenges and Trends. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 16(4), 89–98. <https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3112943>
- Ehsani, M., Singh, K. V, Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T. (2021). State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967–984. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3072788>
- Fantin Irudaya Raj, E., & Appadurai, M. (2021). *The Hybrid Electric Vehicle (HEV)—An Overview BT - Emerging Solutions for e-Mobility and Smart Grids* (V. Kamaraj, J. Ravishankar, & S. Jeevananthan, Eds.). Singapore: Springer Singapore.
- Feng, S., & Magee, C. L. (2020). Technological development of key domains in electric vehicles: Improvement rates, technology trajectories and key assignees. *Applied Energy*, 260, 114264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114264>
- Haidar, A. M. A., & Muttaqi, K. M. (2016). Behavioral Characterization of Electric Vehicle Charging Loads in a Distribution Power Grid Through Modeling of Battery Chargers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(1), 483–492.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2483705>

- Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017). Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 771–789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171>
- Harikrishnan, R., Sivagami, P., Pushpavalli, M., Rajesh, G., Abirami, P., & Ram, M. (2023). Evolution of Electric Vehicle-A Review. *2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 322–330. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT55814.2023.10061001>
- Hasan, M. K., Mahmud, M., Ahasan Habib, A. K. M., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 41, 102940. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>
- IEA. (2025). *Global EV Outlook 2025 Expanding sales in diverse markets*. 1–173. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- Jahangir, H., Golkar, M. A., Ahmadian, A., & Elkamel, A. (2020). Why electric vehicles? In *Electric Vehicles in Energy Systems: Modelling, Integration, Analysis, and Optimization* (pp. 1–20). Springer.
- Kanimozhi, G., Natrayan, L., Angalaeswari, S., & Paramasivam, P. (2022). An Effective Charger for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEV) with an Enhanced PFC Rectifier and ZVS-ZCS DC/DC High-Frequency Converter. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 7840102.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/7840102>

Kittner, N., Tsiropoulos, I., Tarvydas, D., Schmidt, O., Staffell, I., & Kammen, D. M. (2020). *Chapter 9 - Electric vehicles* (M. Junginger & A. B. T.-T. L. in the T. to a L.-C. E. S. Louwen, Eds.). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818762-3.00009-1>

Korneev, A., Niu, Y., & Ibrahim, A. (2024). Electric vehicles in the 21st century: Historical evolution, environmental impact, and safety challenges for sustainable mobility. *Khwarizmia*, 2024, 32–38.

Kouchachvili, L., Yaïci, W., & Entchev, E. (2018). Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>

Kumar, M., Panda, K. P., Naayagi, R. T., Thakur, R., & Panda, G. (2023). Comprehensive Review of Electric Vehicle Technology and Its Impacts: Detailed Investigation of Charging Infrastructure, Power Management, and Control Techniques. *Applied Sciences*, Vol. 13, p. 8919. <https://doi.org/10.3390/app13158919>

Macharia, V. M., Garg, V. K., & Kumar, D. (2023). A review of electric vehicle technology: Architectures, battery technology and its management system, relevant standards, application of artificial intelligence, cyber security, and interoperability challenges. *IET Electrical Systems in Transportation*, 13(2), e12083. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/els2.12083>

Mandev, A., Plötz, P., Sprei, F., & Tal, G. (2022). Empirical

- charging behavior of plug-in hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 321, 119293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119293>
- Muthukumar, M., Rengarajan, N., Velliyangiri, B., Omprakas, M. A., Rohit, C. B., & Kartheek Raja, U. (2021). The development of fuel cell electric vehicles – A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1181–1187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679>
- Pahlevani, M., & Jain, P. K. (2020). Soft-Switching Power Electronics Technology for Electric Vehicles: A Technology Review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 1(1), 80–90. <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2020.2999590>
- Podder, A. K., Chakraborty, O., Islam, S., Kumar, N. M., & Alhelou, H. H. (2021). Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. *IEEE Access*, 9, 51865–51895. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069593>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, Vol. 4, pp. 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., & Rastegar, M. (2013). Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1351–1360. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2251483>
- Singh, K. V., Bansal, H. O., & Singh, D. (2019). A

comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. *Journal of Modern Transportation*, 27(2), 77–107.

Sujitha, N., & Krithiga, S. (2017). RES based EV battery charging system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 978–988. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.078>

Sun, X., Li, Z., Wang, X., & Li, C. (2020). Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*, Vol. 13, p. 90. <https://doi.org/10.3390/en13010090>

Xiong, R., Kim, J., Shen, W., Lv, C., Li, H., Zhu, X., ... Sun, F. (2022). Key technologies for electric vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(2), 100041. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100041>

BİYOSENSÖRLER: ÇEŞİTLERİ, KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Ali Can TÜFEKÇİ¹

Ahmet Enes KARACA²

Burak TAŞ³

Özge TÜZÜN ÖZMEN⁴

1. GİRİŞ

Hızlı sonuç verme, yüksek duyarlılık ve seçicilik gibi avantajları nedeniyle biyosensörler, geleneksel analiz yöntemlerine kıyasla tercih edilmektedir. Özellikle nanoteknoloji ve biyoteknolojideki gelişmelerle birlikte biyosensörlerin performansları önemli ölçüde artmıştır. Sağlık sektöründe hastalıkların erken teşhisinde, çevresel kirleticilerin tespitinde, gıda analizlerinde ve tarımsal uygulamalarda etkin şekilde kullanılmaktadır. Biyosensörlerin gelişim süreci, 1962 yılında Clark ve Lyons'un glikoz ölçümü için geliştirdiği ilk enzimatik elektrotla (şekil 1) başlamıştır. Bu sensör, glikozu tanıyan bir enzim (glikoz oksidaz) ve bunun oluşturduğu kimyasal değişimi elektrik sinyaline çeviren bir elektrottan oluşuyordu. Enzim glikozla karşılaştığında, glikozu parçalamak için oksijen kullanır.

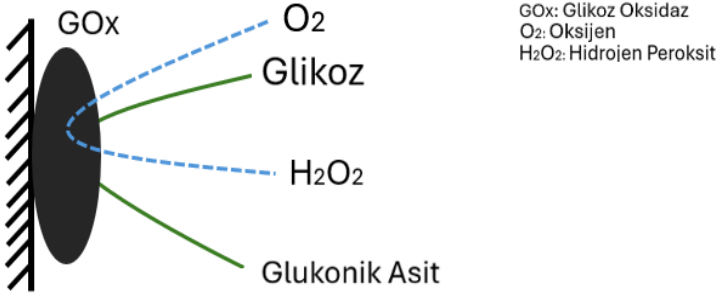
¹ Lisans Öğrencisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0009-2301-2681.

² Lisans Öğrencisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0004-6292-8290.

³ Arş. Gör., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, ORCID: 0000-0002-9928-5004.

⁴ Prof. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Temel Bilimler Bölümü, ORCID: 0000-0002-5204-3737.

Glikoz ne kadar çoksa, reaksiyon sırasında o kadar fazla oksijen tüketilir. Elektrot da bu oksijen azalmasını ölçerek glikoz miktarını belirler. Böylece sensör, glikozun neden olduğu kimyasal değişimi elektrik sinyaline dönüştürerek ölçüm yapılmasını sağlar. Bu basit prensip, bugün hâlâ birçok modern biyosensörün temelini oluşturmaktadır [1]. Bunu takip eden yıllarda antikör temelli immünosensörler, DNA ve RNA bazlı genosensörler ve son olarak hücre ve doku bazlı canlı sensörler geliştirilmiştir [2]. Her yeni nesil sensör, duyarlılık, özgüllük, taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi parametrelerde iyileştirmeler getirmiştir. Ayrıca COVID-19 pandemisi gibi küresel sağlık krizleri, hızlı ve yerinde tanı sistemlerine olan ihtiyacı artırarak biyosensör araştırmalarını daha da hızlandırmıştır [3]. Günümüzde biyosensörler, sadece laboratuvar ortamlarında değil, taşınabilir cihazlar şeklinde saha uygulamalarında da etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu araştırma, biyosensör teknolojilerinin bilimsel temellerini, sınıflandırmalarını, karakterizasyon yöntemlerini ve geniş uygulama alanlarını detaylı bir şekilde ele almaktadır.

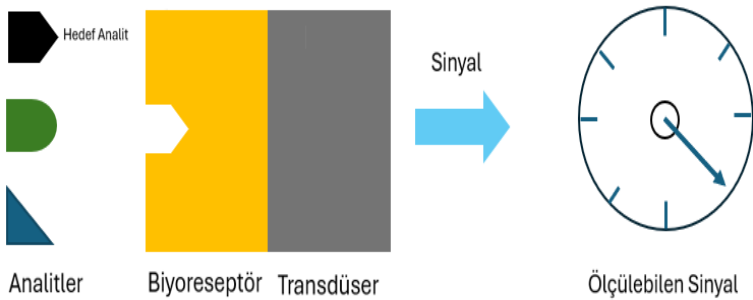


Şekil 1. Clark ve Lyons'un glikoz ölçümü için geliştirdiği ilk enzimatik elektrot yüzeyinin şematik gösterimi

2. BİYOSENSÖR NEDİR?

Biyosensörler, bir biyolojik tanıma elemanının spesifik etkileşimi sonucunda ortaya çıkan biyokimyasal tepkimeyi

algılayarak, bunu ölçülebilir ve genellikle elektriksel bir sinyale dönüştüren sistemlerdir. Bu tanıma elemanları genellikle enzimler, antikorlar, DNA zincirleri, aptamerler ya da hücreler gibi biyolojik moleküllerdir [3]. Sadece analiz edilen bileşiğe karşı yüksek özgüllük göstermeleri nedeniyle değil, aynı zamanda hızlı yanıt vermeleri, taşınabilir olmaları, tekrarlanabilir sonuçlar sağlamaları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle birçok alanda yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Günümüzde biyosensörler sağlık teşhislerinden çevresel izlemeye, gıda güvenliğinden biyoterörizmle mücadeleye kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Temel olarak bir biyosensör üç ana bileşenden oluşur: tanıma elemanı, transdüser ve sinyal işleme birimi. Tanıma elemanı hedef analiti tanır, transdüser bu etkileşimi sinyale çevirir ve son olarak sinyal işleme birimi bu sinyali ölçülebilir hale getirir [1]. Örneğin glikoz sensörlerinde glikoz oksidaz enzimi, glikozun varlığında hidrojen peroksit üretir ve bu elektrokimyasal olarak tespit edilir. Son yıllarda nanomalzeme destekli biyosensörlerin duyarlılık ve seçicilik özelliklerinde önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Nano parçacıklar, yüzey alanını artırarak biyomoleküllerin bağlanma etkinliğini artırmakta ve daha düşük algılama limitleri elde edilmektedir [4]. Ayrıca, minimum invazivlik sunarak gerçek zamanlı izlemeye olanak sağlarlar. Biyosensörlerin geliştirilmesinde biyoteknoloji, nanoteknoloji, elektronik ve malzeme bilimi disiplinleri entegre bir şekilde çalışmaktadır.



Şekil 2. Biyosensörün bileşenlerinin şematik gösterimi

Yeni nesil biyosensörler, birçok avantajlarının yanısıra yapay zeka destekli analiz sistemleriyle entegre edilmekte, bu da sensörlerin akıllı ve otonom hale gelmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik evrim, biyosensörleri sadece tanı ve teşhis aracı olmaktan çıkarıp, sürekli izleme ve önleyici sağlık hizmetlerinde etkin bir bileşen haline getirmektedir.

3. BİYOSENSÖR ÇEŞİTLERİ

Biyosensörler, kullanılan transdüser tipine ve biyolojik tanıma elemanına bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. En yaygın sınıflandırma, sinyal üretme biçimine göre yapılır. Bu bağlamda biyosensörler elektrokimyasal, optik, piezoelektrik, termal, hücre tabanlı ve nanomalzeme tabanlı biyosensörler olarak gruplandırılır. Her sensör tipi, farklı avantajlara ve sınırlamalara sahiptir ve seçimi uygulama alanına göre yapılmalıdır.

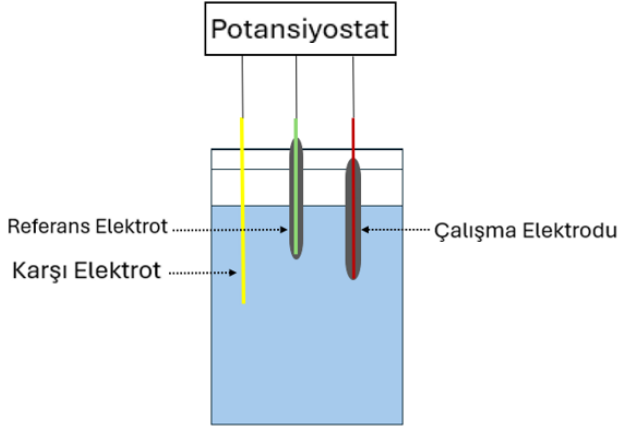


Şekil 3. Biyosensör çeşitleri

3.1. Elektrokimyasal Biyosensörler

Elektrokimyasal biyosensörler, hedef analit ile biyolojik tanıma elemanı arasındaki etkileşim sonucunda ortaya çıkan elektriksel değişimleri ölçerek çalışan tanı sistemleridir. Bu sensörler genellikle üç elektrotlu bir yapıdan oluşur: analitik sinyalin üretildiği çalışma elektrodu, akımın tamamlanmasını sağlayan karşı elektrot ve ölçümlerin sabit bir potansiyel

referansına göre yapılmasını sağlayan referans elektrot. Sensörün çalışma prensibini belirleyen elektrokimyasal teknikler arasında amperometri, potansiyometri, voltametri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yer alır. Amperometri hedef molekülün neden olduğu akım değişimlerini ölçerken, potansiyometri elektrot potansiyelindeki değişimleri değerlendirir. Voltametri, uygulanan potansiyelle akım arasındaki ilişkiyi ortaya koyar; EIS ise biyolojik etkileşimlerin elektrot yüzeyindeki empedans üzerindeki etkilerini analiz eder [5]. Elektrokimyasal sensörler düşük tespit limitleri, geniş lineer aralık, hızlı yanıt süreleri ve taşınabilir sistemlerle entegrasyon kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Glikoz ölçümünde kullanılan ticari sensörler en yaygın örneklerdir. Bu sensörler, düşük maliyetli ve kolay üretilebilir olmaları nedeniyle özellikle klinik ve gıda analizlerinde yaygın olarak tercih edilir.



Şekil 4. Elektrokimyasal biyosensörlerde üç elektrot sistemi

3.2. Optik Biyosensörler

Optik biyosensörler, hedef analit ile biyolojik tanıma elemanı arasındaki etkileşimin neden olduğu optik özellik değişikliklerini tespit ederek çalışır. Bu değişiklikler genellikle absorpsiyon, kırılma indisi, floresans, fosforesans, Raman saçılımı veya yüzey plazmon rezonansı (SPR) gibi optik parametrelerin

ölçülmesiyle gerçekleştirilir [6]. Bu sensörler, yüksek duyarlılık ve özgüllükleriyle ön plana çıkar. Özellikle gerçek zamanlı analiz yapılmasına olanak tanınması ve etiket kullanılmadan doğrudan analiz yapılabilmesi, optik biyosensörlerin tercih edilme nedenlerinden biridir.

SPR tabanlı sensörler, biyomoleküllerin yüzeylere bağlanmasıyla oluşan kırılma indisi değişikliklerini ölçerek etkileşim kinetikleri hakkında bilgi sunar. Floresan tabanlı sensörler ise işaretlenmiş biyomoleküllerin emisyon sinyallerindeki değişiklikleri izler. Raman spektroskopisi ile kombine edilmiş yüzey arttırımlı Raman saçılımı (SERS) tekniği, ultra düşük konsantrasyonlardaki hedef analitleri tespit edebilme kapasitesine sahiptir. Optik biyosensörler çoğunlukla klinik tanı, çevresel izleme, biyogüvenlik ve farmasötik araştırmalarda kullanılır [6]. Bu sensörlerin avantajları arasında hızlı yanıt süresi, çoklu parametre analizi, minimal örnek hazırlama gereksinimi ve taşınabilirlik yer alır. Ancak yüksek maliyetli optik sistemler ve sinyalin dış ortamdan etkilenebilmesi gibi sınırlamaları da vardır. Son dönemde, mikroakışkan çiplerle entegre edilmiş optik biyosensör sistemleri geliştirilmektedir. Bu entegrasyon, örnek hacmini azaltmakta ve sensörleri daha kompakt hale getirmektedir. Ayrıca yapay zeka tabanlı görüntü işleme algoritmalarıyla sinyal işleme kapasitesi artırılmaktadır. Özellikle COVID-19 gibi pandemilerde hızlı antijen testlerinde kullanılan bazı sistemler, temelinde optik biyosensör teknolojisini barındırmaktadır [3].

3.3. Piezoelektrik Biyosensörler

Piezoelektrik biyosensörler, biyolojik tanıma elemanı ile hedef analit arasında gerçekleşen bağlanma sonucu oluşan kütle değişimini algılayarak çalışır. Bu sensörler, piezoelektrik kristallerin mekanik titreşim frekansında meydana gelen değişiklikleri elektrik sinyallerine dönüştürür [5]. Kuartz kristal

mikroterazi (QCM) bu alandaki en yaygın sensör sistemidir. QCM tabanlı biyosensörler, özellikle immünosensör ve DNA tabanlı genosensör uygulamalarında kullanılır [3]. Bu sensörlerin en önemli avantajı, işaretleme (labeling) gerektirmeden gerçek zamanlı tespit yapılabilmesidir. Ayrıca, piezoelektrik sensörler geniş sıcaklık ve pH aralığında çalışabilir. Bununla birlikte, sistemlerin sıvı ortamlarda kullanımı sırasında titreşim sönümleme etkisi gibi bazı sınırlamalar da mevcuttur. Yeni geliştirilen mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) ile piezoelektrik biyosensörler daha kompakt ve hassas hale getirilmiştir [10].

Biyomoleküllerin yüzeye immobilizasyon teknikleri, sensörün başarımında kritik rol oynar. Bu teknikler arasında kovalent bağlama, adsorpsiyon ve çapraz bağlama yöntemleri yer alır. Piezoelektrik biyosensörler, ilaç etkileşim çalışmaları, çevresel kirleticilerin analizi ve patojen tespiti gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

3.4. Termal Biyosensörler

Termal biyosensörler, biyokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan veya tüketilen ısı miktarını ölçerek hedef analitin konsantrasyonunu belirler. Bu sensörlerde ısı üretimi genellikle enzimatik reaksiyonlarla gerçekleştirilir. Termistör veya termoçift gibi cihazlar yardımıyla sıcaklık değişimi tespit edilir. Isı ölçümleri oldukça karardır ve dış etkenlerden çok az etkilenir [7].

Termal biyosensörler çoğunlukla metabolit analizlerinde, özellikle glikoz, laktat ve üre gibi küçük moleküllerin tespitinde kullanılır. Ayrıca bazı pestisitlerin ve antibiyotiklerin tespiti de bu sistemlerle mümkündür. Termal sensörler genellikle düşük maliyetli, dayanıklı ve taşınabilir sistemler olarak tasarlanır. Ancak bu sensörlerde seçicilik, optik ve elektrokimyasal sensörlere göre daha sınırlıdır [7].

Yeni nesil termal biyosensörlerde mikro akışkan sistemlerle entegrasyon sağlanarak örnek miktarları azaltılmış ve tepki süresi kısaltılmıştır. Ayrıca nano materyallerle güçlendirilmiş yüzeyler sayesinde biyolojik tanıma hassasiyeti artırılmıştır.

3.5. Hücre Tabanlı Biyosensörler

Hücre tabanlı biyosensörler, canlı hücrelerin çevresel uyarıcılara karşı verdiği fizyolojik ve biyokimyasal yanıtları algılayarak çalışır. Bu sensörler, toksik maddelerin, ilaçların, hormonların ve biyolojik ajanların etkilerini canlı sistemler üzerinde doğrudan değerlendirebilme yeteneğine sahiptir [8].

Bu sensörlerde genellikle memeli hücreleri, bakteriler, algler ya da maya hücreleri kullanılır. Hücre yanıtları, genellikle membran potansiyeli, iyon akımları, metabolik aktivite ya da hücre hareketleri gibi parametrelerle ölçülür. Hücre tabanlı biyosensörler özellikle farmasötik tarama, toksikoloji ve çevresel izleme uygulamalarında öne çıkar. Bu sistemlerin avantajı, analitlerin biyolojik etkilerini doğrudan canlı hücreler üzerinden gözlemlene imkanı sunmasıdır. Ancak hücrelerin yaşatılması ve stabilitesi sistem tasarımı açısından zorluk yaratır. Bu nedenle mikro akışkan sistemlerle entegre edilmiş hücre kültür platformları geliştirilmiştir.

Yeni yaklaşımlarda genetik olarak modifiye edilmiş hücreler kullanılarak spesifik hedeflere karşı daha hassas yanıt alınabilmektedir. Ayrıca biyosensör yüzeylerinde kullanılan biyomateryallerin hücre tutunması ve canlılığını artıracak şekilde tasarlanması da sistem performansını iyileştirmiştir [8].

3.6. Nanomalzeme Tabanlı Biyosensörler

Nanomalzeme tabanlı biyosensörler, nanoteknolojik materyallerle entegre edilmiş yüksek hassasiyetli biyosensör sistemleridir. Altın nanoparçacıkları, karbon nanotüpler, grafen,

kuantum noktalar ve manyetik nanoparçacıklar gibi nanomalzemeler kullanılarak biyosensör performansı önemli ölçüde artırılmıştır. Nanomalzemeler, biyolojik tanıma yüzey alanını artırır ve sinyal amplifikasyonu sağlar [9]. Bu biyosensörler genellikle düşük konsantrasyonlardaki analitlerin tespiti için uygundur ve bu nedenle erken tanı sistemlerinde ön plana çıkar. Elektronik, optik ve manyetik transdüksiyon yöntemleriyle çalışabilirler. COVID-19, kanser, Alzheimer gibi hastalıkların tanısında geliştirilen birçok yeni nesil sistem nano-biyosensör teknolojisine dayanmaktadır [3,4]. Aynı zamanda portatif, giyilebilir ve vücuda entegre edilebilir cihazlarda da kullanılmaktadırlar. Örneğin, kontakt lenslere entegre edilen glikoz sensörleri ya da cilt üstü giyilebilir ter analiz cihazları nanomalzeme tabanlı biyosensörlerle çalışmaktadır.

Nanomalzeme tabanlı biyosensörler, raktopamin gibi düşük konsantrasyonlarda bile sağlık riski oluşturabilen veteriner ilaç kalıntılarının hassas tespitinde önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Karbon nanotüpler, metal nanopartiküller, grafen ve iki boyutlu malzemeler gibi nanoyapılar; geniş yüzey alanları ve yüksek iletkenlikleri sayesinde biyomoleküllerin stabil immobilizasyonunu kolaylaştırarak sensörün analitik performansını artırır. Bu özellikler, hedef analitin sensör yüzeyine daha hızlı ulaşmasını ve daha güçlü sinyal üretimini sağlar. Böylece raktopamin çok düşük seviyelerde bile hızlı, seçici ve güvenilir bir şekilde tespit edilebilir ve klasik yöntemlere göre daha düşük tespit limitleri elde edilir. Artan gıda güvenliği gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda, nanomalzeme destekli biyosensörlerin taşınabilir, ekonomik ve gerçek zamanlı analiz sunması, onları geleneksel laboratuvar tekniklerine güçlü bir alternatif hâline getirmektedir [9].

4. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Biyosensörlerin başarısı, sadece biyomoleküler tanıma kapasitesiyle değil, aynı zamanda bu tanıma sürecinin güvenilir bir şekilde doğrulanması ve performansının karakterize edilmesiyle mümkündür. Karakterizasyon yöntemleri, biyosensörlerin yapısal, morfolojik, elektriksel ve fonksiyonel özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu yöntemler sayesinde biyosensör yüzeyindeki biyotanıma elemanlarının immobilizasyonu, sensör yüzeyinin homojenliği, fonksiyonel grupların varlığı, elektrokimyasal cevabın güvenilirliği ve biyoyoumluluk gibi temel parametreler değerlendirilir.

İlk olarak, SEM ve TEM gibi görüntüleme teknikleri, sensör yüzeyinin morfolojisini ve nano/mikro boyutlu yapısını analiz etmekte kullanılır [3,10]. SEM, yüzey topografyasını detaylı bir şekilde gözler önüne sererken, TEM sensör malzemesinin iç yapısını atomik düzeyde inceleme imkânı sunar. AFM, yüzey pürüzlülüğü ve kalınlık analizleri için tercih edilen bir tekniktir ve özellikle biyomoleküllerin yüzey üzerindeki dağılımını haritalamada kullanılır [11]. FTIR Spektroskopisi, sensör yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupların kimyasal bağlarını tespit ederek, biyotanıma elemanlarının immobilizasyonunun başarılı olup olmadığını anlamaya yardımcı olur. Bu yöntemde karakteristik piklerin varlığı, yüzeye bağlanan protein, enzim ya da antikorların doğrulanmasını sağlar [12]. Aynı şekilde, Raman Spektroskopisi de moleküler titreşimlerin analiz edilmesine olanak verir ve SERS ile kombine edildiğinde ultra düşük konsantrasyonlarda analit tespiti yapılabilir [7,13]. Elektrokimyasal karakterizasyon ise, biyosensörlerde sıklıkla başvurulan bir diğer kritik alandır. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), sensör yüzeyindeki yük transfer dirençlerini ölçerek tanıma katmanının oluşumunu takip eder. Bu teknik, özellikle elektrot yüzeyinde biyomolekül immobilizasyonu sonrası meydana gelen empedans

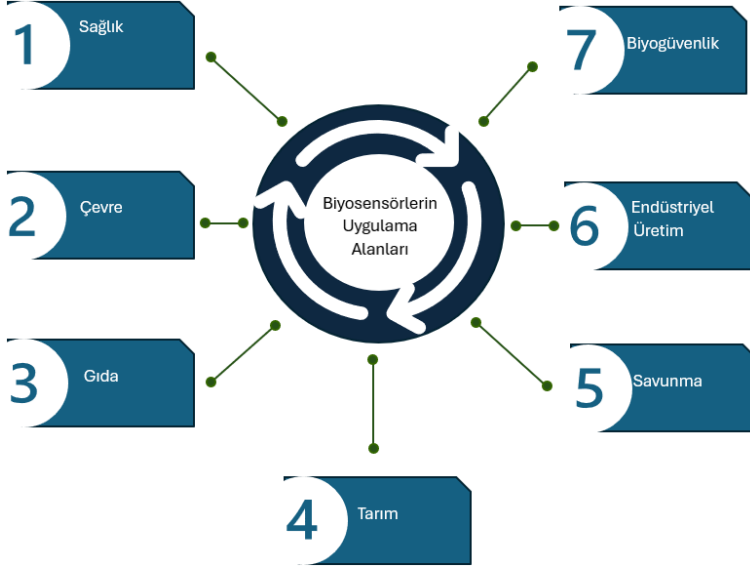
değişikliklerini incelemek için uygundur [14]. Diferansiyel Puls Voltametri (DPV) ve Kare Dalga Voltametri (SWV) gibi voltametrik yöntemler de elektrokimyasal yanıtın duyarlılığını ve seçiciliğini belirlemede kullanılır [5,15]. Ayrıca Amperometri ve Potansiyometri gibi klasik elektrokimyasal teknikler, gerçek zamanlı analit takibi için kullanılır. Optik karakterizasyon teknikleri de oldukça önemlidir. Özellikle SPR, biyosensör yüzeyinde gerçekleşen biyomoleküler etkileşimleri gerçek zamanlı ve işaretli (label-free) şekilde izleme olanağı sunar. SPR ile kinetik parametreler (bağlanma/dissosiyasyon hızları) ve afinite katsayıları (K_d) belirlenebilir. Diğer taraftan UV-Vis Spektroskopisi, kromofor içeren biyomoleküllerin tayini ve konsantrasyon hesaplamaları için kullanılır. Floresans Mikroskopisi ve Konfokal Mikroskopi gibi görüntüleme yöntemleri ise etiketli biyomoleküllerin sensör yüzeyindeki dağılımını doğrular [6,16].

Karakterizasyon aşamasında ayrıca zeta potansiyeli, temas açısı ölçümleri ve dinamik ışık saçılımı (DLS) gibi yüzey kimyası ve partikül stabilitesi ile ilgili ölçümler de yapılır. Zeta potansiyeli, partiküllerin yüzey yüklerini ve kolloidal stabilitelerini belirlemede kullanılırken, temas açısı analizi biyosensör yüzeyinin hidrofilik veya hidrofobik özelliklerini ortaya koyar [17]. Bu da biyomoleküllerin bağlanabilirliği açısından önemli ipuçları verir.

Biyosensörlerin in vitro ve in vivo koşullarda gerçekleştirilen performans testleri ile tekrar edilebilirlik, özgüllük, duyarlılık, tespit sınırı, lineer aralık ve tepki süresi gibi metrikler değerlendirilir. Ayrıca sensörlerin farklı sıcaklık, pH ve iyonik güç koşullarına karşı dayanıklılığı da karakterizasyon sürecinin bir parçasıdır. Bu kapsamda yapılan karakterizasyonlar, biyosensörlerin klinik, çevresel ve endüstriyel kullanıma hazır hale getirilmesi için temel öneme sahiptir.

5. UYGULAMA ALANLARI

Biyosensör teknolojisi, disiplinler arası bilim alanı olmasından dolayı sağlık, çevre, gıda, tarım, savunma, endüstriyel üretim ve biyogüvenlik gibi pek çok alanda yaygın kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, hedef analitlerin hızlı, hassas ve yerinde tespit edilmesini sağladıkları için birçok sektörde geleneksel yöntemlere göre daha avantajlıdır.



Şekil 7. Biyosensörlerin uygulama alanları

Klinik tanı alanında biyosensörlerin rolü giderek artmaktadır; pek çok araştırmada akut ve kronik hastalıkların biyobelirteçleri için elektrokimyasal sensör sistemleri geliştirilmiştir. Örneğin, kardiyak hasar teşhisi için troponin I belirtecini tayin eden kağıt-temelli elektrokimyasal immünosensörler literatürde rapor edilmiştir [18]. Prostat kanserine özgü antijen (PSA) için ise, graphene oksit / ssDNA tabanlı çift analitli biyosensörler geliştirilmiş; hem PSA'yı hem de VEGF'i tespit ederek erken tanı potansiyeli göstermiştir [19]. Benzer şekilde aptamer tabanlı elektrokimyasal biyosensörler de PSA ve VEGF'yi klinik örneklerde güvenilir şekilde

ölçebilmekte, bu sayede invazif olmayan ve hızlı tarama metodları sunmaktadır [20]. Çevresel izleme açısından, pestisitler ve ağır metaller gibi kirleticilerin hassas ve gerçek zamanlı takibinde oldukça etkilidir. Asetilkolinesteraz (AChE) inhibisyonuna dayanan elektrokimyasal biyosensörler, organofosfat ve karbamat pestisitlerinin saptanmasında kullanılmakta ve çevresel analizlerde klasik yöntemlere göre daha hızlı ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır [21]. Ağır metallerin tespitinde de DNA tabanlı ve enzim tabanlı elektrokimyasal sensörler yaygın olarak çalışılmıştır; örneğin kimi sistemlerde metal iyonlarının özgül bağlanma özelliklerinden yararlanılarak düşük konsantrasyonlarda determinizasyon sağlanmıştır [22]. Gıda güvenliğinde ise, mikotoksinler, pestisit kalıntıları ve patojenler gibi kritik hedeflerin hızlı analizini mümkün kılar. Nano-yapılı elektrokimyasal biosensörler, organofosfat pestisitler ve mikotoksinler gibi bileşenleri ultradüşük seviyelerde bile tespit edebilir – örneğin nanomalzemelerle modifiye edilmiş elektrotlar ve sinyal amplifikasyonu teknikleri kullanılarak LOD (tespit limiti) önemli ölçüde iyileştirilmiştir [23]. Savunma sanayide, biyolojik ajanların güvenli ve hızlı tanısında önemli bir potansiyel taşır. CRISPR tabanlı genosensörler ve mikro-akışkan elektrokimyasal sistemler, biyolojik tehdit ajanlarının DNA'sını çok kısa sürede, alan ortamında tespit edebilmek için geliştirilmektedir [24]. Kişiselleştirilmiş tıp çerçevesinde biyosensörler, non-invaziv biyolojik sıvılardan (ter, tükürük, idrar gibi) biyobelirteç analizi yaparak hastaya özel izleme ve tedavi planlaması için kullanılmaktadır. Literatürde, ter bileşimini izleyen giyilebilir elektrokimyasal sensörler ile hastanın metabolik profili gerçek zamanda değerlendirilmiş ve tedavi süreçleri dinamik olarak yönlendirilmiştir [25]. Endüstriyel biyoproseslerde (örneğin biyoyakıt, ilaç veya fermentasyon işlemleri), kritik kontrol noktalarında kullanılmaktadır. Böylece pH, çözünmüş oksijen, glikoz ya da etanol gibi parametreler anlık olarak izlenerek proses

optimizasyonu sağlanmaktadır. Bazı çalışmalar, mikroakışkan biosensörlerin fermantasyon tanklarına entegre edilerek üretim verimliliğini artırdığını göstermektedir [26]. Giyilebilir biyosensörler de son yıllarda büyük ilerleme kaydetmiştir. Sensörler, cilt yüzeyine veya tekstil ürünlerine entegre edilerek ter bileşimi, nabız veya vücut sıcaklığı gibi parametreleri sürekli izleyebilir. Bu sayede sporcuların performans takibi ve uzaktan hasta gözetimi mümkün hale gelmiştir; ayrıca yaşlı bireylerde sağlık durumunun gerçek zamanlı takibi için de potansiyel bir araçtır [27].

Point-of-care (POC) uygulamalarda, laboratuvar dışı kullanım için geliştirilen kompakt elektrokimyasal cihazlar sağlık hizmetlerini genişletmede kritik bir rol oynar. Özellikle SARS-CoV-2 için geliştirilen taşınabilir POC biyosensörler, ek amplifikasyon adımı olmaksızın numuneden hızlı şekilde sonuç verebilmekte ve kaynak kısıtlı bölgelerde yaygın tanı olanağı sunmaktadır [28]. Örneğin, ekran baskılı elektrotlara dayanan ve uygun maliyetli portatif potentiostat ile çalışan bir cihaz, SARS-CoV-2 dizilimini doğrudan hastadan alınan örneklerde başarıyla tespit etmiştir [29].

Tüm bu uygulamalar biyosensörlerin yalnızca bilimsel araştırma değil, aynı zamanda günlük yaşamın bir parçası haline geldiğini göstermektedir. Gelecekte yapay zeka, IoT (nesnelerin interneti) ve mikroakışkan sistemlerle daha fazla entegre olan biyosensörlerin, hem bireysel sağlık yönetiminde hem de toplum sağlığında oynayacağı rolün artması beklenmektedir.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Biyosensör teknolojileri, modern bilim ve endüstri dünyasında hızla gelişen ve geniş uygulama alanlarına yayılan çok disiplinli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Enzimatik sensörlerle başlayan bu gelişim süreci, bugün nanomalzeme

tabanlı, hücre temelli, optik, elektrokimyasal ve yapay zekâ ile entegre edilen ileri düzey sistemlere ulaşmıştır. Bu sensörler; yüksek duyarlılık, seçicilik, hızlı yanıt süresi, taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi önemli avantajları sayesinde geleneksel analiz yöntemlerine güçlü bir alternatif sunmaktadır. Geliştirilen sensörlerin sadece laboratuvar ortamında değil, saha koşullarında ve gerçek zamanlı uygulamalarda da etkin olarak kullanılabilmesi, biyosensörleri günümüz teknolojisinin kritik bileşenlerinden biri yapmıştır.

Nanoteknolojinin sağladığı katkı, özellikle biyosensörlerin performansında çarpıcı bir iyileşme yaratmıştır. Nanoparçacıklar, karbon nanotüpler, grafen ve kuantum noktaları gibi nanomalzemelerin yüksek yüzey alanı, olağanüstü iletkenlik ve fonksiyonelleştirme kolaylığı gibi üstün özellikleri; biyosensörlerin daha düşük tespit sınırlarıyla, daha hızlı ve daha güvenilir ölçümler yapmasına imkân tanımaktadır. Bu sayede raktopamin gibi düşük konsantrasyonlarda bile önemli sağlık riskleri oluşturan maddelerin bile hızlı tespiti mümkün hâle gelmiştir. Özellikle gıda güvenliği, çevresel analizler ve klinik tanı gibi alanlarda nanomalzeme destekli sensörlerin uygulama potansiyeli ve pratik faydası giderek artmaktadır.

Biyosensörlerin geleceğine bakıldığında, yapay zekâ, IoT, mikroakışkan sistemler ve giyilebilir teknolojilerle entegrasyonun bu alanı daha da ileri taşıyacağı açıktır. Akıllı veri işleme algoritmaları sayesinde sensörlerden elde edilen büyük veri setleri daha anlamlı hâle gelecek; kişiselleştirilmiş tıp uygulamaları, uzaktan sağlık izleme sistemleri ve otonom teşhis cihazları yaygınlaşacaktır. Aynı şekilde, portatif ve ekonomik tasarımlar sayesinde biyosensörlerin kaynak kısıtlı bölgelerde kullanımının yaygınlaşması, küresel sağlık hizmetlerine erişimi de olumlu yönde etkileyecektir.

Sonuç olarak biyosensör teknolojileri, sağlık, çevre, gıda, savunma ve endüstri gibi kritik alanlarda yüksek potansiyele sahip olup, geleceğin akıllı, hızlı ve güvenilir analiz sistemlerinin temelini oluşturmaya devam edecektir. Bu alanda süregelen bilimsel ilerlemeler, biyosensörlerin daha hassas, daha seçici, daha dayanıklı ve daha kullanıcı dostu hâle gelmesini sağlayarak hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için yeni fırsatlar yaratacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Keskin, M., & Arslan, F. (2020). Biyosensörler. Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi, 1(1-2), 51-60
- [2] Tüylek, Z. (2021). Biyoteknolojide Biyosensör ve Biyoçip Uygulamaları. International Journal of Life Sciences and Biotechnology, 4(3), 468-490.
- [3] Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., & Jemal, A. (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA: a cancer journal for clinicians, 68(6), 394-424.
- [4] Rawat, S., Phogat, P., & Chand, B. (2025). Advances in Nanomaterial-Based Biosensors: Innovations, Challenges, and Emerging Applications. Materials Today Communications, 113334.
- [5] Electrochemical-biosensors-based-on-carbon-nanotubes, Microchemical Journal, 2025.
- [6] Chen, C., Singh, R., Huo, S., Song, Y., Wang, K., Chiavaioli, F., & Hou, X. (2025). Evanescent wave-based optical biosensors for innovations, medical application and future perspectives. Journal of Advanced Research.
- [7] Cao, H., Mao, K., Zhang, H., Wu, Q., Ju, H., & Feng, X. (2024). Thermal stability and microdose-based coupling CRISPR/Cas12a biosensor for amplification-free detection of hgcA gene in paddy soil. Science of The Total Environment, 909, 168536.
- [8] Sobur, M. T. R., Hasan, M. M., Khatun, M. R., Mia, M. M., Islam, W., Iqbal, M. S., & Hossain, M. M. (2025). Machine learning-enhanced SPR-based optical biosensor for cancer cell detection. Optics & Laser Technology, 192, 113796. A-novel-peptide-based-

electrochemical-biosensor-for-breast-cancer, Biosensors, 2022.

- [9] Malik, S. S., Huang, W., Yuan, X., Ma, W., & Tao, X. (2025). Nanomaterial-based biosensors for ractopamine detection in food safety. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108253. Aptamer-Based-Electrochemical-Biosensors-Signal-Transduction, Sensors and Actuators, 2025.
- [10] He, J. H., He, C. H., Qian, M. Y., & Alsolami, A. A. (2024). Piezoelectric Biosensor based on ultrasensitive MEMS system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 376, 115664.
- [11] Pauliukaite, R., Paquim, A. M. C., Brett, A. M. O., & Brett, C. M. (2006). Electrochemical, EIS and AFM characterisation of biosensors: Trioxysilane sol-gel encapsulated glucose oxidase with two different redox mediators. *Electrochimica acta*, 52(1), 1-8.
- [12] Devouge, S., Conti, J., Goldsztein, A., Gosselin, E., Brans, A., Voué, M., ... & Marchand-Brynaert, J. (2009). Surface functionalization of germanium ATR devices for use in FTIR-biosensors. *Journal of colloid and interface science*, 332(2), 408-415.
- [13] Jin, X., Song, Y., Zhai, J., He, X., Liu, J., Zhang, J., ... & Song, C. (2025). SERS and electrochemical dual-mode biosensor powered by DNA walker-induced signal amplification for ultrasensitive detection of cancer-related miRNA. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 138244.
- [14] Kongsuphol, P., Ng, H. H., Pursey, J. P., Arya, S. K., Wong, C. C., Stulz, E., & Park, M. K. (2014). EIS-based biosensor for ultra-sensitive detection of TNF- α from non-diluted human serum. *Biosensors and Bioelectronics*, 61, 274-279.

- [15] Smutok, O., Kavetsky, T., Prokopiv, T., Serkiz, R., Wojnarowska-Nowak, R., Šauša, O., ... & Gonchar, M. (2021). New micro/nanocomposite with peroxidase-like activity in construction of oxidases-based amperometric biosensors for ethanol and glucose analysis. *Analytica Chimica Acta*, 1143, 201-209.
- [16] Taheri, H., Nayeri, M., Nasirizadeh, N., Seifati, S. M., & Ostovari, F. (2025). Molybdenum diselenide-based optical fiber biosensors for targeted detection of lung cancer-associated DNA. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 100859.
- [17] Zhang, Y., Zhou, Z., Yu, M., Sun, Y., Ying, S., & Qian, L. (2025). Recent advances in laccase: enzyme discovery, molecular modification and application to electrochemical biosensors in nanomaterials. *Microchemical Journal*, 114863.
- [18] de Resende, M. A. C., Oliveira, A. E. F., Cândido, T. C. D. O., da Silva, D. N., da Trindade, S. O. D., Ferreira, L. F., & Pereira, A. C. (2025). Development of a Paper-Based Electrochemical Immunosensor for Cardiac Troponin I Determination Using Gold Nanoparticle-Modified Screen-Printed Electrodes. *Chemosensors*, 13(11), 383.
- [19] Pan, L. H., Kuo, S. H., Lin, T. Y., Lin, C. W., Fang, P. Y., & Yang, H. W. (2017). An electrochemical biosensor to simultaneously detect VEGF and PSA for early prostate cancer diagnosis based on graphene oxide/ssDNA/PLLA nanoparticles. *Biosensors and Bioelectronics*, 89, 598-605.
- [20] Crulhas, B. P., Karpik, A. E., Delella, F. K., Castro, G. R., & Pedrosa, V. A. (2017). Electrochemical aptamer-based biosensor developed to monitor PSA and VEGF released

by prostate cancer cells. Analytical and bioanalytical chemistry, 409(29), 6771-6780.

- [21] Palchetti, I., Laschi, S., & Mascini, M. (2009). Electrochemical biosensor technology: application to pesticide detection. Biosensors and biodetection: methods and protocols: electrochemical and mechanical detectors, lateral flow and ligands for biosensors, 115-126.
- [22] Hernandez-Vargas, G., Sosa-Hernández, J. E., Saldarriaga-Hernandez, S., Villalba-Rodríguez, A. M., Parra-Saldivar, R., & Iqbal, H. M. (2018). Electrochemical biosensors: A solution to pollution detection with reference to environmental contaminants. Biosensors, 8(2), 29.
- [23] Viswanathan, S., Radecka, H., & Radecki, J. (2009). Electrochemical biosensors for food analysis. Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly, 140(8), 891-899.
- [24] Kivrak, E., Pauzaite, T., Copeland, N. A., Hardy, J. G., Kara, P., Firlak, M., ... & Ozsoz, M. (2021). Detection of CRISPR-Cas9-mediated mutations using a carbon nanotube-modified electrochemical genosensor. Biosensors, 11(1), 17.
- [25] Baysal, G. (2014). Nonwoven Tekstil Yüzeylerine Mikro Kanal Sistemi Entegrasyonu İle Biyosensör Tasarımı, Üretimi Ve Karakterizasyonu.
- [26] Dertli, M. E., & Dertli, S. E. (2025). Spor Endüstrisinde Giyilebilir Teknolojiler ve E-Ticaretin Etkileşimi: Kavramsal Bir Çerçeve. Dijitalleşen Dünyada Rekreasyon ve Spor, 33.
- [27] Meshesha, M., Sardar, A., Supekar, R., Bhattacharjee, L., Chatterjee, S., Halder, N., ... & Pal, B. (2023). Development and analytical evaluation of a point-of-care

electrochemical biosensor for rapid and accurate SARS-CoV-2 detection. *Sensors*, 23(18), 8000.

- [28] Lomae, A., Preechakasedkit, P., Hanpanich, O., Ozer, T., Henry, C. S., Maruyama, A., ... & Ngamrojanavanich, N. (2023). Label free electrochemical DNA biosensor for COVID-19 diagnosis. *Talanta*, 253, 123992.
- [29] Erdem, A., Senturk, H., & Yildiz, E. (2025). Smartphone-Integrated User-Friendly Electrochemical Biosensor Based on Optimized Aptamer Specific to SARS-CoV-2 S1 Protein. *Sensors*, 25(21), 6579.

SİMBİYOTİK 6G AĞLARINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR HABERLEŞME VE FİZİKSEL KATMAN GÜVENLİĞİ: ENERJİ HASADI, GİZLİLİK ORANI VE ANTEN TASARIMLARINA BÜTÜNCÜL BİR BAKIŞ

Muhammed Yusuf ONAY¹

1. GİRİŞ

Beşinci nesil (5G) ağların yaygınlaşmasının ardından kablosuz iletişim alanında 2030 sonrasına ilişkin altıncı nesil (6G) hedefleri belirgin hale gelmektedir. 6G vizyonu, terabit seviyesine yaklaşan veri iletim hızları, ultra güvenilir-düşük gecikmeli iletişim, yüksek hassasiyetli algılama-konumlama ve çok sayıda nesnenin ağa bağlantısını içermektedir (Jawad ve ark., 2023; Ferrag ve ark., 2023; Giordani ve ark., 2020). Amaç yalnızca spektrum verimliliğini artırmak değildir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik de dikkate alınmalıdır. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarında milyonlarca sensör ve etiketin pil değişimi gerektirmeden hizmet sunması, büyük bir ekonomik gereklilik yanında çevresel bir zorunluluktur (Zhang ve ark., 2025; Chen ve ark., 2023; Asif ve ark., 2023).

Bu bağlamda, literatürde simbiyotik iletişim önerilmiştir. Simbiyotik ağlarda, RF kaynağını paylaşan cihazlar birbirleriyle enerji ve bilgi iletimi arasında karşılıklı fayda sağlarlar (Zhang ve ark., 2019a; Yang ve ark., 2023; Long ve ark., 2019). RF kaynaklarının enerji hasadı için kullanımı ve aynı sinyallerin bilgi iletmeye amacıyla yeniden kullanımı, simbiyotik yapılara özellikle

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Hitit Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-4984-5421.

sürdürülebilir 6G IoT senaryoları bakımından bir cazibe kazandırmaktadır. Bu durum enerji tüketiminde önemli derecede bir azalmaya sebep olur ve ayrı altyapıya ihtiyaç gereksinimini de azaltır. Ancak, düşük güç ve enerji hasadı olan simbiyotik yapılar, fiziksel katman tehditlerine karşı klasik hücresel sistemlerden daha kırılgan olabilir (Al-Nahari ve ark., 2023; Li ve ark., 2023; Nimi ve ark., 2024). Ayrıca, üst katman şifreleme yöntemleri, özellikle IoT düğümleri için ek işlem yükü ve enerji tüketimi oluşturduğundan her zaman uygulanabilir değildir (Zhang ve ark., 2019b; Hema ve Babu, 2024). Bu nedenle, fiziksel katman güvenliği (PLS) yaklaşımı, simbiyotik bir 6G ağının tasarımında büyük önem taşımaktadır. PLS çerçevesinde amaç, meşru alıcıya giden ana kanal ile dinleyiciye giden kulak misafiri kanalının kapasite farkını artırarak gizlilik oranını en üst düzeye çıkarmaktır. Dost karıştırıcı, çoklu röle yapıları, zaman ve güç tahsisi, ardışık girişim giderme ve esnek anten tasarımları gibi teknikler, bu hedefi destekleyen başlıca araçlar arasındadır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, simbiyotik 6G ağları farklı açılardan incelenmiştir. Çalışmaların bir kısmı, sürdürülebilirliğe odaklanarak enerji hasat edilmesi ve zaman tahsisi ile elde edilebilecek toplam bit iletim hızını hesaplarken (Zhang ve ark., 2021; Yeganeh ve ark., 2023; Onay, 2024b), diğerleri ise çoklu röle ve ekran destekli mimarilerde toplam bit hızını analitik bir şekilde modeller (Onay, 2025). Fiziksel katman güvenliğine odaklanan başka bir çalışma, dost karıştırıcı destekli simbiyotik ağlarda gizlilik oranı maksimizasyonunu, spektrum algılama hatasının güvenlik performansını anlamak için derinlemesine analiz etmektedir (Onay, 2024d). Bir diğer çalışmada donanım tarafında 3B baskı mikroşerit anten tasarımlarının, simbiyotik protokollerin gerçek ortamlarda uygulanabilirliğini nasıl etkilediği üzerinde durulmaktadır (Onay ve Dokmetas, 2025).

Bu kitap bölümü, söz konusu farklı eksenleri bir araya getirmek ve kendi kapsamından konuya holistik bir perspektiften baktırmak için kaleme alınmıştır. Öncelikle simbiyotik 6G ağları için ortak sistem mimarileri ve yöntemsel yaklaşımlar konusunda bilgi verilecek, ardından enerji hasadı, çoklu röle ve akran destekli yapılar, fiziksel katman güvenliği modelleri, algılama hataları ve deneysel anten tasarımları açısından bazı literatürde öne çıkan çalışmalar tartışılacak, 6G ile ilgili kullanışlı tasarım önerileri ve açık sorunlar üzerinde durulacaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Ortak sistem mimarisi

Simbiyotik 6G ağı önerileri için kullanılan sistem modellerinin ortak bileşenler etrafında tasarlandığı gözlemlenmiştir. Sistem modelinde genellikle, RF kaynağı, birbirleriyle karşılıklı fayda ilişkisi olan geri saçılım haberleşme yeteneğine sahip simbiyotik cihazlar, bit iletim hızını artırmak için sisteme entegre edilen röle düğümleri ve dinleyiciler olarak adlandırılan yasadışı saldırganlar yer alır. Bazı durumlarda, işbirlikçi parazit yayıcılar da gerçekleştirilen mimariyi etkileyebilir ve bu cihazlar genellikle dost karıştırıcı olarak adlandırılır (Pennanen ve ark., 2025; Alsabah ve ark., 2021).

Ana RF kaynağı bir hücre baz istasyonu, TV/FM vericisi, 5G/6G erişim noktası veya WiFi cihazı olabilir. Simbiyotik cihazlar genellikle enerji hasadı ve düşük güçlü iletim noktaları olan IoT düğümleri şeklinde tasarlanır. Bu cihazlar, bazen sadece kendi verilerini iletirlerken, bazen ağdaki diğer kullanıcılara iletimde destek olmak için “yardımcı” roller oynamaktadırlar. Röle düğümleri, özellikle doğrudan yolun engellendiği veya zayıflatıldığı senaryolarda sinyalin alıcıya güvenilir bir şekilde ulaştırılmasını sağlar. Dost karıştırıcılar, meşru alıcıya minimum, dinleyiciye maksimum zarar vermek

üzere tasarlanmış, güvenli iletişimi destekleyen düğümlerdir (Onay, 2024c). Bu mimarilerde zamanlama boyutunda çerçeve çoğunlukla üç fazlı tanımlanır; ancak bazı çalışmalarda ilk iki faz birleştirilerek iki aşamalı bir zamanlama da tercih edilmektedir. İlk fazda, simbiyotik cihazlar enerjiyi ana kaynaktan alır. İkinci fazda, simbiyotik protokole uygun şekilde veri iletimi yapılır. Üçüncü fazda röleler veya dost karıştırıcılar devreye girer. Bazı çalışmalarda, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) veya PD-NOMA prensipleri birleştirilmiştir (Onay, 2024a). Böylece aynı anda birden fazla kullanıcının hizmet alması sağlanır ve hem zaman hem de güç boyutunda esnek kaynak tahsisine imkân veren zengin bir tasarım alanı ortaya çıkmaktadır.

2.2. Enerji hasadı, zaman tahsisi ve sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik açısından baktığımızda, simbiyotik ağların başarısı aslında enerji hasat etme ile veri iletimi arasındaki doğru dengeyi kurmaya dayanır. Literatürde yapılan çalışmalarda, TV, FM ya da WiFi gibi ortamdaki RF kaynaklarının güç seviyeleri ve kapsama alanları dikkate alınarak, simbiyotik cihazların ne kadar süre enerji toplayacağı ve ne kadar süre veri ileteceği matematiksel olarak modellenmektedir (Li ve ark., 2025; Dong ve ark., 2020; Ahmed ve ark., 2022). Basit ama anlaşılır bir enerji hasat etme modeli kullanıldığında, bir simbiyotik cihazın belirli bir zaman diliminde topladığı enerji

$$E_h = \eta P_{rx} T_h \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada P_{rx} cihazın anteninde görülen ortalama alınan güç, η enerji dönüştürme verimi (0 ile 1 arasında) ve T_h enerji hasadı için ayrılan süredir. Bu basit model, farklı taşıyıcı tipleri ve mesafeler için P_{rx} değerinin kanal kazancı ve iletim gücüne bağlı olarak değiştirilmesiyle, sürdürülebilir 6G simbiyotik ağlarında zaman ve güç tahsisi analizlerinin temelini oluşturmaktadır.

Birden fazla cihazın olduğu sistem modellerinde, her bir cihaz için hem enerji hasat etme süresi hem de minimum bit iletim hızı şartları tanımlanır. Daha sonra, sistem parametrelerine göre oluşturulan optimizasyon problemiyle toplam bit iletim hızını maksimize edecek optimal zaman ve sinyal iletim gücü ayarlamaları yapılır. Bu hedefe ulaşmak için genellikle konveks ya da parçalı konveks yapıda optimizasyon problemleri oluşturulur. Elde edilen problemler, Lagrange çarpanları ile KKT koşullarına dayanan yöntemlerle kapalı form çözümler elde edilerek ya da sayısal algoritmalar geliştirilerek çözülür. Literatürde yürütülen çalışmalar, doğru zaman planlaması ve güç tahsisi yapıldığında simbiyotik radyo ağlarında görev alan kullanıcıların, çok düşük RF sinyal güçlerinde bile kesintisiz çalışabildiğini göstermektedir. Özellikle geniş bir alana yayın yapan TV ve FM vericilerinin yüksek güç sağlaması, kırsal bölgeler veya büyük ölçekli uygulamalar için ciddi bir avantaj da sunmaktadır. WiFi gibi günümüzde hemen hemen her yere konumlandırılmış sinyal kaynakları ise kısa mesafede daha yüksek veri hızına ihtiyaç duyulan senaryolarda öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, 6G'nin heterojen yapısında farklı taşıyıcı türlerinin birlikte kullanılması, hem sürdürülebilirlik hem de esnek kapsama alanı açısından güçlü bir altyapı oluşturma potansiyeline sahip görünmektedir.

2.3. Çoklu röle ve akran destekli mimariler

6G'de milyonlarca cihazın aynı anda iletişimde olması ve işin içine giren karmaşık kanal koşulları, röle yapılarının ve cihazların birbirine destek olduğu sistemlerin önemini iyice artırıyor. Bu yüzden literatürde önerilen çok kümeli yapılarda, her kümeye en az bir simbiyotik cihaz ve bir röle yerleştiriliyor. Doğrudan iletimin mümkün olmadığı ya da sinyalin engellendiği durumlarda da iletişim bu röle üzerinden sürdürülüyor (Wang ve ark., 2022; Samanta ve ark., 2025).

Bu sistemler iki aşamalı olarak da çalışmaktadır. İlk aşamada simbiyotik düğümler hem enerji toplar hem de az da olsa veri iletir. İkinci aşamada ise röleler ve aktif iletim yapan düğümler, PD-NOMA'ya uygun şekilde veriyi alıcıya aktarır. Alıcı tarafta kullanılan SIC tekniği de önce güçlü sinyali çözüp aradan çıkarır, sonra daha zayıf olan sinyali daha temiz bir şekilde işler. Sinyaller üst üste binse bile, alıcı onları sırayla ayırıp okuyabilmektedir. Akran destekli mimarilerde simbiyotik cihazlar, farklı hücrelerdeki cihazların geri saçılım sinyallerinden de enerji hasat ederek sistem performansını geliştirebilmektedir. Hem tek kullanıcı hem de çok kullanıcı içeren senaryolarda, bu tür simbiyotik 6G ağlarında performansın temel göstergesi genelde bit hızı olmaktadır. Sistemin verimi aslında ne kadar veri aktarılabildiğiyle ölçülür. Basit bir eklemeli beyaz gauss gürültüsü (AWGN) kanal varsayımı yapıldığında anlık sinyal-gürültü oranı aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\gamma = \frac{P_t |h|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

Burada P_t iletim gücü, h karmaşık kanal kazancı ve σ^2 gürültü gücünü göstermektedir. Buna karşılık, bant genişliği W olan bir bağlantıda elde edilebilecek teorik bit hızı

$$R = W \log_2 (1 + \gamma) \quad (3)$$

ile verilir. Çoklu erişim, NOMA ve SIC kullanılan simbiyotik yapılarda, her kullanıcı için farklı γ_i değerleri ve etkin bant genişlikleri tanımlanmakta, toplam sistem bit hızı ise $R_{toplam} = \sum_i R_i$ biçiminde hesaplanmaktadır. PD-NOMA senaryosunda güçlü kullanıcı için sinyal-girişim-gürültü oranı $\gamma_{güçlü}$, zayıf kullanıcı için ise artık girişim terimi içeren $\gamma_{zayıf}$ ifadeleri tanımlanmakta ve her bir kullanıcının bit hızı $R_i = W \log_2 (1 + \gamma_i)$ formu üzerinden değerlendirilmektedir. Analizler, ideal ardışık girişim giderici (SIC) varsayımı altında çok kümeli ve

akran destekli simbiyotik yapılarda bit hızında artış olduğunu göstermiştir. Ancak ardışık girişim giderici hataları dikkate alındığında, alıcıdaki sinyal-gürültü oranı (SNR) düşmekte ve toplam bit hızı üzerinde negatif bir etki oluşturmaktadır. Bu bulgu, 6G simbiyotik ağ tasarımlarında performans değerlendirmesi yapılırken ideal yaklaşımların ve algoritmaların ötesine geçilmesi gerektiğini net bir şekilde göstermektedir.

2.4. Fiziksel katman güvenliği ve dost karıştırıcı kullanımı

Simbiyotik 6G ağlarında fiziksel katman güvenliği (PLS) ele alındığında, çalışmaların önemli bir kısmı dost karıştırıcı kullanılan senaryolara yönelmektedir. Buradaki temel fikir aslında oldukça basittir: meşru alıcının kanalını olabildiğince avantajlı hâle getirmek ve dinleyicinin kanalını dezavantajlı duruma itmek. Dost karıştırıcı bunu, ortama parazit bir sinyal yayarak yapar. Böylece dinleyicinin aldığı sinyal bozulur. Ancak aynı parazitin meşru alıcıyı çok fazla etkilememesi, yani “zararın kontrol altında kalması” beklenir. Aksi halde sistem güvenlik kazanımlarından performanstan olabilir. Bu bağlamda fiziksel katman güvenliği değerlendirilirken en sık bakılan ölçüt gizlilik oranıdır. Meşru alıcı kanalının kapasitesini C_b , dinleyici kanalının kapasitesini C_e olarak düşünürsek, gizlilik oranı temel olarak bu iki kapasitenin farkına dayanmaktadır. Meşru tarafın kapasitesi ne kadar yüksek, dinleyicinin kapasitesi ne kadar düşükse, sistem o kadar güvenli sayılır. Gizlilik oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$C_{SR} = [C_b - C_e]^+ \quad (4)$$

Burada $[x]^+ = \max \{x, 0\}$ operatörü negatif değerleri sıfıra eşitleyerek, gizlilik oranının fiziksel olarak anlamlı (sıfırdan küçük olmayan) kalmasını sağlar. SNR temelli bir ifade kullanıldığında ise

$$C_{SR} = [\log_2(1 + \gamma_b) - \log_2(1 + \gamma_e)]^+ \quad (5)$$

biçimindeki gösterim, simbiyotik 6G ağlarında dost karıştırıcı gücü, röle yerleşimi, zaman ve güç tahsisi gibi tasarım parametrelerinin güvenlik performansına etkisini nicel olarak incelemek için temel bir araç hâline gelmektedir. Literatürde bu alana dair oldukça farklı ağ modelleri mevcuttur. Bunların bazılarında sinyal kaynağı, simbiyotik cihazlar, dost karıştırıcı, meşru alıcı ve bir ya da birkaç dinleyici aynı yapıda bir araya gelmektedir. Bazı çalışmalarda ek olarak röle–engel senaryoları da eklenmiş. Doğrudan iletimin mümkün olmadığı durumlarda yalnızca röle üzerinden gerçekleşen iletişimin güvenlik açısından nasıl davrandığı özellikle merak edilmiş ve detaylı şekilde incelenmiştir (Onay, 2024a; Onay, 2025).

Bu çalışmaların ortak paydasında ise gizlilik oranı yer alıyor. Zamanın nasıl paylaştırıldığı, güçlerin nasıl dağıtıldığı ya da yansıma katsayılarının nasıl seçildiği gibi değişkenler, genelde bir optimizasyon probleminin hedefini oluşturmaktadır. Çözüm arayışında da çoğunlukla “ortalama gizlilik oranını en çok artıran” karıştırıcı gücü, çalışma süresi ve simbiyotik cihazlara ait kaynak tahsisi değerleri ortaya konmaya çalışılmaktadır. Bulgulara baktığımızda net bir eğilim göze çarpmaktadır: karıştırıcı gücü makul bir aralığa kadar artırıldığında gizlilik oranı belirgin şekilde iyileşmektedir. Fakat güç fazla yükseldiğinde bu kez meşru alıcının maruz kaldığı parazit etkisi ağır basmakta ve sistemin performansı düşmektedir. Bu yüzden dost karıştırıcı tasarımında yalnızca güvenliği artırmaya odaklanmak çok da yeterli görünmemektedir. Güvenlik ile kapasiteyi birlikte dengeleyen, çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı bu noktada daha mantıklı bir yol sunmaktadır.

2.5. Spektrum algılama hataları

Simbiyotik ağlarda spektrum algılama mekanizmaları, hem verimlilik hem de güvenlik açısından kilit rol taşımaktadır.

Enerji, dalga biçimi temelli, veri odaklı yöntemlerle ortamda birincil sinyalin varlığı ya da yokluğu tespit edilmeye çalışılır. Ancak pratikteki sistemlerde, yanlış alarm ya da eksik yüzde yanlış algılama gibi hatalar kaçınılmazdır. Güncel çalışmalar, sistem modelinin bu algılama hatalarını fiziksel katman güvenliği açısından içerecek biçimde, gizlilik oranı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Yanlış alarm sistemin mevcut spektrum fırsatlarını gereksiz yere reddetmesine sebep olur. Bu durum hem kapasite hem de enerji verimliliğini olumsuz etkiler. Algılama olasılığının düşük olduğu durumlarda ise dinleyiciler avantaj sağlayabilir ve bu durumda gizlilik oranı açısından sistem performansı düşebilir (Srivastava ve Kaur, 2023; Fernando ve Lazaroïu, 2023).

Algılama süresinin uzatılması, karar doğruluğunu artırır; ancak algılama süresinin uzatılması, veri iletim sürelerini kısalttığından doğrudan kapasiteyi düşürür. Bu nedenle, gizlilik oranı, toplam bit hızı ve optimum algılama süresinin dengeli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. 6G simbiyotik ağlarında algılama algoritmaları, yalnızca spektrumun verimli kullanımı için değil, aynı zamanda sürdürülebilir güvenlik seviyesinin sağlanması için de önemli bir bileşendir (Onay, 2024d; Yucek ve Arslan, 2009; Furqan ve ark., 2021).

2.6. Deneysel anten tasarımları ve 3B baskı yaklaşımı

Teorik ve simülasyon tabanlı modeller, simbiyotik haberleşmenin potansiyelini göstermek için kritik bir öneme sahiptir. Ancak bu modellerin gerçek ortamlarda uygulanabilirliğini görmek için donanım düzeyinde deneyler de gereklidir. Son zamanlarda yürütülen bazı çalışmalarda, simbiyotik sistemlere uygun koşullarda çalışan 3B baskı mikroşerit antenler tasarlanmış ve üretilmiştir (Onay ve Dokmetas, 2025; Fang ve ark., 2023; Poyanco ve ark., 2020).

Bu antenler genellikle düşük maliyetlidir ve dielektrik malzemeler kullanılarak 3B yazıcılarla basılmaktadır. Bu tasarımlar ayrıca simbiyotik haberleşme senaryosundaki IoT düğümlerine de entegre edilebilmektedir. Laboratuvar ortamında yapılan ölçümler sonucunda antenlerin kazanç ve ışıma desenlerinin, bilgisayar destekli elektromanyetik simülasyonlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca simbiyotik protokollerde önerilen zamanlama yapıları uygulanarak, belirli mesafe ve güç seviyelerinde elde edilen bit hızlarının, sürdürülebilir IoT uygulamaları için yeterli olduğu gösterilmiştir (Bateni ve ark., 2024; Le ve ark., 2021).

Bu tip deneysel çalışmalar, sürdürülebilir ve esnek donanım çözümlerinin 6G simbiyotik ağlar için kritik olduğunu göstermiştir. Ek olarak 3B baskı anten teknolojilerinin maliyeti düşürürken tasarımı oldukça esnek hâle getirdiği görülmüştür.

2.7. Performans ölçütleri ve analitik yaklaşımlar

Yapılan çalışmalarda benzer ölçütler üzerinden performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Genel olarak toplam bit iletim hızı, ortalama kapasite, enerji verimliliği (bit/Joule) ve gizlilik oranı, en çok kullanılan metriklerdir. Deneysel yürütülen çalışmalarda gerçek bit hızı ve hata oranı değerleri de raporlanmıştır.

Analitik açıdan, bir kanalın olasılıksal özellikleri ele alınarak kapalı form ifadeler türetilmiştir. Sistem modelinin matematiksel olarak modellendiği çalışmalarda optimum zaman ve güç parametrelerini bulmak için, konveks optimizasyon araçları, Lagrange çarpanları, KKT koşulları ve iteratif algoritmalar kullanılır. Monte Carlo simülasyonları ise teorik sonuçların doğrulanması ve karmaşık senaryolarda istatistiksel eğilimlerin ortaya konması için sıklıkla tercih edilmektedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Enerji hasadı ve kaynak seçimi

Simbiyotik radyo ağlarında kullanılan sinyal türü, sürdürülebilirliği büyük ölçüde etkilemektedir. TV ve FM vericilerinin bulunduğu sistemlerde, kullanıcılar uzak mesafelerden bile enerji hasadı yapabilirler. Böylece cihazların pil değişimine ihtiyaç duymadan uzun süre çalışabilirler. Bu durum, geleceğin sürdürülebilir haberleşme teknolojileri açısından önemli bir basamak olarak görülmektedir. WiFi ise daha düşük güçle çalışan ve daha sınırlı alana yayılan yüksek frekanslı bir sinyaldir. Buna rağmen kısa mesafede daha yüksek veri hızı sunabildiği ortaya konmuştur.

Tüm bu bilgiler birlikte ele alındığında, 6G yapısında farklı sinyal kaynağı türlerini birlikte kullanmak; hem geniş kapsama alanı hem de yüksek hız gerektiren uygulamaları desteklemek için iyi bir çözüm oluşturmaktadır. Kullanıcılara doğru zaman ve güç tahsisi yapıldığında da kullanıcıların enerji kullanımı iyileştirilebilir ve daha sürdürülebilir bir iletişim sistemi kurulabilir.

3.2. Röle ve akran destekli modellerde bit hızı iyileştirmeleri

Çoklu röle ve akran destekli simbiyotik mimarileri, özellikle doğrudan yolların engellendiği veya ciddi gölgelenme etkilerinin olduğu senaryolarda önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmalar, bu yapıların kapsama alanını genişlettiğini ve toplam verimliliği önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. İki aşamalı TDMA/PD-NOMA şemalarında genel ağ verimliliği, ilk aşamada simbiyotik düğümlerin enerji toplaması ve simbiyotik iletim gerçekleştirilmesiyle, ikinci aşamada ise rölelerin devreye girmesiyle artırılabilir. Mükemmel SIC varsayımı altında bu kazançlar daha belirgindir, ancak kusurlu SIC durumunda alıcıda kalan parazit, özellikle daha zayıf kullanıcıların veri hızını

sınırlamaktadır. Çoklu röle mimarileri, sadece topolojiye ve ileticilerdeki güç dağılımına odaklanmanın yeterli olmadığını göstermektedir. Alıcı tarafındaki gerçekçi sinyal işleme yetenekleri de dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır.

3.3. Dost karıştırıcı destekli modellerde gizlilik oranı

Fiziksel katman güvenliği açısından dost karıştırıcı içeren simbiyotik modellerin gizlilik performans metrikleri üzerine, literatürde oldukça kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Karıştırıcı gücünün belirli bir aralığa kadar artırılmasının dinleyici kanalını ciddi biçimde zayıflattığı ve gizlilik oranını yükselttiği simülasyon çalışmaları ile gösterilmektedir. Ancak bu güç belli bir eşiğin üzerine çıktığında meşru alıcı üzerinde de ciddi girişim oluşturmaktadır. Bu sebeple sistem modeline uygun tasarlanan optimizasyon probleminde sistem değişkenlerinin en uygun değerlerini bulup performans analizi yapmak çok önemlidir.

Dinamik zaman-güç tahsisi stratejileri kullanıldığında, dost karıştırıcının çalışma süresi ve gücü, simbiyotik kullanıcıların iletim ihtiyaçlarıyla birlikte optimize edilmelidir. Böylece gizlilik oranı ile kanal kapasitesi arasında dengeli çözümler elde edilebilmektedir. Verici ile alıcı arasında doğrudan bağlantının olmadığı röle-engel konfigürasyonlarında, uygun röle yerleşimi ve parazit yayını sayesinde güvenli iletimin sürdürülebilir kılınabildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, 6G’de fiziksel katman güvenliğinin yalnızca ek bir güvenlik katmanı değil, aynı zamanda mimarinin başlangıç tasarım kriterlerinden biri olması gerektiğini açıkça göstermektedir.

3.4. Spektrum sezme hataları ve güvenlik performansı

Spektrum algılama hatalarını açıkça modele katan çalışmalar, algılama süresinin ve olasılığının gizlilik performansı üzerindeki etkilerini net biçimde ortaya koymuştur. Yanlış alarm olasılığının yüksek olduğu durumlarda verici, gerçekte boş olan kanalları meşgul kabul etmektedir. Bu yüzden verici bilgi iletimi

yapmaktan kaçınarak hem sistemin toplam kanal kapasitesini hem de enerji verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Algılama olasılığının düşük olduğu senaryolarda dinleyiciler beklenenden daha avantajlı bir kanal koşuluna sahip olabilmektedir. Böylece sistemin gizlilik oranı ciddi şekilde düşmektedir.

Eğer sistemin spektrum algılama süresi uzarsa, kullanıcıya veri iletimi için tahsis edilecek süre azalır. Literatürde yürütülen çalışmalar, tüm bu olası durumlar arasında optimum bir denge noktası bulunabileceğini ve bu noktanın da uygulamanın güvenlik ve kapasite önceliklerine göre ayarlanması gerektiğini göstermektedir. 6G sistemlerine yönelik geliştirilecek simbiyotik ağ tasarımlarında algılama algoritmalarının, sadece spektrumun verimli kullanımı için değil, aynı zamanda sürdürülebilir güvenlik düzeyinin sağlanması için de kritik bir bileşen olduğu açıktır.

3.5. Anten tasarımlarıyla simbiyotik protokollerin doğrulanması

3B baskı antenler kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar, simbiyotik protokollerin teoriden pratiğe geçişi açısından önemli bulgular sunmaktadır. Tasarlanan mikroşerit antenler, hedeflenen frekans bandında yeterli kazanç ve uygun ışıma desenine sahip olacak şekilde optimize edilmiş; ardından simbiyotik haberleşme senaryolarında test edilmiştir.

Gerçek dünya ortamında gerçekleştirilen ölçümlerde, antenlerin simülasyon sonuçlarıyla uyumlu performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ek olarak simbiyotik protokollere entegre edilen TDMA ve NOMA teknikleri ile elde edilen sonuçların, gerçek donanım üzerinden elde edilen bulgulara yakın olduğu not edilmiştir. Belirli mesafe ve güç seviyelerinde elde edilen bit hızı ve hata oranı değerleri, düşük güçlü IoT uygulamaları için pratik olarak yeterli düzeye ulaşmıştır. Böylece, simbiyotik ağlar için önerilen teorik modellerin, uygun

anten tasarımlarıyla sahaya taşınabileceği somut olarak gösterilmiştir.

3.6. Genel tartışma

Bir bütün olarak, simbiyotik 6G ağlarına ilişkin çalışmalar üç ana alanda yoğunlaşmıştır: sürdürülebilirlik, kapasite ve güvenlik. Enerji hasadı ve zaman-güç tahsisi üzerine analizler, simbiyotik yapıların uzun ömürlü ve ekonomik IoT çözümleri için güçlü adaylar olduğunu kanıtlamaktadır. Çoklu röle ve akran destekli mimariler, 6G'nin karmaşık topolojilerinde bit iletim hızı açısından ölçeklenebilir çözümlerdir. Fiziksel katman güvenliği çalışmaları, dost karıştırıcı, spektrum algılama mekanizmaları ve röle-engel konfigürasyonları ile gizlilik oranlarının geliştirilebileceğini gösterir. Dahası, bu çalışmalar, simbiyotik 6G ağlarının sadece tek bir metrik üzerinden değil, çok boyutlu ölçütler üzerinden performans değerlendirilmesi yapılması gerektiğini gösterir. Bu bağlamda, çok kısıtlı optimizasyon problemleri ve esnek protokol tasarımları gelecekteki çalışmalar için önemli alanlar olarak görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Simbiyotik 6G ağları, sürdürülebilirlik ve fiziksel katman güvenliği eksenlerinde kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Literatürdeki gerek teorik, sayısal gerekse deneysel çalışmalar toplanıp bir araya getirilirken, enerji hasadı tabanlı simbiyotik yapıların 6G vizyonundaki rolü irdelenmiştir.

Mevcut sonuçlar, doğru zamanlama ve güç yönetimi ile simbiyotik cihazların RF kaynaklarının yaydığı sinyallerden enerji hasat etmelerine yönelik yeteneklerinin yüksek olabileceğini, uzun vadeli ve düşük bakım maliyetli ağlar oluşturulabileceğini göstermektedir. Çoklu röle ve akran destekli

mimariler, yoğun ve engelli ortamlarda kapsama ve bit hızı açısından önemli iyileştirmeler sağlamaktadır.

Dost karıştırıcı cihazlar içeren simbiyotik sistemlerde fiziksel katman güvenliği modelleri, spektrum algılama durumları ile birlikte düşünüldüğünde, gerçek hayat için daha uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır. Deneysel anten tasarımları ise tüm bu kavramların gerçek sahaya taşınabilir olduğunu göstermesi bakımından çok önemlidir.

Geleceğe dönük olarak, yapay zekâ destekli kaynak tahsisi algoritmalarının simbiyotik 6G ağlarına uyarlanması, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey (RIS) destekli simbiyotik yapılarda enerji verimliliği ve güvenlik analizlerinin yapılması ve farklı anten türlerinin simbiyotik ağlara entegrasyonu öne çıkan araştırma alanlarıdır. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar, 6G döneminde hem sürdürülebilir hem de güvenli kablosuz altyapıların hayata geçirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Ahmed, M., Khan, W. U., Ihsan, A., Li, X., Li, J. ve Tsiftsis, T. A. (2022). Backscatter sensors communication for 6G low-powered NOMA-enabled IoT networks under imperfect SIC. *IEEE Systems Journal*, 16(4): 5883–5893.
- Al-Nahari, A., Jäntti, R., Zheng, G., Mishra, D. ve Nie, M. (2023). Ergodic secrecy rate analysis and optimal power allocation for symbiotic radio networks. *IEEE Access*, 11: 82327–82337.
- Alsabah, M., Naser, M. A., Mahmood, B. M., Abdulhussain, S. H., Eissa, M. R., Al-Baidhani, A. ve Hashim, F. (2021). 6G wireless communications networks: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 9: 148911–148243.
- Asif, M., Ihsan, A., Khan, W. U., Ranjha, A., Zhang, S. ve Wu, S. X. (2023). Energy-efficient beamforming and resource optimization for AmBSC-assisted cooperative NOMA IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(14): 12434–12448.
- Bateni, N., Meulenens, M. ve Degen, C. (2024). Backscatter modulation for wearable RFID tags: RFID tag optimization for maximum backscatter energy. *IEEE Microwave Magazine*, 25(6): 58–64.
- Chen, X., Xu, D. ve Zhu, H. (2023). Cooperative resource allocation for hybrid NOMA-OMA-based wireless powered MC-IoT systems with hybrid relays. *Electronics*, 13(1): 99.
- Dong, L. (2020). Backscatter communication via harvest-then-transmit relaying. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(6): 6843–6847.
- Fang, Z., Li, Q., Liu, J., Zhou, J. ve Shen, S. (2023). Beamforming design for multi-antenna multi-tag symbiotic radio

- backscatter systems. *AEU–International Journal of Electronics and Communications*, 170: 154820.
- Fernando, X. ve Lăzăroiu, G. (2023). Spectrum sensing, clustering algorithms, and energy-harvesting technology for cognitive-radio-based Internet-of-Things networks. *Sensors*, 23(18): 7792.
- Ferrag, M. A., Friha, O., Kantarcı, B., Tihanyi, N., Cordeiro, L., Debbah, M. ve Choo, K. K. R. (2023). Edge learning for 6G-enabled Internet of Things: A comprehensive survey of vulnerabilities, datasets, and defenses. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(4): 2654–2713.
- Furqan, H. M., Solaja, M. S. J., Türkmen, H. ve Arslan, H. (2021). Wireless communication, sensing, and REM: A security perspective. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2: 287–321.
- Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S. ve Zorzi, M. (2020). Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 58(3): 55–61.
- Hema, P. P. ve Babu, A. V. (2024). Full-duplex jamming for physical layer security improvement in NOMA-enabled overlay cognitive radio networks. *Security and Privacy*, 7(3): e371.
- Jawad, A. T., Maalouf, R. ve Chaari, L. (2023). A comprehensive survey on 6G and beyond: Enabling technologies, opportunities of machine learning and challenges. *Computer Networks*, 237: 110085.
- Le, D., Ahmed, S., Ukkonen, L. ve Björninen, T. (2021). A small all-corners-truncated circularly polarized microstrip patch antenna on textile substrate for wearable passive UHF RFID tags. *IEEE Journal of Radio Frequency*

Identification, 5(2): 106–112.

- Li, F., Sun, Q., Chen, X., Dang, S., Zhang, J. ve Wong, K. K. (2025). Rate-splitting assisted cell-free symbiotic radio: Channel estimation and transmission scheme. *IEEE Transactions on Communications*, 73: 5313–5327.
- Li, X., Jiang, J., Wang, H., Han, C., Chen, G., Du, J. ve Mumtaz, S. (2023). Physical layer security for wireless-powered ambient backscatter cooperative communication networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 9(4): 927–939.
- Long, R., Liang, Y. C., Guo, H., Yang, G. ve Zhang, R. (2019). Symbiotic radio: A new communication paradigm for passive Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(2): 1350–1363.
- Nimi, T. ve Babu, A. V. (2024). On the physical layer security performance of full-duplex cooperative NOMA system with multiple eavesdroppers, imperfect SIC and hardware imperfections. *Internet Technology Letters*, 7(6): e513.
- Onay, M. Y. (2024a). Dynamic time allocation based physical layer security for jammer-aided symbiotic radio network. *Radioengineering*, 33(3): 442–451.
- Onay, M. Y. (2024b). Elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etme tekniğine dayalı iki cihaza sahip çift yönlü simbiyotik ağ için kaynak tahsisi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(6): 1361–1368.
- Onay, M. Y. (2024c). Secrecy rate maximization for symbiotic radio network with relay-obstacle. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 10(3): 381–387.
- Onay, M. Y. (2024d). Secrecy rate performance analysis of jammer-aided symbiotic radio with sensing errors for fifth

- generation wireless networks. *Applied Sciences*, 15(1): 289.
- Onay, M. Y. (2025). Mathematical modelling of throughput in peer-assisted symbiotic 6G with SIC and relays. *Applied Sciences*, 15(17): 9504.
- Onay, M. Y. ve Dokmetas, B. (2025). 3D printed microstrip antenna for symbiotic communication: WiFi backscatter and bit rate evaluation for IoT. *Internet of Things*, 101643.
- Pennanen, H., Hänninen, T., Tervo, O., Tölli, A. ve Latva-Aho, M. (2025). 6G: The intelligent network of everything. *IEEE Access*, 13: 1319–1421.
- Poyanco, J. M., Pizarro, F. ve Rajo-Iglesias, E. (2020). 3D-printing for transformation optics in electromagnetic high-frequency lens applications. *Materials*, 13(12): 2700.
- Samanta, D., De, C. K. ve Chandra, A. (2025). Performance analysis of NOMA based hybrid cognitive radio network assist by full-duplex relay. *Telecommunication Systems*, 88(1): 37.
- Srivastava, A. ve Kaur, G. (2023). Cooperation and energy harvesting based spectrum sensing schemes for green cognitive radio networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 34(3): e4714.
- Wang, W. J., Xu, K., Yan, Y. ve Chen, L. (2022). Relay selection-based cooperative backscatter transmission with energy harvesting: Throughput maximization. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(7): 1533–1537.
- Yang, H., Ding, H., Elkashlan, M., Li, H. ve Xin, K. (2023). A novel symbiotic backscatter-NOMA system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(8): 11006–11011.

- Yeganeh, R. S., Omid, M. J. ve Ghavami, M. (2023). Multi-BD symbiotic radio-aided 6G IoT network: Energy consumption optimization with QoS constraint approach. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 7(4): 2067–2080.
- Yucek, T. ve Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1): 116–130.
- Zhang, Q., Zhang, L., Liang, Y.-C. ve Kam, P.-Y. (2019a). Backscatter-NOMA: A symbiotic system of cellular and Internet-of-Things networks. *IEEE Access*, 7: 20000–20013.
- Zhang, R., Kang, X. ve Liang, Y. C. (2021). Minimum throughput maximization for peer-assisted NOMA-plus-TDMA symbiotic radio networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(9): 1847–1851.
- Zhang, S., Sun, W., Liu, J. ve Nei, K. (2019b). Physical layer security in large-scale probabilistic caching: Analysis and optimization. *IEEE Communications Letters*, 23(9): 1484–1487.
- Zhang, Y., Peng, M., Liu, Y. ve Jiang, T. (2025). Distributed MIMO assisted battery-free backscatter communications for ambient Internet of Things. *IEEE Internet of Things Magazine*, 8(3): 40–46.

FRACTIONAL ORDER LORENZ CHAOTIC SYSTEM-BASED PSEUDO-RANDOM NUMBER GENERATION

Erman ÖZPOLAT¹

1. INTRODUCTION

Today, secure communication, data integrity, and information confidentiality are of critical importance, especially in modern technological infrastructures where digital systems are widespread (Bikos et al., 2023; Sangeetha et al., 2023; Stipčević & Koç, 2014; Sunar, 2009). Random number generation, a fundamental component of cryptographic algorithms, directly affects the reliability of key generation, masking, authentication, and encryption processes (Acosta et al., 2017). For this reason, the design of Pseudo-Random Number Generators (PRNGs) with a high level of randomness is a topic that is intensively researched and continuously developed in the literature. Since traditional PRNG structures are based on deterministic algorithms, weaknesses such as predictability or insufficient randomness may arise when they do not contain sufficient chaos and complexity (Naik & Singh, 2024; Yang et al., 2022).

Chaotic systems, despite their high sensitivity to initial conditions and their deterministic nature, play an important role in many fields where nonlinear dynamics are studied due to their complex and unpredictable behavior (Anishchenko et al., 2014; Chen & Moiola, 1994). These systems can exhibit chaotic and hyperchaotic behavior depending on their dynamic structure

¹ Dr., Muş Alparslan University, Faculty of Engineering and Architecture, Electrical and Electronics Engineering, ORCID: 0000-0002-6489-8126.

(Lassoued & Boubaker, 2016). In addition, chaotic systems are classified as fully-fledged and fractional-fledged according to their derivative degrees rather than their dimensions (Kulczycki et al., 2022). Fully-differentiable systems consist of structures where the derivative order is an integer, while in fractional-order systems, the derivative order is defined as a fraction. The fractional nature of the derivative degree introduces differences in the mathematical structure and dynamic behavior of the system, particularly enabling the observation of more varied and complex behavior patterns in the solution space. Therefore, fractional-order chaotic systems can exhibit dynamic properties distinct from classical fully-ordered systems and constitute a broad field of research in the literature (Martínez-Guerra et al., 2015).

Chaos-based random number generation is a method that utilizes the dynamics of chaotic systems, which, despite having a deterministic structure, are extremely sensitive to initial conditions and exhibit unpredictable behavior (Yu et al., 2019). The non-periodic complex outputs of chaotic systems, their broad spectral distributions, and their high sensitivity to small parameter changes have the potential to reduce predictability and estimability problems that may arise in traditional deterministic PRNG structures (Cornaciu ve Răcuciu, 2025). For this reason, chaos-based structures are considered an important alternative in security-focused applications such as encryption key generation, random bit sequence generation, authentication, communication security, and digital watermarking (Hu, 2023). However, it is not sufficient for the randomness performance of a chaos-based PRNG to be based solely on theoretical foundations; the generated sequences must also be statistically validated. The National Institute of Standards and Technology's (NIST) SP800-22 test suite is one of the most often utilized standards in this validation procedure (Rukhin, Soto, Nechvatal, Smid, Barker, et

al., 2001). These tests, which include various criteria such as monobit tests, run tests, block frequency tests, linear complexity tests, Fourier analysis, and pattern matching, evaluate the pattern structure, statistical distribution, and predictability level of the generated bit sequence and reveal whether the sequence behaves truly randomly. Therefore, the successful performance of chaos-based RNGs in standard test suites such as NIST SP800-22 is considered a fundamental requirement supporting the usability of these systems for randomness generation.

Research on chaos-based PRNG has been increasingly prominent in the literature in recent years. Many academics have studied PRNG architectures based on completely chaotic systems, and many chaotic models have been used to generate random numbers. However, because of their more intricate dynamic nature, research in the literature suggests that fractional chaotic systems might enhance randomness performance.

In the study conducted by Tutueva et al. (2021), a comprehensive investigation was carried out on the use of the least significant digits of numbers obtained from chaotic orbits, one of the commonly used methods for generating pseudo-random sequences in chaos-based cryptography. The study revealed that this approach is highly sensitive to rounding errors and numerical discretization effects, meaning that pseudo-random sequences can be generated even with non-chaotic parameter values. The research emphasized that the source of the pseudo-randomness properties of bits in numerical representation may be the computer simulation itself rather than chaos, and proposed a method for determining the maximum number of bits that can be reliably used as output for chaos-based algorithms. Furthermore, it has been experimentally demonstrated that this approach, based on evaluating the differences between binary representations obtained using different numerical methods, can improve the performance of existing chaos-based generators. It

has been noted that the results obtained could contribute to the re-evaluation and improvement of chaos-based cryptographic algorithms.

Moussa et al. (2024) emphasized in their work that the need for secure communication has become critical with the increase in multimedia data transmission and focused on the role of chaos-based pseudo-random number generators in cryptographic applications. In the study, completely random numbers were generated using two different methods, and the randomness levels of these numbers were evaluated using various statistical tests. The findings revealed that the generated sequences possess high unpredictability and security levels, making them suitable for cryptographic applications.

Xu et al. (2022) suggested a novel fractional-order chaotic system based on a Hopfield Neural Network (HNN) model with four neurons. The Adomian decomposition approach was used to solve the proposed system, and by varying the derivative degrees, it was shown that the system has rich dynamic features. Using pseudo-random numbers produced by this method, a new structure based on a multi-hybrid index chain was subsequently created, and a new picture encryption algorithm was created based on this structure. Security tests conducted revealed that the designed encryption algorithm offers high security performance. Finally, the proposed fractional-order HNN system was implemented using circuit simulation in the Multisim environment, and the experimental results confirmed the applicability of the theoretical analysis.

In a study conducted by Jackson and Perumal (2025), to improve the security of color images sent over unreliable communication channels, a novel image encryption technique based on fractional-order chaotic maps was put forth. The suggested fractional chaotic map has a high Lyapunov exponent

and a noticeable sensitivity to initial conditions. It is intended to alleviate the drawbacks of conventional chaotic maps. The complexity and unpredictability of the map are validated by time series analysis and sample entropy evaluations. A circuit-based method has also been used to create the intended chaotic map, indicating its potential for real-world use. Additionally, the map's strong ability to produce randomness is demonstrated by its successful completion of NIST SP 800-22 tests. The findings demonstrate that a safe and efficient solution in the field of picture cryptography can be obtained by integrating fractional-order chaotic systems with pixel manipulation techniques.

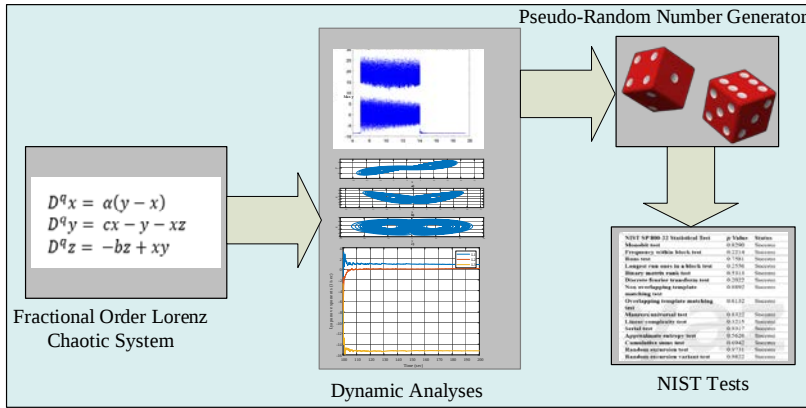
Wang et al. (2024) created a fractional chaotic map and a novel discrete memristor model based on the Caputo difference. Using Lyapunov exponent spectra, bifurcation diagrams, PE complexity, and multi-stability analyses, the dynamic behavior of the suggested map was thoroughly investigated. The study's findings demonstrate that, in comparison to full-order discrete memristor models, the developed map has a larger attractor distribution, fewer numerical periodic windows, and higher dynamic complexity. Additionally, it is claimed that the derivative order serves as an extra bifurcation parameter in the system. Numerous statistical tests, mainly NIST SP800-22, were run on the resulting pseudo-random numbers, and the test results verified that the sequences worked well in terms of randomness. Ultimately, the suggested map's practical application potential was demonstrated by its implementation on an FPGA platform and evaluation in a pseudo-random number generator (PRNG) structure.

A review of the literature reveals that chaos-based PRNG structures have attracted significant attention in recent years in the fields of random number generation and security applications. It has been reported that methods based on chaotic, hyperchaotic, and especially fractional-order chaotic systems are frequently

preferred for randomness generation due to their dynamic behavior diversity and initial sensitivity. These studies show that chaos-based generators provide statistically satisfactory results, pass various security tests successfully, and are usable in cryptographic applications. Furthermore, the literature states that fractional chaotic systems exhibit more complex dynamic properties compared to full-degree systems and produce remarkable results in terms of randomness performance. Overall, relevant research shows that chaos-based approaches are effective in random number generation and that fractional chaotic models have been increasingly studied by researchers in recent years.

The primary motivation for this study stems from the limited research in the literature on pseudo-random number generation based on fractional-order chaotic systems and the need for a more comprehensive examination of the randomness performance of these systems. In this context, the study focuses on the fractional-order Lorenz chaotic system, analyzing its fundamental dynamic properties. Subsequently, pseudo-random numbers were generated using the state variables of the system, and the randomness level of these numbers was evaluated using the NIST SP800-22 test suite. Thus, the suitability of the fractional Lorenz chaotic system for random number generation was demonstrated. The aim of the study is to examine the dynamic behavior of a fractional-order chaotic system and to statistically validate the random numbers it can generate, thereby providing a theoretical basis for evaluating such systems in randomness-focused applications. The general structure of the study and the method followed are presented in Figure 1.

Figure 1. General Structure of The Study



This study's following portions are arranged as follows: The fractional-order Lorenz chaotic system's mathematical model and dynamic analysis are presented in the study's second section. The third part describes the suggested pseudo-random number generator and uses NIST SP800-22 tests to assess the produced numbers. The investigation is concluded with a broad review in the fourth part, which also examines the findings.

2. ANALYSIS OF FRACTIONAL-ORDER CHAOTIC SYSTEMS

2.1. Mathematical Model

The full-order Lorenz chaotic system that serves as the system's foundation is briefly described before the fractional-order Lorenz chaotic system utilized in this investigation is introduced.

2.1.1. Fully-Degree Lorenz Chaotic System

The fully coupled Lorenz system was proposed by Lorenz to model atmospheric convection and is one of the best-known nonlinear dynamic systems exhibiting chaotic behavior (Lorenz,

2017). The differential equations of the fully-rated Lorenz chaotic system are defined in Equation 1.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha(y - x) \\ \dot{y} &= cx - y - xz \\ \dot{z} &= -bz + xy\end{aligned}\tag{1}$$

Here, x, y and z represent the state variables of the system a, b and c represent the system parameters. It is well known in the literature that the fully-fledged Lorenz chaotic system exhibits chaotic behavior for values of $a = 10$, $b = 28$ and $c = 8/3$ (Ghys, 2013; Shen, 2023; Sparrow, 2012). For these parameter values, the Lorenz system exhibits a butterfly effect.

2.1.2. Fractional-Order Lorenz Chaotic System

To further enrich the dynamic structure of the fully-differentiable Lorenz system and to introduce a memory effect into the system, it has been generalized using fractional derivatives. Fractional chaotic systems offer more complex and rich dynamics by taking into account the effect of past states on current behavior (Baleanu et al., 2021; Petráš, 2011; C. Wang et al., 2025).

The differential equations for the fractional-order Lorenz chaotic system are given in Equation 2.

$$\begin{aligned}D^q x &= \alpha(y - x) \\ D^q y &= cx - y - xz \\ D^q z &= -bz + xy\end{aligned}\tag{2}$$

Equation 2 denotes the fractional derivative operator $D^q(\cdot)$, defined in the interval $0 < q < 1$. In this study, the same fractional degree q was used for all state variables, $q_1 = q_2 = q_3 = q$, to simplify the model. Furthermore, the fractional order

$q = 0.993$ was selected, resulting in a total system order of $q_{total} = q_1 + q_2 + q_3 = 2.979$. The literature reports that the fractional Lorenz system exhibits strong chaotic behavior around this total system order (He et al., 2016; Petráš, 2022; Wu & Shen, 2009).

2.2. Dynamic Analysis

At this point in the research, the dynamic behavior of the fractional-order Lorenz chaotic system was thoroughly examined utilizing phase space diagrams, bifurcation diagrams, and Lyapunov exponents. These assessments seek to both qualitatively and quantitatively demonstrate the system's chaotic nature.

A Grünwald–Letnikov-based numerical approach was used to solve the fractional-order Lorenz system during dynamic analysis, yielding the system's state variables that changed over time. The beginning portion of the simulation was not included in the analysis, and only the time series corresponding to the stable chaotic state were assessed in order to avoid transient regimes reliant on initial circumstances influencing the dynamic analysis results.

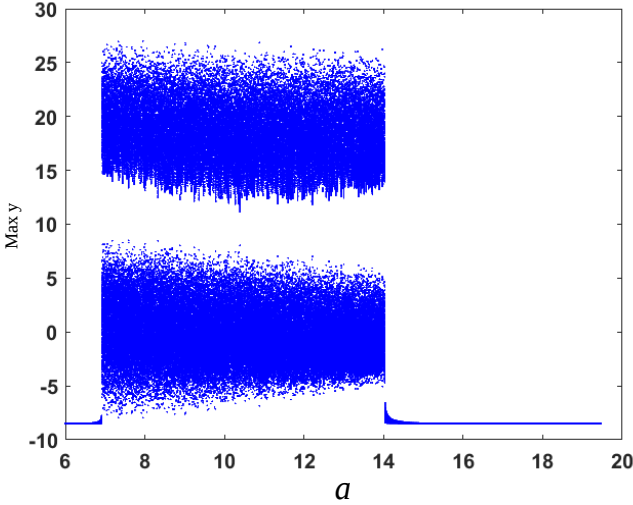
2.2.1. Bifurcation Diagram

To investigate the dynamic behavior of the fractional-order Lorenz chaotic system in response to parameter changes, the parameter a , one of the system's fundamental parameters, was incrementally varied within the range $6 \leq a \leq 20$, with $b = 28$ and $c = 8/3$, and the bifurcation structure of the system was analyzed. For this purpose, the fractional-order Lorenz system was numerically solved for each value of a , and the system's state variables evolving over time were obtained.

The bifurcation analysis was performed on the system's y state variable. In this context, local maximum points were

determined from the time series of the y state variable for each a value, and bifurcation diagrams were obtained using these maximum values. The use of local maxima ensures that periodic, multi-periodic, and chaotic states in the system behavior are clearly distinguished (Song & Wei, 2004). When plotting the bifurcation diagram of the fractional-order Lorenz system, the initial conditions of the system were set as $x(0) = 1$, $y(0) = 1$, $z(0) = 1$. The resulting bifurcation diagram is shown in Figure 2.

Figure 2. Bifurcation Diagram



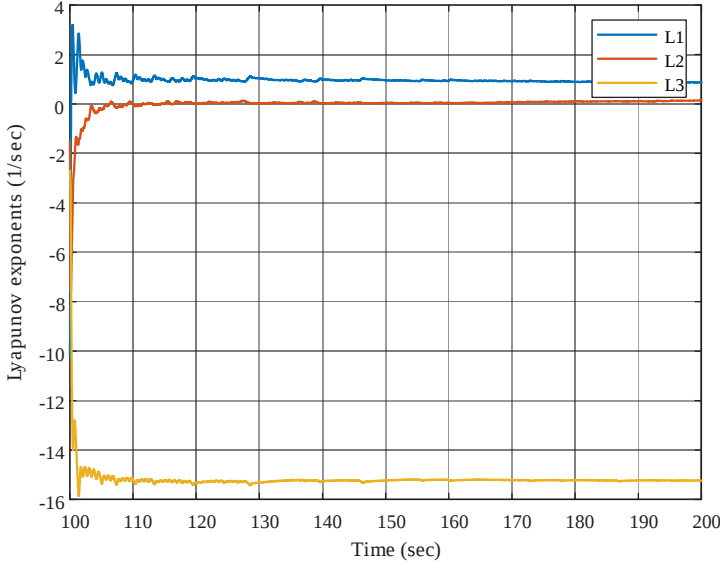
When examining the diagram given in Figure 2, it can be seen that the system behavior is distributed in wide and irregular bands in the range of approximately $6 \leq a \leq 20$, indicating that the system operates in a strongly chaotic manner. During these analyses, the value $a = 10$ was used while keeping the other parameters of the Lorenz system constant. In particular, the dense distribution of the state variable y around both positive and negative values clearly demonstrates the system's high sensitivity and unpredictability. After $a = 14$, a sudden change in system behavior was observed, with the values of the state variable y

clustering within a more limited range and transitioning to a regular structure. This abrupt transition confirms that small changes in the a parameter can lead to significant differences in system dynamics and that the fractional Lorenz system has high parameter sensitivity. Furthermore, the observation of bifurcation points in the chaotic region as continuous and dense bands rather than sharp distinctions demonstrates the decisive role of the memory effect imparted by the fractional structure on the dynamic behavior. In conclusion, the bifurcation diagram obtained reveals that the fractional Lorenz chaotic system can generate strong and rich chaotic dynamics within a specific parameter range and that these properties provide a suitable infrastructure for applications requiring high unpredictability, such as random number generation.

2.2.2. Lyapunov Exponents

Lyapunov exponents were calculated to quantitatively evaluate the chaotic structure of the fractional-order Lorenz chaotic system. Lyapunov exponents measure the rate of divergence between trajectories originating from initial conditions that are very close to each other in a dynamic system. At least one favorable The system's chaotic nature is shown by the Lyapunov exponent (Abarbanel et al., 1991). In this study, the Wolf algorithm, which is widely used in the literature for calculating Lyapunov exponents, has been preferred (Wolf et al., 1985). In the analyses, the parameters $a=10$, $b=28$, $c=8/3$ and fractional degree $q = 0.993$ were used; the initial part of the simulation was excluded from the analysis to eliminate the effect of transient regimes dependent on initial conditions. The change in the Lyapunov exponents resulting from the calculation is shown in Figure 3. During the calculation, the initial conditions were taken as $x(0) = 1$, $y(0) = 1$, $z(0) = 1$.

Figure 3. Variation of Lyapunov Exponents



The calculations resulted in $L_1 = 0.865$, $L_2 = 0.016$ and $L_3 = -15.236$. When examining the calculated Lyapunov exponent values and the Lyapunov spectrum given in Figure 3, it can be seen that the largest Lyapunov exponent takes a positive value, the second Lyapunov exponent remains at a small positive value close to zero, and the third Lyapunov exponent is negative. This situation indicates that the chaotic character of the system is preserved because the system has at least one positive Lyapunov exponent, while the total Lyapunov exponent being negative indicates that the system exhibits an attractive dynamic structure. Furthermore, differences in the Lyapunov spectrum were observed compared to the classical full-order Lorenz system due to the memory effect imparted to the system by the fractional-order structure. In particular, the fact that the second Lyapunov exponent is close to zero indicates that the effective dynamic dimension of the system has increased and that the memory effect influences the separation of orbits. These results confirm that the

fractional Lorenz system exhibits high sensitivity, unpredictability, and strong chaotic dynamics.

2.2.3. Phase Space Diagrams

To visually examine the dynamic behavior of the fractional-order Lorenz chaotic system, phase space diagrams were obtained using the system's x, y and z state variables. In this context, the interactions between state variables are presented in Figure 4; the changes in state variables relative to each other are evaluated in a three-dimensional phase space in Figure 5, and the attractive structure of the system is analyzed. When drawing phase space diagrams, the system parameters were set to $a = 10$, $b = 28$ and $c = 8/3$, and the initial conditions were taken as $x(0) = 1$, $y(0) = 1$, $z(0) = 1$.

Figure 4. Diagrams a) According to x y State Variables b) According to x z State Variables c) According to y z State Variables

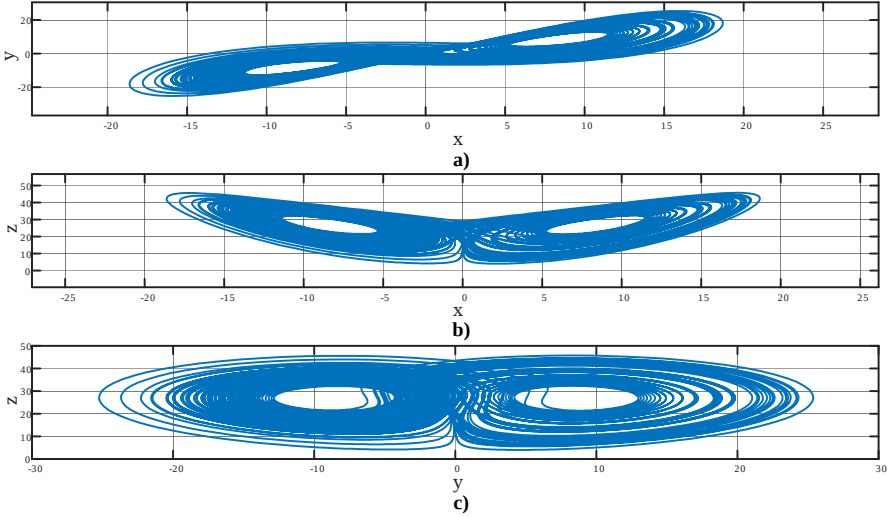
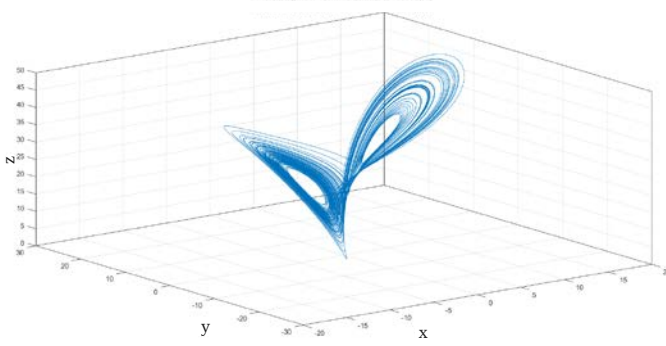


Figure 5. Three-Dimensional Phase Space Diagram



The phase space diagrams obtained in Figures 4 and 5 show that the fractional-order Lorenz system retains the characteristic double-winged (butterfly-shaped) attractor structure observed in the full-order Lorenz system, but due to the memory effect introduced by the fractional derivatives, the attractor geometry has a denser and more complex structure. In particular, it has been observed that the orbits are distributed more tightly and irregularly in phase space.

The fact that the fraction degree is less than the unit value increases the system's dependence on past states, causing phase space orbits to exhibit a richer and more complex dynamic structure. This situation strengthens the system's high sensitivity and unpredictability despite its deterministic nature and causes chaotic behavior to become more pronounced.

In conclusion, phase space diagrams make the fractional-degree Lorenz chaotic system's strong chaotic nature evident, proving that this system provides an appropriate dynamic structure for applications demanding significant disorder and complexity.

3. PSEUDO-RANDOM NUMBER GENERATION

In this work, pseudo-random numbers were generated using a technique based on the fractional Lorenz system. To generate pseudo-random numbers, the fractional Lorenz chaotic system's state variables were employed. The state variables x , y and z obtained as a result of the numerical solution of the system exhibit high irregularity and unpredictability due to the memory effect introduced into the system by fractional derivatives. The system parameters were selected as $a = 10$, $b = 28$ and $c = 8/3$ consistent with the classical Lorenz system, and the fractional order $q_1 = q_2 = q_3 = q = 0.993$ was adopted for all state variables. The initial conditions were set as $x(0) = 1$, $y(0) = 1$ ve $z(0) = 1$ and the system was numerically solved for a total duration of $T_{sim} = 800$ s. To eliminate transient regime effects, the initial portion of the obtained time series ($T \leq 100$) was discarded, and only samples from the $T > 100$ interval corresponding to the chaotic regime were used in pseudo-random number generation. The decimal parts of the state variables x_i , y_i and z_i obtained from the system were truncated to specific digits to produce three-digit integers. These values were combined using the XOR operation, and finally, mod 256 was applied to obtain pseudo-random numbers in the range 0 – 255. The state variables were subjected to a preprocessing step in order to obtain pseudo-random values from the fractional-order Lorenz system. First, to eliminate the sign effect, the system's state x_i , y_i and z_i were converted to absolute values. Next, the decimal part of each variable was separated and scaled by the coefficients 10^4 , 10^5 and 10^6 respectively, to obtain the digits corresponding to the 4th, 5th, and 6th decimal places. The obtained digits were converted into three-digit integer values. The equations for the operations performed are given in Equation 3.

$$\begin{aligned}d_{x,4} &= [|x_i| \cdot 10^4] \bmod 10, d_{x,5} = [|x_i| \cdot 10^5] \bmod 10, d_{x,6} = \\& [|x_i| \cdot 10^6] \bmod 10 \\d_{y,4} &= [|y_i| \cdot 10^4] \bmod 10, d_{y,5} = [|y_i| \cdot 10^5] \bmod 10, d_{y,6} = \\& [|y_i| \cdot 10^6] \bmod 10 \\d_{z,4} &= [|z_i| \cdot 10^4] \bmod 10, d_{z,5} = [|z_i| \cdot 10^5] \bmod 10, d_{z,6} = \quad (3) \\& [|z_i| \cdot 10^6] \bmod 10 \\R_x(i) &= 100 d_{x,4}(i) + 10 d_{x,5}(i) + d_{x,6}(i) \\R_y(i) &= 100 d_{y,4}(i) + 10 d_{y,5}(i) + d_{y,6}(i) \\R_z(i) &= 100 d_{z,4}(i) + 10 d_{z,5}(i) + d_{z,6}(i)\end{aligned}$$

These integers were combined using the XOR operation to obtain a nonlinear combination, and in the final stage, mod 256 was applied to obtain values in the range 0–255. The operation performed is shown in Equation 4.

$$P(i) = \bmod (R_x(i) \oplus R_y(i) \oplus R_z(i), 256) \quad (4)$$

Various statistical analyses were performed to evaluate the level of randomness of the generated pseudo-random numbers (Rukhin, Soto, Nechvatal, Smid, & Barker, 2001). In this case, the NIST SP800-22 test suite was applied to the pseudo-random numbers, and the outcomes are shown in Table 1. At least one million bits of data are required for the NIST SP800-22 tests to be applied validly. Taking this requirement into account, a data set with a total length of 1,120,000 bits was created for the study, and all tests were performed on this data set.

Table 1. NIST Test Results

NIST SP 800-22 Statistical Test	p Value	Status
Monobit test	0.8290	☑
Frequency within block test	0.2214	☑
Runs test	0.7581	☑
Longest run ones in a block test	0.2556	☑
Binary matrix rank test	0.5313	☑
Discrete fourier transform test	0.2022	☑
Non overlapping template matching test	0.8892	☑
Overlapping template matching test	0.6132	☑
Maurers universal test	0.8322	☑
Linear complexity test	0.3215	☑
Serial test	0.9317	☑
Approximate entropy test	0.5626	☑
Cumulative sums test	0.6942	☑
Random excursion test	0.9731	☑
Random excursion variant test	0.9822	☑

When examining the results presented in Table 1, it can be seen that the 1,120,000-bit-long data sequence successfully passed all statistical tests included in the NIST SP800-22 test suite. The p-values obtained in all tests exceeded the acceptance criterion threshold of 0.01, thus confirming that the generated sequence exhibits properties that can be considered statistically random. The successful fulfillment of fundamental randomness criteria, such as the monobit test, run test, Fourier test, and linear complexity test, demonstrates that the sequence possesses a robust randomness structure both at the bit level and in terms of pattern formation. These results demonstrate that the proposed pseudo-random number generation mechanism based on the fractional-order Lorenz system possesses high randomness quality and supports its suitability for use in applications that utilize random numbers.

4. CONCLUSIONS

In this study, the dynamic properties of a fractional-order Lorenz chaotic system were investigated, and a pseudo-random

number generator was designed using the system's state variables. First, the fundamental chaotic behavior of the system was analyzed, and the effects of the fractional order on the system dynamics were evaluated. Subsequently, random bit sequences were generated using the decimal places of the state variables obtained from the system, and the statistical randomness performance of these sequences was verified using the NIST SP800-22 test suite. The results of the tests showed that the generated bit sequences exhibited an acceptable level of randomness according to NIST criteria.

The findings indicate that the fractional-order Lorenz system could be a suitable source for pseudo-random number generation and that such systems could be evaluated in randomness-focused applications. However, a more detailed examination of the effects of fractional degree on randomness performance and dynamic analysis, a comparison of different fractional-degree chaotic systems, and the adaptation of the generator to hardware-based applications are suggested as potential areas of research for future studies.

In conclusion, this study presents a framework that evaluates numbers obtained from a fractional-order chaotic system from both theoretical and statistical perspectives, thereby contributing to chaos-based randomness research.

REFERENCES

- Abarbanel, H. D. I., Brown, R., & Kennel, M. B. (1991). Lyapunov Exponents In Chaotic Systems: Their Importance And Their Evaluation Using Observed Data. *International Journal of Modern Physics B*, 05(09), 1347–1375. <https://doi.org/10.1142/S021797929100064X>
- Acosta, A. J., Addabbo, T., & Tena-Sánchez, E. (2017). Embedded electronic circuits for cryptography, hardware security and true random number generation: An overview. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 45(2), 145–169. <https://doi.org/10.1002/cta.2296>
- Anishchenko, V. S., Vadivasova, T. E., & Strelkova, G. I. (2014). *Deterministic Nonlinear Systems: A Short Course*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06871-8>
- Baleanu, D., Sajjadi, S. S., Jajarmi, A., & Deftferli, Ö. (2021). On a nonlinear dynamical system with both chaotic and nonchaotic behaviors: A new fractional analysis and control. *Advances in Difference Equations*, 2021(1), 234. <https://doi.org/10.1186/s13662-021-03393-x>
- Bikos, A., Nastou, P. E., Petroudis, G., & Stamatiou, Y. C. (2023). Random number generators: Principles and applications. *Cryptography*, 7(4), 54.
- Chen, G., & Moiola, J. L. (1994). An overview of bifurcation, chaos and nonlinear dynamics in control systems. *Journal of the Franklin Institute*, 331(6), 819–858.
- Cornaciu, V., & Răcuciu, C. (2025). Chaos-Based Pseudorandom Number Generators: A Theoretical Overview and Simulation-Based Analysis. *Journal of Military Technology Vol*, 8(1).

- Ghys, É. (2013). The Lorenz Attractor, a Paradigm for Chaos. In B. Duplantier, S. Nonnenmacher, & V. Rivasseau (Eds.), *Chaos* (Vol. 66, pp. 1–54). Springer Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0697-8_1
- He, S., Sun, K., & Banerjee, S. (2016). Dynamical properties and complexity in fractional-order diffusionless Lorenz system. *The European Physical Journal Plus*, 131(8), 254. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16254-8>
- Hu, J. (2023). Design and analysis of a pseudo-random number generator (prng) using 2d chaotic mapping for enhanced randomness. *2023 3rd International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI)*, 732–736.
- Jackson, J., & Perumal, R. (2025). A robust image encryption technique based on an improved fractional order chaotic map. *Nonlinear Dynamics*, 113(7), 7277–7296. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10480-7>
- Kulczycki, P., Korbicz, J., & Kacprzyk, J. (Eds.). (2022). *Fractional Dynamical Systems: Methods, Algorithms and Applications* (Vol. 402). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89972-1>
- Lassoued, A., & Boubaker, O. (2016). On new chaotic and hyperchaotic systems: A literature survey. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 21(6), 770–789.
- Lorenz, E. N. (2017). Deterministic nonperiodic flow 1. In *Universality in Chaos, 2nd edition* (pp. 367–378). Routledge.
- Martínez-Guerra, R., Pérez-Pinacho, C. A., & Gómez-Cortés, G. C. (2015). *Synchronization of Integral and Fractional Order Chaotic Systems: A Differential Algebraic and Differential Geometric Approach With Selected*

Applications in Real-Time. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15284-4>

- Moussa, K. H., Mohy El Den, A. M., Mohamed, I. A. E., & Abdelrassoul, R. A. (2024). Various pseudo random number generators based on memristive chaos map model. *Multimedia Tools and Applications*, 83(21), 59561–59576.
- Naik, R. B., & Singh, U. (2024). A review on applications of chaotic maps in pseudo-random number generators and encryption. *Annals of Data Science*, 11(1), 25–50.
- Petráš, I. (2011). Fractional-Order Chaotic Systems. In I. Petráš, *Fractional-Order Nonlinear Systems* (pp. 103–184). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18101-6_5
- Petráš, I. (2022). The fractional-order Lorenz-type systems: A review. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 25(2), 362–377. <https://doi.org/10.1007/s13540-022-00016-4>
- Rukhin, A., Soto, J., Nechvatal, J., Smid, M., & Barker, E. (2001). *A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications*. <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/ADA393366/>
- Sangeetha, Y., Majji, S., Srinagesh, A., Patnala, T. R., Nalajala, S., & Prathap, B. R. (2023). Authentication of symmetric cryptosystem using anti-aging controller-based true random number generator. *Applied Nanoscience*, 13(2), 1055–1064.
- Shen, B.-W. (2023). A Review of Lorenz’s Models from 1960 to 2008. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 33(10), 2330024. <https://doi.org/10.1142/S0218127423300240>

- Song, Y., & Wei, J. (2004). Bifurcation analysis for Chen's system with delayed feedback and its application to control of chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 22(1), 75–91.
- Sparrow, C. (2012). *The Lorenz equations: Bifurcations, chaos, and strange attractors* (Vol. 41). Springer Science & Business Media.
- Stipčević, M., & Koç, Ç. K. (2014). True Random Number Generators. In Ç. K. Koç (Ed.), *Open Problems in Mathematics and Computational Science* (pp. 275–315). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10683-0_12
- Sunar, B. (2009). True Random Number Generators for Cryptography. In Ç. K. Koç (Ed.), *Cryptographic Engineering* (pp. 55–73). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71817-0_4
- Tutueva, A. V., Karimov, T. I., Moysis, L., Nepomuceno, E. G., Volos, C., & Butusov, D. N. (2021). Improving chaos-based pseudo-random generators in finite-precision arithmetic. *Nonlinear Dynamics*, 104(1), 727–737.
- Wang, C., Li, Y., Yang, G., & Deng, Q. (2025). A Review of Fractional-Order Chaotic Systems of Memristive Neural Networks. *Mathematics* (2227-7390), 13(10).
- Wang, H., Xin, Z., He, S., & Sun, K. (2024). Design of a discrete memristive chaotic map: Fractional-order memory, dynamics and application. *Physica Scripta*, 99(9), 095218. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad6696>
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16(3), 285–317.

- Wu, X.-J., & Shen, S.-L. (2009). Chaos in the fractional-order Lorenz system. *International Journal of Computer Mathematics*, 86(7), 1274–1282. <https://doi.org/10.1080/00207160701864426>
- Xu, S., Wang, X., & Ye, X. (2022). A new fractional-order chaos system of Hopfield neural network and its application in image encryption. *Chaos, Solitons & Fractals*, 157, 111889. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111889>
- Yang, C., Taralova, I., El Assad, S., & Loiseau, J.-J. (2022). Image encryption based on fractional chaotic pseudo-random number generator and DNA encryption method. *Nonlinear Dynamics*, 109(3), 2103–2127.
- Yu, F., Li, L., Tang, Q., Cai, S., Song, Y., & Xu, Q. (2019). A Survey on True Random Number Generators Based on Chaos. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/2545123>

SMART GRID ARCHITECTURE AND DISTRIBUTION AUTOMATION

Serdar KAŞIKCI¹

Ercan KÖSE²

1. INTRODUCTION

Traditional grids encompass areas such as large-scale power plants, transmission networks, distribution networks, markets, and power electronics. The electrical energy produced in large-scale power plants is supplied to consumers through transmission and distribution networks. The energy flow is unidirectional from production to the consumer. Energy is distributed to consumers through distribution companies. Energy consumption is billed to consumers at fixed or tiered rates. In addition, in the traditional grid, power electronics-based devices are used for voltage regulation, reactive power balancing, power flow control, system stability, increasing transmission capacity, and limiting the effects of short-circuit currents. Smart grids, on the other hand, are systems consisting of distributed generation that, in addition to the areas used by traditional grids, include relatively new areas such as the integration of more renewable energy sources, energy storage systems, prosumers, demand-side participation, and self-healing systems. Smart grids also enable the establishment of rules for the interconnection and interaction of traditional and new areas (Control System Society 2013).

¹ Lecturer, Çukurova University, Adana Vocational School, Department of Electrical and Energy, ORCID: 0009-0000-7807-6919.

² Assoc. Prof., Tarsus University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering, ORCID: 0000-0001-9814-6339.

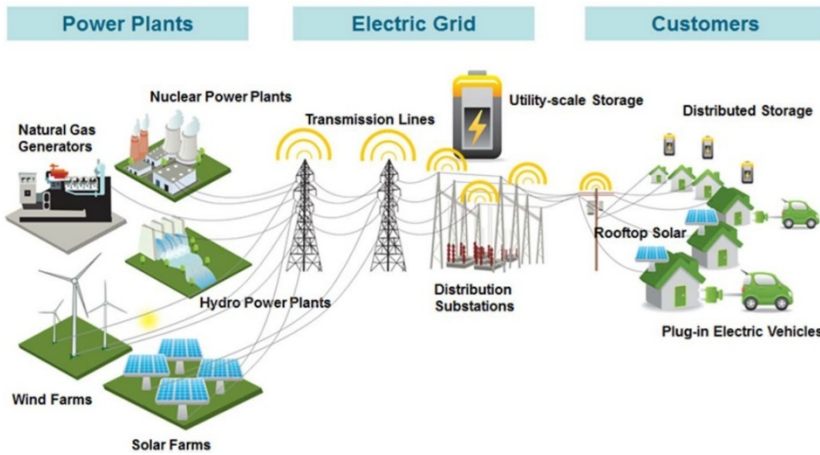


Figure 1.1. The evolving sustainable electricity power system (Das and Madani 2013)

The inclusion of sources with unpredictable production capacity, such as solar and wind, in the grid leads to instability and power quality problems. To overcome these problems, smart grids that manage distributed generation and provide real-time information flow are needed.

Smart grids serve to ensure supply security by quickly resolving faults and minimizing the number of consumers affected by power outages during faults. To achieve this, they use energy storage systems, supercapacitors, and self-healing systems that repair themselves during faults. To summarize the benefits provided by smart grids:

- Integration of renewable energy plants into the grid
- Integration of micro-generation from consumer-producers into the grid
- Increased supply security
- Improved power quality

A smart grid is an integrated energy system that enables two-way energy and information flow throughout all stages of

electricity production, transmission, distribution, and consumption, using advanced measurement systems, communication infrastructures, automation, and control algorithms. Based on this definition, the main features of smart grids can be summarized as follows:

- **Two-way energy and data flow:** Consumers can participate in the system as producers (prosumers) as well.
- **Real-time monitoring and control:** The current status of the grid can be continuously monitored and controlled.
- **Adaptability and flexibility:** The ability to respond quickly to changes in demand and uncertainties in production.
- **Self-healing:** Automatic detection, isolation, and service restoration of faults.
- **Energy efficiency and sustainability:** Reduction of losses and integration of renewable energy.

2. SMART GRID ARCHITECTURE

The Smart Grid Architecture Model (SGAM) is a reference framework that enables the modeling of smart grid components, functions, data flows, and communication standards within a common and consistent architecture. Figure 2.1 shows the SGAM architecture. The vertical axis shows the architectural layers from business objectives to field equipment. All of these layers must be interoperable.

The business layer includes corporate objectives, legislation, regulations, and market rules. In terms of distribution system restoration, it defines why the system was established.

Restoration functions are not only a technical requirement but also a strategic business objective shaped by regulatory requirements and market performance criteria .

The key elements in this layer are as follows:

- Reducing outage duration (SAIDI, SAIFI)
- Improving service continuity
- Compliance with regulations and quality standards
- Reducing operating costs

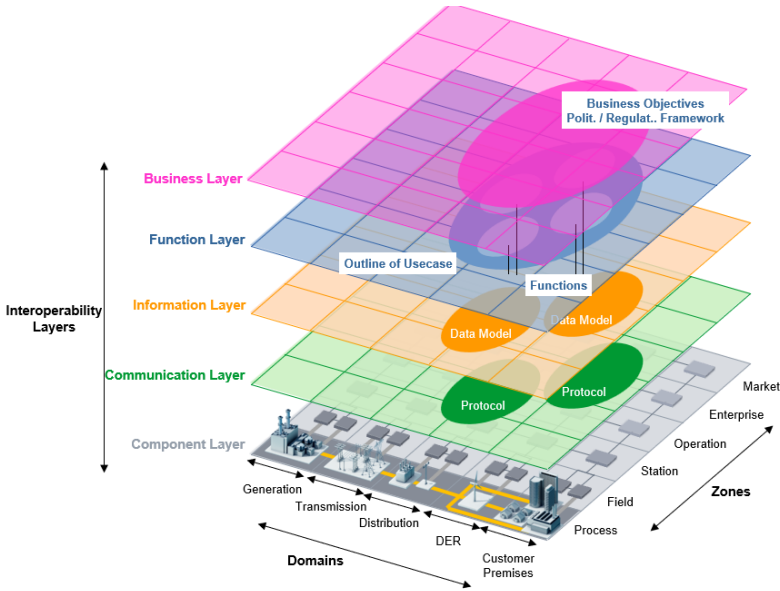


Figure 2.1. Smart grid architecture model (SGAM) (IEC SRD 63200 - SGAM basics - SyC Smart Energy n.d.).

Function layer: determines which algorithms and controls the system will use. For example, it determines which algorithms and control logic will be used for functions such as fault location identification and reporting (FLISR), volt-var control, and load estimation.

It defines the algorithms and functions that operate during the restoration process. In a typical distribution system restoration scenario, the following functions are included in this layer:

- Fault detection and classification
- Fault location
- Isolation of the faulty section
- Determining alternative power supply routes
- Remote switching (tie-switch control)

These functions together form the FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration) structure.

The data layer deals with the data structures that the function layer will use. It determines what data will be transmitted and in what format. It deals with the format of measurement values and topology information. For example, the Common Information Models (CIM) standards of the International Electrotechnical Commission (IEC) enable systems such as supervisory control and data acquisition (SCADA), distribution management systems (DMS), energy management systems (EMS), and advanced metering infrastructure (AMI) from different manufacturers to speak the same language. This facilitates data sharing and integration between systems.

The IEC 61850 standard defines information using logical nodes. This standardizes what each piece of data represents. For example:

XCBR: circuit breaker,

CSWI: switching control,

MMXU: measurements (V, I, P, Q),

PTOC: Overcurrent protection

It defines the data models and information structure used by restoration functions. In this layer:

- Network topology,
- Switching states,
- Measurement data (voltage, current, power),
- Protection relay status information are included.

Defining data in a common and standard format ensures interoperability between systems. For this purpose, data models based on the Common Information Model (CIM) are generally used. The concept of "Data Model" in Figure 2.1 refers to this structural data definition used in the restoration process.

The communication layer is concerned with which protocol the data will be transmitted with and how. For example, IEC 61850 is an international standard that defines object-based data models with Ethernet-based communication systems to be used especially in substations and distribution automation. Thanks to standards, smart electronic devices (IEDs) from different brands can operate in the same system, SCADA/DMS integration is simplified, and long-term system dependency is reduced.

Table 2.1. IEC 61850 Communication Protocols

Protocol	Purpose	Time scale
MMS	Monitoring, configuration, reporting	ms/s
GOOSE	Fast protection and locking	< 4 ms
Sampled Values (SV)	Current-voltage samples	µs

The data layer and communication layer within SGAM form the backbone of the field-station level.

The communication layer determines which protocols are used to transmit the data defined in the information layer and how it is transmitted. This layer is critical for **distribution system restoration**. This is because remote switching operations require

high-reliability communication that provides near real-time status monitoring and rapid feedback to the control center. The main protocols used for this purpose are:

- IEC 61850
- IEC 60870-5-104
- DNP3

The term "Protocol" in Figure 2.1 represents these communication standards.

The component layer deals with physical devices and software. It determines which equipment will be used and what its standards will be. For example, intelligent electronic devices (IEDs), bus controllers, remote terminal units (RTUs), smart meters, and SCADA servers are components related to this layer. It covers the field and central equipment that physically enable the restoration process. The main components in this layer are:

- Protection relays (IED)
- Bay controllers
- Remote terminal units (RTU)
- Automatic load break switches and circuit breakers
- SCADA and DMS servers

These components enable the functions defined in the upper layers to be implemented in the real world.

Figure 2.2 shows the component layer of the SGAM architecture. The domains section includes the physical parts of the energy system, such as generation, transmission, distribution, distributed energy resources (PV, wind, storage), and the consumer side. The zones section includes:

- Process / Field: Switches, circuit breakers, and sensors,
- Station: Distribution center automation,
- Operation: Refers to DMS and SCADA systems.

This structure clearly demonstrates that restoration requires multi-level coordination from the field to the control center.

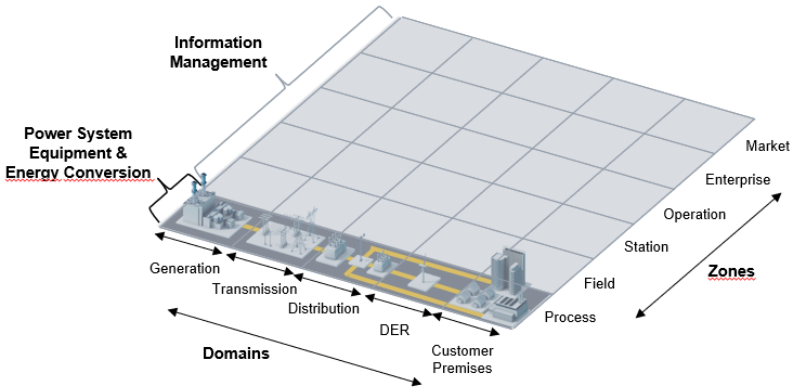


Figure 2.2. SGAM component layer (IEC SRD 63200 - SGAM basics - SyC Smart Energy n.d.).

The SGAM-based approach demonstrates that distribution system restoration is not merely an automatic switching problem; it is a multi-layered system that requires the integrated operation of business objectives, data models, communication infrastructures, and physical equipment. Therefore, SGAM provides a robust reference architecture for modern distribution automation and smart grid applications.

Table 2.2. Distribution automation components according to SGAM layers.

Layer	Definition	Example
Business layer	Business objectives, regulations, market and operational policies	- SAIDI / SAIFI targets - Outage duration limits - Regulatory compliance (quality, continuity) - Operational cost reduction
Function layer	Functions and algorithms performed by the system	- Fault detection - Fault location - Isolation - Service restoration - Volt-Var control
Data layer	Data and information models used by functions	- Network topology - Switch states - Voltage/current measurements - Event and alarm logs - CIM-based data model
Communication layer	Security risks	- IEC 61850 - IEC 60870-5-104 - DNP3 - IP-based fiber / RF / LTE
Component layer	Difficulty in decision-making	- Smart electronic devices - Busbar controller - Remote terminal unit (RTU) - Automatic load disconnectors - SCADA/DMS servers

Table 2.3; The business objectives, functions, data structures, communication protocols, and physical components involved in distribution system restoration applications are systematically classified according to the layers of the SGAM architecture.

Table 2.3. Components according to SGAM dimensions

SGAM dimension	Corresponding to distribution automation
Domain	Distribution (primary focus), distribution energy resources (DER), and customer facilities (supporting)
Process	Physical switching and power flow
Field	Sensors, relays, smart switches
Station	Transformer station and feeder automation
Operation	SCADA, DMS, FLISR algorithms
Enterprise/Market	Performance analysis, reporting, regulation

Figure 4.2, when examined from the perspective of the smart grid architectural model (SGAM), shows that the sections indicated by black arrows represent physical switching and power flow (process), while the sections indicated by red arrows represent various zones. In a smart grid, the status of all hardware infrastructures—from energy production to transmission, distribution (including distributed energy sources), and energy consumption—must be detected (), transmitted via different communication networks, and processed at local or cloud-based control centers to assess the security of the power grid and detect faults (Li et al. 2023).

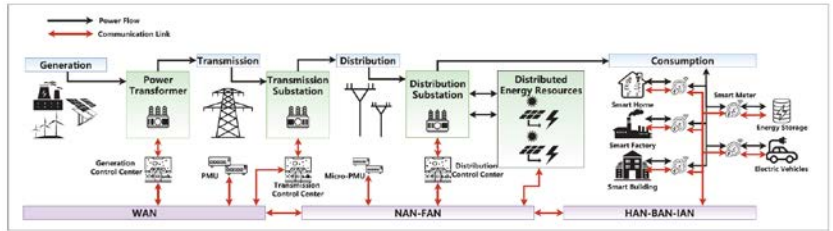


Figure 2.3. Basic components of a smart grid (Li et al. 2023).

3. DISTRIBUTED GENERATION AND ITS IMPACTS

The proliferation of distributed generation (DG) in electrical energy systems has led to significant changes in the operational requirements of distribution networks. The

connection of sources such as renewable power plants (wind, solar, etc.), cogeneration facilities, and energy storage systems to the distribution network has resulted in bidirectional power flow and a more dynamic network structure. For example, short-term regional cloud cover at solar power plants can cause unpredictable changes in energy supply. This situation can lead to unexpected changes in line and transformer loading rates. On the other hand, as discussed in the first section, the need for these intermittent sources makes transformation inevitable. This transformation will require the use of more advanced monitoring and control functions in distribution automation.

Traditional distribution networks are designed for a structure where loads are passive and energy flows in one direction (from substations to consumers). In distributed generation, however, consumers become producers at certain times. This situation creates new challenges in terms of voltage stability, reactive power balancing, power flow direction, and protection coordination. Distribution automation stands out as one of the key tools for overcoming these challenges. Distribution automation can implement mechanisms such as feeder reconfiguration, dynamic load transfer, and generation curtailment to reduce the uncertainties caused by bidirectional power flow. In this context, automation systems must actively monitor and control not only loads but also generation points.

Distributed generation causes power quality problems in distribution networks, such as voltage rises and voltage fluctuations. Especially at low and medium voltage levels, DG injection can rapidly change voltage levels due to relatively high line impedances. This can lead to exceeding the voltage limits set by regulators and cause quality problems on the customer side. Distribution automation uses tools such as voltage regulation, reactive power control, Volt/Var optimization (VVO), and load management to manage these types of problems. Automation

systems attempt to maintain voltage levels within the target range by coordinating the reactive power production of capacitor banks, voltage regulators, and DG inverters based on measurement data. This coordination increases the capacity of the grid while reducing the negative effects of distributed generation.

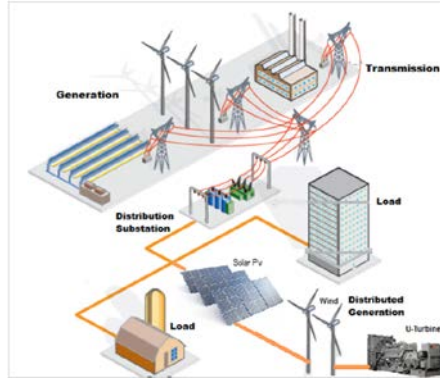


Figure 3.1. A distribution network with distributed generation connection points.

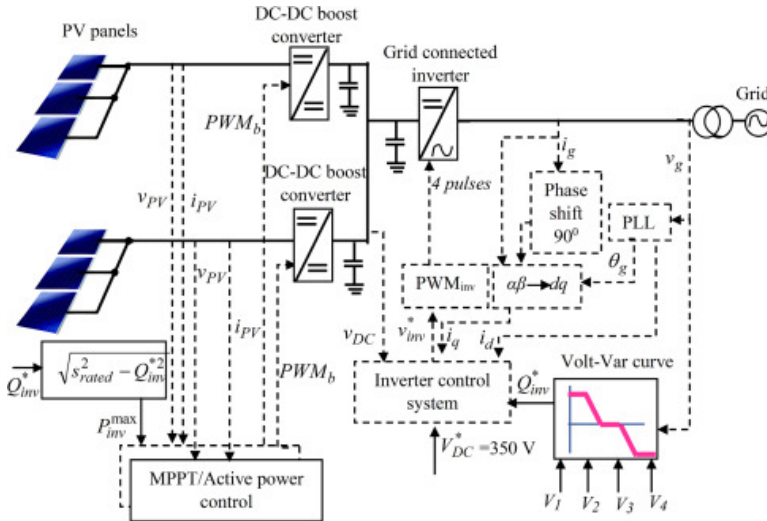


Figure 3.2. The effect of distributed generation on the voltage profile and improvement with Volt–Var control. (Ribeiro et al. 2020)

The proliferation of DG necessitates a re-examination of protection coordination in distribution networks. Classic protection systems are designed based on the assumption that short-circuit currents are supplied only from the network side. DG sources, however, contribute to fault currents, which can cause protection relays to operate incorrectly or with delay. Furthermore, DG sources bring the risk of islanding in distribution networks. If the network is isolated from the main source, continued supply from distributed generation can be dangerous in terms of both equipment and personnel safety. Distribution automation reduces these risks by supporting functions such as islanding detection, ensuring necessary isolation, and controlled resynchronization.

Distribution automation is not limited to fault management and voltage control; it must also encompass more advanced functions such as production forecasting, flexible load management, and microgrid operation. In this context, distribution automation is expected to become more complex in terms of measurement density, time resolution, and decision-making algorithms. Monitoring and controlling DG injection points, in particular, plays a critical role in the design of automation systems. Table 3.1 summarizes the main effects of distributed generation and possible solutions.

Table 3.1. Challenges posed by DG in distribution networks and solution approaches.

Impact	Problem	Automation-Based Solution
Two-way power flow	Line and transformer overload	Feeder reconfiguration, load transfer
Voltage surge	Exceeding voltage limits	Volt–Var / Volt–Watt control
Protection coordination	Incorrect or delayed opening	Adaptive protection, relay setting update
Island operation	Security risks	Island detection, controlled isolation
Operational uncertainty	Difficulty in decision-making	Advanced monitoring and automation algorithms

Distribution automation within the smart grid architecture is considered an important component of the secure, efficient, and seamless integration of DG.

4. THE IMPORTANCE AND CHALLENGES OF DISTRIBUTION NETWORKS WITHIN SMART GRIDS

The smart grid architecture has a layered structure in which all electricity generation, transmission, and distribution components, from production to consumption, work in harmony with measurement, communication, and control infrastructures. As the part closest to the consumer, the distribution network is where the negative effects of other loads connected to the network and distributed generation sources are most evident. Operating the distribution network is more complex due to its numerous nodes, wide geographical spread, and varying load profiles. (Morello et al. 2024)

Although distribution networks can have different topologies such as ring, mesh, or radial (Figure 4.1), we generally encounter radial distribution networks. While the radial structure offers advantages of simplicity and low investment costs, it can lead to large areas being left without power in the event of a failure. Therefore, especially in urban areas, ring and partially mesh networks are preferred to improve operational flexibility and supply continuity. However, this makes the network more complex. Traditional methods make it difficult to manage the system effectively because they provide few measurement points and control options.

As indicated in Table 4.1, the distribution network has fewer measurement points and higher uncertainties, and is directly exposed to the effects of distributed generation sources. This increases the need for automation and advanced monitoring

solutions at the distribution level. The smart grid approach aims to provide solutions to these challenges encountered in distribution systems. Thanks to advanced measurement and monitoring capabilities, the status of the network can be tracked in greater detail and at more frequent intervals. Another distinguishing feature of distribution systems is the direct connection of distributed generation sources to this level. Sources such as solar power plants, wind turbines, battery energy storage systems, and cogeneration facilities can dynamically change the direction and magnitude of power flow. This eliminates the classic "load-focused" distribution operation approach and necessitates more active management of distribution systems.

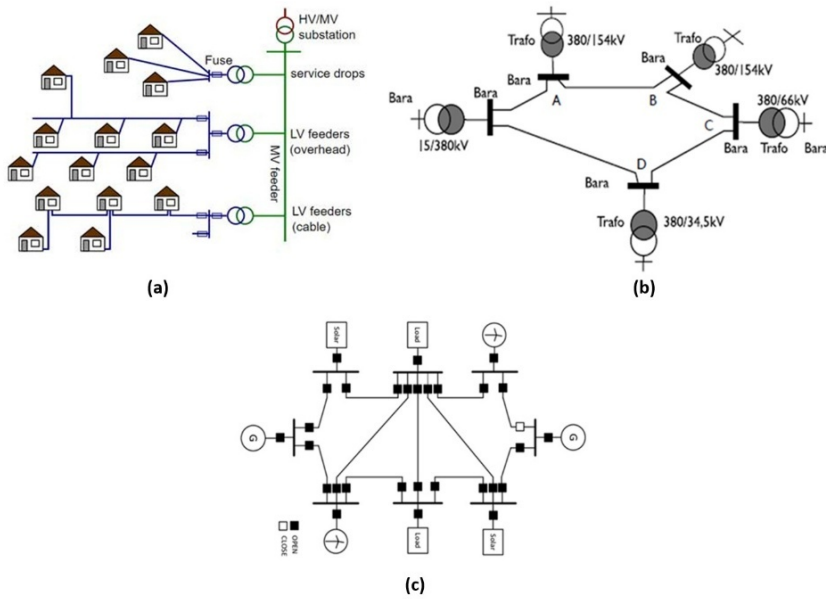


Figure 4.1. Network topologies (a) radial, (b) ring (Electric Power Transmission and Distribution Authors Anadolu University, 2013)
(c) mesh

Table 4.1. Transmission and Distribution Network Characteristics

Feature	Transmission Network	Distribution Network
Voltage level	High/Very high	Medium/Low
Network topology	Typically mesh	Radial / ring / mesh
Measurement	High	Low - medium
Measurement time resolution	High	Low
Load uncertainty	Low	High
DG effect	Limited	High
Business approach	Central	Distributed and local
Automation needs	Medium	High

The primary purpose of distribution automation is to reduce outage times, increase energy continuity, minimize losses, and enable the network to quickly adapt to changing operating conditions. Distribution automation is one of the most important components of smart grids for the following reasons:

- Globally, more than 80% of the average system interruption duration (SAIDI) and interruption frequency (SAIFI) occur at the distribution level. Smart grids require remote control and automatic fast systems instead of field operations. In the event of a fault, fault isolation should be used to minimize the number of users affected by the outage, and self-healing systems with automatic restoration (FLISR) should be employed.
- The integration of distributed energy resources (DER) has led to problems such as reverse power flow, voltage instability, power quality degradation, and uncertainty in fault currents from distributed generation sources. This also complicates distribution automation.
- Flexible loads (such as electric vehicles and heat pumps) are at the end-user level.
- The variety and quantity of electrically powered equipment is increasing day by day. Both commercial

businesses and residential users have increasingly high expectations regarding the quality of energy supply.

The different topologies of distribution networks (ring, mesh, radial), inadequate communication infrastructure, old field equipment that does not support distribution automation control signals, increased cybersecurity requirements, and the lack of advanced sensors make situation forecasting difficult and are problems that must be overcome in the transition to smart grids. To make the distribution system smart, sensors placed at numerous measurement points, infrastructure enabling remote and automatic switching operations, distribution system restoration (DSR) to automate and accelerate fault detection, isolation, and service restoration, reactive power balancing, and voltage and frequency stability must be ensured. Considering the large scale of the distribution system, managing this transformation is quite challenging. As of 2023, distribution companies in Turkey have a total of 231,851 units with a capacity of 100,370 MVA, while third parties and organized industrial zones (OSB) have a total of 336,887 distribution transformers with a capacity of 136,917 MVA, for a total of 568,738 distribution transformers with a capacity of 237,287 MVA (Turkey Electricity Distribution Inc. General Directorate 2024 Turkey Electricity Distribution Sector Report 2025). Making such an extensive distribution system smart is challenging.

The following factors must be considered when designing smart grid distribution automation:

- The number and locations of sensors and remotely controlled switching equipment must be determined within the constraints of budget, automation needs, and communication capabilities.
- The communication system, which is the backbone of distribution automation, must have sufficient speed and

high-capacity bandwidth to meet requirements. Communication must be uninterrupted, and sensor data and commands must be transmitted accurately and completely, meaning the system must be reliable.

- The system must be secure against unauthorized access, malicious attacks, and data breaches. Cybersecurity and customer privacy must be ensured.
- Even if the equipment used belongs to different suppliers, these devices must be able to work together. This is very important in terms of scalability. For this, more standards should be created, and the system should be designed with devices that comply with these standards.
- Many issues must be considered, such as big data processing, data verification, data storage, debugging, time synchronization problems, data privacy, and sharing.
- Control algorithms, i.e., distributed intelligence, are needed so that the distribution system can be operated not only from the center but also locally.

5. ADVANCED METERING INFRASTRUCTURE (AMI)

Advanced Metering Infrastructure (AMI) is a system consisting of smart meters, communication infrastructure, data management systems, and analysis software that supports measurement, remote monitoring, and distribution automation, providing decision-making capabilities. AMI enables distribution automation systems to gain visibility all the way to the network edge, increasing the effectiveness of critical functions such as load forecasting, volt-var optimization, monitoring of distributed energy resources, and power quality management. Particularly in modern smart grids with high DER integration, AMI-based data

analytics enables a new level of distribution automation that overcomes the limitations of traditional SCADA systems. AMI systems are not used for real-time detection and resolution of faults, but rather for verifying the fault location, determining the affected area, and analyzing the network status after the fault. Therefore, although AMI's minute-hour time resolution (for reporting) is insufficient for protection and automatic isolation functions, it plays a complementary role in supporting distribution automation. Although AMI systems are commonly used with hourly measurements, they can provide minute-level data for applications such as distribution automation and DER integration. In summary, the function of AMI is to provide information.

Table 5.1. Systems and time scales used according to distribution automation function

Function	Example System	Time Scale
Fault detection	Relay, circuit breaker	ms - s
Fault isolation	FLISR	s
Energy recovery	DMS	s - minute
Fault analysis and verification	AMI	minute
Long-term improvement	AMI + analytics	hour - day

AMI provides information such as which meters had their simultaneous voltage cut off, which feeder/transformer was affected, whether the fault was permanent or temporary, whether the fault occurred in one phase or three phases, whether there was a voltage collapse, how long it took for power to return, and how many customers were affected by the outage. In summary, it provides information about the period before, during, and after the fault. With this information:

- Estimation of the fault location (Supportive) (Validates FLSIR algorithms)
- Fault type classification

- Post-fault verification becomes possible. (Essential for improving SAIDI and SAIFI)

Traditional SCADA-based distribution systems lack sufficient visibility at the network's endpoints (consumer side). AMI addresses this shortcoming, enhancing the decision-making capacity of distribution automation (McKenna et al. 2022).

Unlike traditional meter reading systems, AMI:

- Near real-time network monitoring
- Detection of distributed generation (PV, battery) effects
- Fault and voltage problem pre-diagnosis
- Volt–Var and Volt–Watt control support
- Enables demand-side participation (DSM/DR), forming the data backbone of distribution automation.

Thanks to AMI's integration with advanced distribution management systems (ADMS/DMS), Volt–Var Optimization (VVO) algorithms can operate more realistically. It allows for the optimization of actual voltage drops at the network end and "safety margins" separated by classical assumptions. AMI data enables the statistical analysis of voltage sags, swells, and continuity violations. This allows problems to be detected before customer complaints arise (McKenna et al. 2022).

AMI is used not for real-time detection and resolution of faults, but for confirming the fault location, determining the affected area, and analyzing the network status after the fault. Therefore, although AMI's minute-to-hour time resolution is insufficient for protection and automatic isolation functions, it plays a complementary role in supporting distribution automation.

6. CONCLUSION

The integration of renewable energy sources into the grid is an inevitable outcome in line with the continuously increasing energy demand and carbon emission reduction targets. The smart grid architecture (SGAM) details all layers of the smart grid transformation. Furthermore, numerous standards are developed and updated annually on smart grid architectures. This will enable a scalable structure for the smart grid transformation.

The integration of more intermittent sources into the grid has serious negative effects on grid stability, in addition to its benefits. These negative effects impact distribution grids at the highest level. Furthermore, in response to regulations aimed at reducing outage durations and frequencies, distribution companies must transform their traditional distribution grids into advanced distribution automation . Thanks to advanced measurement infrastructure, distribution automation devices, and distribution management systems, the distribution network will be able to perform functions such as fault location, FLISR, Volt-Var optimization, loss reduction, and demand-side participation.

This study aims to provide a perspective on distribution automation by addressing the layered structure of the smart grid architecture, the distribution network as the most critical network segment in smart grid transformation, the challenges of the distribution network, and the advanced metering infrastructure (AMI), which is of critical importance in the transition to distribution automation.

REFERENCES

- Control System Society, Ieee. 2013. "IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond." https://ecal.berkeley.edu/files/ce295/readings/Vision_SG_Controls.pdf.
- Das, R., and V. Madani. 2013. "Protection and Control Strategies for Distribution Automation in a Smarter Grid." *Proc. IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol.*
- Electric Power Transmission and Distribution Authors ANADOLU UNIVERSITY. 2013.
- IEC SRD 63200 - SGAM basics - SyC Smart Energy. n.d. Retrieved December 19, 2025. https://syc-se.iec.ch/deliveries/sgam-basics/?utm_source=chatgpt.com.
- Li, Qiyue, Yuxing Deng, Xin Liu, Wei Sun, Weitao Li, Jie Li, and Zhi Liu. 2023. "Autonomous Smart Grid Fault Detection." *IEEE Communications Standards Magazine* 7(2):40–47. doi:10.1109/MCOMSTD.0001.2200019.
- McKenna, Killian, Pete Gotseff, Meredith Chee, and Earle Ifuku. 2022. "Advanced Metering Infrastructure for Distribution Planning and Operation: Closing the Loop on Grid-Edge Visibility." *IEEE Electrification Magazine* 10(4):58–65. doi:10.1109/MELE.2022.3211102.
- Morello, Rosario, Gaetano Fulco, Subhas Mukhopadhyay, Laura Fabbiano, and Claudio De Capua. 2024. "Time Synchronized Power Meters for Advanced Smart Distribution of Energy in Smart Grids." *IEEE Sensors Journal* 24(19):30909–19. doi:10.1109/JSEN.2024.3445494.
- Ribeiro, Luiz Carlos, Francinei Lucas Vieira, Benedito Donizeti Bonatto, Antonio Carlos Zambroni De Souza, and Paulo

Fernando Ribeiro. 2020. “Modeling and Simulation of Active Electrical Distribution Systems Using the OpenDSS.” *Decision Making Applications in Modern Power Systems* 121–52. doi:10.1016/B978-0-12-816445-7.00005-0.

Turkey Electricity Distribution Inc. General Directorate 2024 Turkey Electricity Distribution Sector Report. 2025. <https://www.tedas.gov.tr/tr/1/2024-yili-elektrik-dagitimi-sektor-raporu-published/Details/683d56d5664b9e9d8ac03a3d/63c54066042ee4c94893d956/Announcement/Details>.

KANAL İSTANBUL PROJESİ HAFRİYATININ YAPAY ENERJİ ADALARI YOLUYLA YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİMİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ömer Ali KARAMAN¹

Mustafa SAĞLAM²

Cebrail TÜRKERİ³

1. GİRİŞ

Yapay adaların tarihi, Hollandalıların toprak alanlarını genişletmek için bu tekniği ilk kez kullanmaya başladığı on yedinci yüzyıla kadar uzanmaktadır (Hannon 1987; Purvis, Bates ve Hayes 2008). Yapay adalar, günümüzdeki nüfus artışı ve arazi kıtlığına karşı potansiyel bir çözümdür. Tarih boyunca insanlar, doğal kaynaklar, uygun ulaşım ve ticaret yolları açısından zengin oldukları için genellikle kıyı bölgelerinde kentsel alanlar kurmuşlardır (Neumann vd. 2015).

Son yıllarda, ‘enerji adası’ terimi veya ‘elektrik adası’ veya ‘güç adası’ gibi benzer varyasyonlar akademisyenler, uygulayıcılar ile uluslararası raporlarda, çok çeşitli bağlamlarda ve senaryolarda enerji izolasyonunun farklı anlayışlarını tanımlamak için kullanılmıştır. Terimin bir kullanımı, kendi kendine yeten elektrik üretim ve dağıtım sistemlerine sahip

¹ Doç. Dr, Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ORCID: 0000-0003-1640-861X

² Dr. Öğr. Üyesi, Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-0529-4944.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-8217-4474.

fiziksel olarak izole edilmiş adaları ifade eder. Örnekler arasında Kıbrıs, İzlanda, Hawaii (Lee vd., 2020) ve Reunion Adası (Praene vd., 2012) yer almaktadır. Bu durumlarda, terim, uzak adalarda enerji ihtiyaçlarını karşılamamanın coğrafi ve lojistik zorluklarını vurgular. Bir diğer kullanım ise, fiziksel kısıtlamalardan ziyade siyasi nedenlerle elektrik sistemlerini çevrelerinden kasıtlı olarak izole eden ülkelerle ilgilidir. Bu durumlarda, terim, bu ulusların enerji politikalarında aradıkları kasıtlı bağlantıyı kesme ve bağımsızlığı vurgular. Ayrıca, 'enerji adası' kavramı, toplulukların, şehirlerin, bölgelerin veya siyasi oluşumların mikro şebekeler gibi teknolojileri kullanarak ana elektrik şebekesinden gönüllü olarak ayrıldığı küçük ölçekli ortamlara da uygulanmaktadır (Jansen vd., 2022). Bu enerji adası biçimi, fiziksel veya siyasi izolasyondan ziyade hizmet izolasyonunu vurgulayarak, yerelleştirilmiş enerji sistemlerinin gerektiği gibi bağımsız veya birbirine bağımlı olarak çalışmasına olanak tanır. Son yıllarda, bu terim, genellikle yenilenebilir enerjiye odaklanarak, elektrik üretimi ve dağıtımı için merkez görevi gören, denizde veya uzak bölgelerde yapay adaların inşasını tanımlamak için de kullanılmıştır. Kuzey Denizi'ndeki yenilenebilir enerji adaları gibi projeler, belirli çevresel ve enerji amaçları için insan yapımı adaların oluşturulduğu bu kullanıma örnek teşkil etmektedir (Rettig vd., 2023).

Kuzey Denizi ve Baltık Denizi çevresindeki birçok kıyı devleti, açık deniz rüzgâr enerjisi geliştirme konusundaki kapsamlı hedeflerini açıkladı. Bu muazzam rüzgâr enerjisinden yararlanmak için Belçika, Danimarka ve Hollanda, münhasır ekonomik bölgelerinde 'enerji adaları' inşa etme konusundaki ilgilerini yakın zamanda açıkladılar. Danimarka, Baltık Denizi'ndeki doğal Bornholm adasını kullanmayı ve Kuzey Denizi'nde ek bir ada oluşturmayı planlarken, Hollanda ise yapay bir ada şeklinde olabilecek bir veya daha fazla 'enerji merkezi' planlamaktadır. Belçika yapay adasının başlatıcısı olan şebeke

operatörü 'Elia', izin başvuru sürecini başlatmış bulunmaktadır (Kalis 2024).

Yapay enerji adaları, çevredeki rüzgâr santrallerinden enerji toplayarak, bu enerjiyi yüksek voltajlı doğru akım (HVDC) veya hidrojen ya da başka bir enerji taşıyıcısı şeklinde karaya taşımak için bir merkez görevi görebilir. Dahası, enerji adaları, açık deniz rüzgâr santrallerinin ve ilgili altyapının işletimi ve bakımıyla ilgili çeşitli lojistik ve pratik amaçlar için kullanılabilir. Avrupa Komisyonu, "Açık Deniz Yenilenebilir Enerji Stratejisi"nde, enerji adalarının açık deniz rüzgâr enerjisi ve hidrojen üretiminin geliştirilmesini desteklemek için kullanılabileceğini vurgulamaktadır. Yapay adalar, çeşitli açık deniz rüzgâr santrallerinden üretilen elektriği toplayıp doğrudan çeşitli ülkelere taşıyabilir veya alternatif olarak hidrojene dönüştürüp boru hatları aracılığıyla kıyıya taşıyabilir. Bu, elektrik şebekesinin tıkanmasını önlemeye ve enerji yoğun endüstrilere sürdürülebilir enerji tedariki sağlamaya yardımcı olabilir. Bu nedenle, Kuzey Denizlerinde bu tür adaların geliştirilmesi, büyük ölçekli açık deniz rüzgâr enerjisi geliştirmelerini mümkün kılabilir, açık deniz ve karasal enerji sisteminin entegrasyonunun güçlendirilmesine katkıda bulunabilir. Belçika, Danimarka ve Hollanda'da yakın zamanda benimsenen politika çerçeveleri, açık deniz rüzgâr enerjisinin bir araya getirilebileceği çok fonksiyonlu adaların ve platformların geliştirilmesini teşvik ederek, elektriğin kablo (elektrik) veya boru hattı (gaz) yoluyla kıyıya daha verimli bir şekilde taşınmasını mümkün kılıyor. Bu tür iletim ve dönüştürme altyapısı çok fazla alan gerektireceğinden, yapay bir ada, birlikte büyük bir platform oluşturan modüler tesislerin bir kombinasyonundan daha uygun maliyetli olabilir (Nieuwenhout & Andreasson, 2023).

Enerji adalarının sürdürülebilir enerji güvenliğine sağlayabileceği katkıya rağmen, yapay adaların geliştirilmesinden kaynaklanan çeşitli potansiyel sorunlar

bulunmaktadır; bunlar arasında deniz alanının diğer kullanımlarıyla (özellikle navigasyon ve balıkçılık) çatışmalar, olumsuz çevresel etkiler ve inşaatlarına yönelik çeşitli teknik engeller yer almaktadır. Dahası, yapay enerji adaları gibi yenilikçi açık deniz projeleri, mevcut yasal çerçeve, çıkar çatışmalarını ele almak amacıyla tasarlanmış olsa da bu tür projeler göz önünde bulundurularak geliştirilmediği için yasal zorluklarla karşı karşıyadır. Açık deniz adalarının bazı yönlerine ilişkin literatür mevcut olsa da daha büyük ölçekli enerji adalarının geliştirilmesinin yasal sonuçlarına ilişkin doğrudan bir tartışma azdır (Afzal vd., 2022).

Planlama ve yer seçimi aşamasında, kıyı devletleri denizin kullanımıyla ilgili farklı çıkarları nasıl dengeleyeceklerine karar verme konusunda avantaja sahiptir. Deniz Hukuku Sözleşmesi, yapay adaların, tesislerin ve yapıların (ve güvenlik bölgelerinin) "uluslararası seyrüsefer için gerekli olan tanınmış deniz yollarının kullanımına müdahale edebilecek yerlerde kurulamayacağını" öngörmektedir. Bu özel maddenin yanı sıra, yukarıda belirtildiği gibi, diğer devletlere gereken özeni gösterme genel yükümlülüğü de önemlidir. Planlama ve yer seçimi kapsamında, önerilen bölgede diğer devletlerin çıkarlarının denizcilik mekânsal planlama çerçevesinde dikkate alınması ve önemli balıkçılık alanlarında yapay ada kurulumundan kaçınılması gerekmektedir. (Shaw, 2017).

Kanal İstanbul Projesi, İstanbul Boğazı'na alternatif bir su yolu oluşturmayı hedefleyen, Türkiye'nin en büyük mühendislik girişimlerinden biridir. Proje; deniz taşımacılığını rahatlatma, gemi bekleme sürelerini azaltma ve Türkiye'nin küresel lojistik ağ içindeki konumunu güçlendirme gibi stratejik amaçlar taşımaktadır. Bununla birlikte, bu ölçekte bir altyapı yatırımının kaçınılmaz sonucu olarak çok büyük miktarda kazı (hafriyat) ortaya çıkacaktır.

Geleneksel yaklaşımlarda hafriyat, çoğunlukla çevresel bir sorun olarak ele alınmakta ve depolama alanları üzerinden yönetilmektedir. Ancak günümüzde sürdürülebilir kalkınma anlayışı, bu tür yan ürünlerin ikincil bir kaynak olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle iklim değişikliğiyle mücadele, karbon emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması hedefleri, büyük altyapı projeleri ile enerji projelerinin entegre edilmesini gündeme getirmiştir.

Bu kitap bölümünün temel amacı, Kanal İstanbul Projesi kapsamında ortaya çıkacak hafriyatın, deniz üzerinde inşa edilecek yapay enerji adaları aracılığıyla yenilenebilir enerji üretiminde kullanılabilirliğini kapsamlı biçimde ortaya koymaktır. Bu bağlamda bölüm; mühendislik hesaplamaları, enerji üretim potansiyeli analizleri, çevresel ve ekonomik değerlendirmeler ile birlikte çok disiplinli bir bakış açısı sunmaktadır. Şekil 1’de Kanal İstanbul güzergâhı ile Karadeniz–Marmara bağlantısı ve çevresel etki alanının genel konumu sunulmaktadır.



Şekil 1. Kanal İstanbul güzergâhını, Karadeniz–Marmara bağlantısını ve çevresel etki alanını gösteren genel konum haritası.

2. KANAL İSTANBUL HAFRİYATI VE ÇEVRESEL BOYUT

2.1. Hafriyat Miktarının Hesaplanması

Kanal İstanbul'un yaklaşık 45 km uzunluğa, 250 m ile 1000 m arasında değişen genişliğe ve 25 m derinliğe sahip olacağı belirtilmektedir. Kanal kazısında yaklaşık olarak 1,5 milyar m³ moloz çıkacağı hesaplanmaktadır (Özçelik, 2021 & KIPÇED, 2017).

Bu değer, yalnızca kaba kazı hacmini ifade etmekte olup; şev düzenlemeleri, genişletmeler ve altyapı kazıları dikkate alındığında toplam hafriyat miktarının daha da artabileceği öngörülmektedir (Özçelik, 2021).

2.2. Hafriyat Yönetimi ve Çevresel Riskler

Bu ölçekteki bir hafriyatın düzensiz biçimde depolanması; kıyı ekosistemleri, yeraltı su kaynakları ve tarım alanları üzerinde ciddi baskılar oluşturabilir. Toz emisyonları, sediman taşınımı ve habitat kaybı, en önemli çevresel riskler arasında yer almaktadır.

2.3. Sürdürülebilir Hafriyat Kullanımı Yaklaşımı

Hafriyatın yapay ada, liman genişletmesi ve kıyı tahkimatı gibi projelerde kullanılması hem bertaraf maliyetlerini azaltmakta hem de doğal kaynak tüketimini sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda Kanal İstanbul hafriyatı, yenilenebilir enerji altyapıları için stratejik bir girdi olarak değerlendirilebilir (Aksu, 2024). Hafriyatın kontrollü biçimde deniz dolgusunda kullanımına ilişkin bir mühendislik uygulaması Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Hafriyatın kontrollü biçimde deniz dolgusunda kullanıldığı bir mühendislik uygulaması.

3. YAPAY ENERJİ ADASI KONSEPTİ

3.1. Yapay Enerji Adalarının Tanımı ve Küresel Örnekler

Yapay enerji adaları; deniz ortamında, dolgu veya modüler yapılarla oluşturulan ve başta rüzgâr ile güneş olmak üzere yenilenebilir enerji tesislerini barındıran çok işlevli platformlardır. Kuzey Denizi'nde Hollanda, Danimarka ve Almanya tarafından planlanan enerji adaları, bu konseptin güncel örnekleri arasında yer almaktadır.

Son yıllarda deniz üstü (offshore) yenilenebilir enerji yatırımlarının ölçeğinin büyümesi, enerji üretimi, iletimi ve depolanmasına yönelik yeni altyapı çözümlerini gündeme getirmiştir. Bu bağlamda, yapay yenilenebilir enerji adaları, özellikle Kuzey Denizi başta olmak üzere Avrupa'da öne çıkan yenilikçi bir altyapı yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Enerji adaları, çok sayıda offshore rüzgâr santralinden üretilen

elektriğin toplanması, dönüştürülmesi ve birden fazla ülkeye iletilmesi amacıyla tasarlanan yapay kara alanları veya büyük ölçekli platformlar olarak tanımlanmaktadır (WindEurope, 2022).

Bu alandaki en somut örneklerden biri, Belçika tarafından Kuzey Denizi'nde inşa edilmekte olan Princess Elisabeth Energy Island projesidir. Yaklaşık 6–10 GW kurulu güce sahip offshore rüzgâr santrallerinden elde edilen enerjinin toplanmasını hedefleyen bu yapay ada, yüksek gerilim doğru akım (HVDC) teknolojisi ile Belçika'nın yanı sıra komşu ülkelere de elektrik iletimi sağlayacak şekilde planlanmıştır. Proje, sadece bir enerji iletim merkezi değil, aynı zamanda Avrupa elektrik şebekeleri arasında entegrasyonu güçlendiren stratejik bir enerji düğümü olarak konumlandırılmaktadır (Elia Group, 2023).

Benzer şekilde Danimarka, Kuzey Denizi'nde ve Baltık Denizi'nde planladığı Enerji Adası (Energy Island) projeleri ile yapay ada konseptini daha ileri bir boyuta taşımayı hedeflemiştir. Danimarka Enerji Ajansı tarafından geliştirilen bu konseptte, yapay ada yalnızca elektrik iletimi için değil; yeşil hidrojen üretimi, enerji depolama ve sektörler arası entegrasyon (sector coupling) gibi çok işlevli bir altyapı unsuru olarak ele alınmaktadır (Danish Energy Agency, 2021). Bu yönüyle enerji adaları, klasik offshore rüzgâr santrali bağlantı çözümlerinden ayrılmakta ve çok kaynaklı yenilenebilir enerji merkezleri hâline gelmektedir.

Literatürde yapay enerji adalarının öne çıkan avantajları arasında; deniz tabanında kablo yoğunluğunun azaltılması, iletim kayıplarının düşürülmesi, bakım ve işletme maliyetlerinin uzun vadede azalması ve farklı yenilenebilir enerji teknolojilerinin tek bir merkezde bütünleştirilebilmesi yer almaktadır (ENTSO-E, 2022). Bununla birlikte, bu tür projeler yüksek ilk yatırım maliyetleri, çevresel etkiler ve deniz ekosistemleri üzerindeki

potansiyel baskılar açısından kapsamlı çevresel etki değerlendirmeleri gerektirmektedir. Dolayısıyla yapay yenilenebilir enerji adaları, teknik olduğu kadar çevresel ve yönetim boyutlarıyla da çok disiplinli bir planlama yaklaşımını zorunlu kılmaktadır. Kuzey Denizi'nde planlanan enerji adası konseptine ilişkin temsili bir görsel Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Kuzey Denizi enerji adası konsept proje temsili görseli.

3.2. Kanal İstanbul Bağlamında Yapay Ada Tasarımı

Kanal İstanbul çevresinde oluşturulacak bir yapay enerji adası, hem Marmara Denizi'nin enerji potansiyelinden yararlanma hem de hafriyatın deniz ortamında kontrollü biçimde değerlendirilmesi açısından önemlidir. 1 km² büyüklüğünde ve ortalama 25 m yüksekliğe sahip bir ada için gerekli dolgu hacmi:

$V = 1.000.000 \text{ m}^2 \times 25 \text{ m} = 25.000.000 \text{ m}^3$ olarak hesaplanabilir.

Bu hesaplama, Kanal İstanbul hafriyatının yalnızca küçük bir bölümünün dahi enerji adası için yeterli olabileceğini göstermektedir.

3.3. Yapısal ve Jeoteknik Hususlar

Yapay adaların tasarımında zemin iyileştirme, dalga yükleri, oturma analizleri ve sismik etkiler kritik öneme sahiptir. Hafriyatın granülometrik yapısı ve taşıma kapasitesi, adanın uzun vadeli stabilitesi açısından detaylı mühendislik analizleri gerektirmektedir. Dolgu katmanları ve temel sistemini içeren yapay ada kesiti Şekil 4’te sunulmaktadır.



Şekil 4. Yapay ada kesiti, dolgu katmanları ve temel sistemini gösteren teknik diyagram.

4. YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİM POTANSİYELİ

4.1. Güneş Enerjisi Potansiyeli

Marmara Bölgesi’nde yıllık ortalama güneş ışınımı yaklaşık 1.168 kWh/m² düzeyindedir (GEPA, 2015). Fotovoltaik panellerin %15 verimle çalıştığı varsayıldığında, 1 km²’lik bir alandan elde edilecek yıllık enerji miktarı yaklaşık olarak aşağıda hesaplanmıştır.

$$E = 1.000.000 \times 1.500 \times 0.15 = 175.200.000 \text{ kWh/yıl}$$

Bu miktar, on binlerce hanenin yıllık elektrik ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Büyük ölçekli güneş enerjisi santrali ve panel yerleşim düzenine ilişkin temsili görsel Şekil 5'te sunulmaktadır (Renew Economy, 2025).



Şekil 5. Büyük ölçekli güneş enerjisi santrali ve panel yerleşim düzeni

4.2. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli

Marmara Denizi'nde ölçülen ortalama rüzgâr hızları 5–7 m/s aralığındadır. Bu değerler, orta ve büyük ölçekli rüzgâr türbinleri için yeterli kabul edilmektedir (REPA, 2019). 10 adet 2 MW gücünde türbin için yıllık enerji üretimi yaklaşık olarak aşağıda hesaplanmıştır.

$$E = 10 \times 2 \text{ MW} \times 5.000 \text{ saat} = 100.000 \text{ MWh/yıl}$$

4.3. Hibrit Enerji Üretim Yaklaşımı

Yapay enerji adasında güneş ve rüzgâr sistemlerinin birlikte kullanılması, üretimde süreklilik ve şebeke kararlılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Rüzgâr ve güneş

enerjisini bir arada kullanan offshore hibrit sistem örneği Şekil 6’da sunulmaktadır.



Şekil 6. Offshore rüzgâr türbinleri ve güneş panellerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistem örneği.

5. EKONOMİK-ÇEVRESEL DEĞERLENDİRME

5.1. Ekonomik Katkılar

Yapay enerji adası yaklaşımı, çok yönlü ekonomik faydalar sağlamaktadır. Hafriyatın yeniden kullanılması sayesinde depolama ve taşıma maliyetleri düşmekte, yenilenebilir enerji yatırımlarıyla yeni istihdam alanları oluşmaktadır. Ayrıca yerli ve temiz enerji üretimi, Türkiye’nin enerji ithalatına ödediği maliyetlerin azaltılmasına katkı sunmaktadır.

5.2. Çevresel Kazanımlar

Yenilenebilir enerji üretimi sayesinde karbon salınımları azalmakta, fosil yakıt kullanımına bağlı çevresel etkiler sınırlandırılmaktadır (Öztürk vd.,2021 & Öztürk vd.,2025). Hafriyatın kontrollü kullanımı ise doğal alanların tahribini önlemektedir.

5.3. Sosyal ve Bölgesel Etkiler

Bu tür projeler, bölgesel kalkınmayı desteklemekte ve enerji farkındalığını artırmaktadır. Aynı zamanda üniversite–sanayi iş birlikleri için yeni araştırma alanları oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir çevre arasındaki ilişkiyi vurgulayan kavramsal infografik Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir çevre temasını vurgulayan infografik.

6. TARTIŞMA: BÜYÜK ALTYAPI PROJELERİ VE ENERJİ ENTEGRASYONU

6.1. Altyapı Projelerinde Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı

Döngüsel ekonomi yaklaşımı, atık olarak tanımlanan materyallerin yeniden üretim süreçlerine kazandırılmasını esas almaktadır. Kanal İstanbul hafriyatının yapay enerji adası gibi projelerde kullanılması, bu yaklaşımın somut bir uygulamasıdır. Böylece lineer “kaz-kullan-at” modelinin yerine, kaynak verimliliğini esas alan bir planlama anlayışı benimsenmiş olmaktadır.

6.2. Uluslararası Literatür ve Benzer Projeler

Dünya genelinde, büyük ölçekli liman projeleri ve enerji adaları kapsamında hafriyatın yeniden kullanıldığı örnekler mevcuttur. Özellikle Hollanda ve Danimarka’da deniz dolgusu yoluyla oluşturulan alanlar, rüzgâr ve güneş enerjisi üretimi için kullanılmaktadır. Bu örnekler, Kanal İstanbul için önerilen modelin uluslararası ölçekte karşılığı olduğunu göstermektedir. Almanya’da enerji adası ve deniz dolgusu uygulamalarına ilişkin bir örnek Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Almanya’daki enerji adası ve deniz dolgusu uygulamalarından bir örnek

7. POLİTİKA, PLANLAMA VE HUKUKSAL ÇERÇEVE

7.1. Enerji Politikaları Açısından Değerlendirme

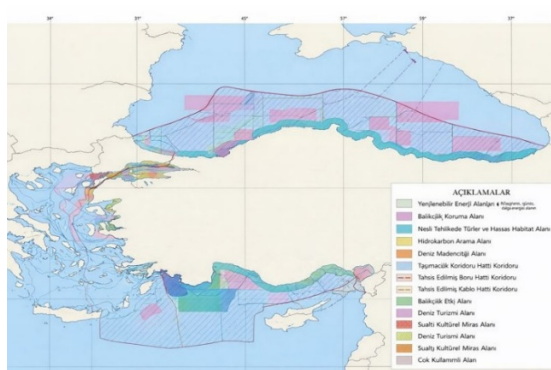
Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedefleri, büyük ölçekli ve yenilikçi projelerin hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Yapay enerji adaları, ulusal enerji stratejileri ile uyumlu olup, uzun vadeli planlama açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

7.2. Mekânsal Planlama ve Kıyı Yönetimi

Yapay adaların planlanması sürecinde, kıyı alanları yönetimi, deniz yetki alanları ve çevresel koruma statüleri dikkate alınmalıdır. Bu durum, enerji üretimi ile çevresel koruma arasında dengeli bir yaklaşım gerektirmektedir.

7.3. Hukuksal ve Kurumsal Boyut

Bu tür projelerin uygulanabilirliği, mevcut mevzuatın yanı sıra kurumsal kapasite ile de yakından ilişkilidir. Hafriyatın yeniden kullanımı ve deniz üstü enerji üretimi konularında açık ve bütüncül bir hukuki çerçeve oluşturulması önerilmektedir. Türkiye’de kıyı alanları yönetimi ve deniz mekânsal planlama yaklaşımını bütüncül olarak ortaya koyan harita Şekil 9’da gösterilmektedir (Türkiye DMP Platformu, 2025).



Şekil 9. Türkiye kıyı alanları yönetimi ve deniz mekânsal planlaması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kanal İstanbul Projesi kapsamında ortaya çıkacak yüksek miktardaki hafriyatın, klasik bertaraf yaklaşımlarının ötesinde değerlendirilmesi; sürdürülebilir altyapı planlaması, enerji politikaları ve çevresel yönetim açısından stratejik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu kitap bölümünde geliştirilen yaklaşım, Kanal İstanbul'u yalnızca ulaştırma ve denizcilik odaklı bir mühendislik yatırımı olarak değil; enerji, çevre ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle bütünleşik bir sistem olarak ele almaktadır. Özellikle proje kapsamında oluşacak hafriyatın, yapay yenilenebilir enerji adaları aracılığıyla yeniden kullanılması önerisi, lineer altyapı planlama anlayışından döngüsel ekonomi temelli bir yaklaşıma geçişin somut bir örneğini sunmaktadır.

Bu bölümde sunulan teknik ve kavramsal analizler, hafriyatın yapay enerji adalarının inşasında kullanılmasının mühendislik açısından uygulanabilir, ekonomik açıdan rasyonel ve çevresel etkiler bakımından ise önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Hafriyatın kontrollü biçimde deniz dolgusunda değerlendirilmesi; düzensiz depolama alanlarının azaltılması, doğal alanlar üzerindeki baskının sınırlandırılması ve ekosistemlerin korunması açısından kayda değer kazanımlar sağlamaktadır.

Yapay enerji adaları üzerinde güneş ve rüzgâr enerjisinin hibrit bir sistem çerçevesinde birlikte değerlendirilmesi, yenilenebilir enerji üretiminde süreklilik ve şebeke esnekliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Marmara Denizi gibi hem rüzgâr ve güneş potansiyeli hem de mevcut enerji altyapısına erişim açısından elverişli bir bölgede konumlanacak yapay enerji adaları, yalnızca yerel ölçekte enerji üretimine katkı sağlamakla kalmayıp, bölgesel enerji arz güvenliğini destekleyebilecek bir kapasiteye sahiptir. Bu yönüyle önerilen model, Avrupa'da

geliştirilen enerji adası uygulamalarıyla teknik ve kavramsal açıdan paralellik göstermekte; Türkiye için yenilikçi, ölçeklenebilir ve entegre bir enerji altyapısı alternatifi sunmaktadır.

Ayrıca, yapay enerji adaları aracılığıyla gerçekleştirilecek yenilenebilir enerji üretimi sayesinde fosil yakıtlara dayalı sistemlerden kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılması mümkün hâle gelmektedir. Bu durum, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadele hedefleri, karbon nötr vizyonu ve uluslararası çevresel yükümlülükleriyle doğrudan uyumlu bir sonuç ortaya koymaktadır. Büyük altyapı projeleri ile enerji yatırımlarının birbirinden bağımsız değil, bütüncül bir planlama anlayışı çerçevesinde ele alınması gerektiği bu çalışma kapsamında açık biçimde görülmektedir.

Bu bağlamda aşağıdaki öneriler geliştirilebilir: Kanal İstanbul özelinde yapay enerji adası konseptinin ayrıntılı teknik ve ekonomik fizibilite çalışmalarına konu edilmesi; hafriyatın fiziksel, jeoteknik ve kimyasal özelliklerinin enerji adası tasarımı açısından detaylı biçimde analiz edilmesi; çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) süreçlerine yenilenebilir enerji entegrasyonunun sistematik olarak dâhil edilmesi; üniversiteler, kamu kurumları ve özel sektör arasında çok disiplinli iş birliklerinin teşvik edilmesi. Sonuç olarak bu çalışma, Kanal İstanbul Projesi bağlamında geliştirilen yapay enerji adası yaklaşımının mühendislik uygulanabilirliğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Aksu & Atabay (2024). *Dewatering Process for Reuse of Seabed Dredging Material and Time and Cost Optimization*. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 9(1), 72–83.
- Afzal, M. S., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Recommendations and strategies to mitigate environmental implications of artificial island developments in the Gulf. *Sustainability*, 14(9), 5027.
- Danish Energy Agency. (2021). *Energy islands – North Sea and Baltic Sea*. Retrieved from <https://ens.dk>
- Elia Group. (2023). *Princess Elisabeth energy island project overview*. Retrieved from <https://www.elia.be>
- ENTSO-E. (2022). *Offshore grid development and hybrid infrastructure concepts*. Retrieved from <https://www.entsoe.eu>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2015). *Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA)*. Ankara: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://gepa.enerji.gov.tr>
- Hannon, P. J. (1987). *Artificial offshore islands* (Paper presented at the Mining Society of Nova Scotia Fall Meeting). Nova Scotia Department of Mines & Energy, Sydney, Canada.
- Jansen, M., Duffy, C., Green, T. C., & Staffell, I. (2022). Island in the sea: The prospects and impacts of an offshore wind power hub in the North Sea. *Advances in Applied Energy*, 6, 100090.
- Kalis, M. (2024). Clean, green, sustainable? Hydrogen and the energy trilemma in the Baltic Sea region. In *The energy trilemma in the Baltic Sea region* (pp. 228–252). Routledge.

- KIPÇED (2017). Kanal İstanbul Projesi Çevresel Etki Değerlendirmesi Başvuru Dosyası, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Alt Yapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Çınar Mühendislik.
- Lee, T., Glick, M. B., & Lee, J. H. (2020). Island energy transition: Assessing Hawaii's multi-level, policy-driven approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109500.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding: A global assessment. *PLOS ONE*, 10(3), e0118571.
- Nieuwenhout, C., & Andreasson, L. M. (2023). The legal framework for artificial energy islands in the Northern Seas. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 39(1), 39–72.
- Özçelik C., ve Benli, K. (2021). Canal İstanbul and Political Dispute on Turkish Straits. *DÜMF MD*, c. 12, sy. 5, ss. 849–863.
- Öztürk, G., & Tansu, M. N. (2021). Türkiye’de hibrid ve elektrikli araçlara eğilimin araştırılması. *Ejoms International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences*, 5(20), 814–823.
- Öztürk, G., Okçu, M., & Fırat, M. (2025). Investigation of emission behavior of ethanol–diesel blends in an RCCI engine at different load conditions. *Ratio*, 20, 25.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2019). Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (REPA). Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://repa.enerji.gov.tr>

- Praene, J. P., David, M., Sinama, F., Morau, D., & Marc, O. (2012). Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island—The case of Reunion Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 426–442.
- Purvis, M. J., Bates, P. D., & Hayes, C. M. (2008). A probabilistic methodology to estimate future coastal flood risk due to sea-level rise. *Coastal Engineering*, 55(12), 1062–1073.
- Renew Economy. (2025). *It's not easy to build a solar farm in Australia any more*. Retrieved from <https://reneweconomy.com.au/its-not-easy-to-build-a-solar-farm-in-australia-any-more-59308/>
- Rettig, E., Fischhendler, I., & Schlecht, F. (2023). The meaning of energy islands: Towards a theoretical framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113732.
- Shaw, M. N. (2017). *International law* (8th ed.). Cambridge University Press.
- Türkiye Deniz Mekansal Planlaması Haritası. (2025). *DMP platformu*. Retrieved from <https://dmpturkiye.dehukam.org/>
- Wang, Y. N., Peng, J. R., Bogireddy, C., Rattan, B., & Tan, M. X. (2024). Artificial islands in modern development: Construction, applications, and environmental challenges. *Marine Georesources & Geotechnology*, 42(12), 1896–1906.
- WindEurope. (2022). *Energy islands: The future of offshore wind power*. Retrieved from <https://windeurope.org>

GÖRÜNTÜ İŞLEMEDE METASEZGİSEL ALGORİTMALAR VE UYGULAMALARI

Selami PARMAKSIZOĞLU¹

1. GÖRÜNTÜ İŞLEMEDE MODERN OPTİMİZASYON PARADİGMASI: BİR GEREKLİLİĞİN ANALİZİ

Bu bölüm, metasezgisel yöntemlerin görüntü işleme alanındaki yükselişini temellendiren kuramsal zemini incelemektedir. Çalışma, söz konusu yöntemlerin salt akademik bir ilgi alanı olmanın ötesine geçerek; modern görsel veri analizinin doğasında var olan ve giderek karmaşıklaşan optimizasyon problemlerine yönelik zorunlu bir metodolojik evrimi temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda metasezgisel algoritmalar, çağdaş görsel verilerin yarattığı hesaplamalı yük ve boyutsal zorluklara karşı geliştirilmiş stratejik ve zorunlu bir yanıt olarak konumlandırılmaktadır.

1.1. Klasik Yöntemlerin Yetersizliği ve İleri Optimizasyon İhtiyacı

Görüntü işleme alanı; doğası gereği çözüm uzayının büyüklüğü ve karmaşıklığı nedeniyle, NP-zor (Non-deterministic Polynomial-time hard) olarak nitelendirilen optimizasyon problemleriyle karakterize edilmektedir (Abualigah vd., 2021). Tıbbi görüntüleme, uzaktan algılama ve otonom sistemler gibi alanlardan elde edilen verilerin hacmi, hızı ve çeşitliliği, "boyutsallık laneti" olarak bilinen olguyu şiddetlendirmekte ve karşılaşılan optimizasyon uzaylarını son derece karmaşık hale

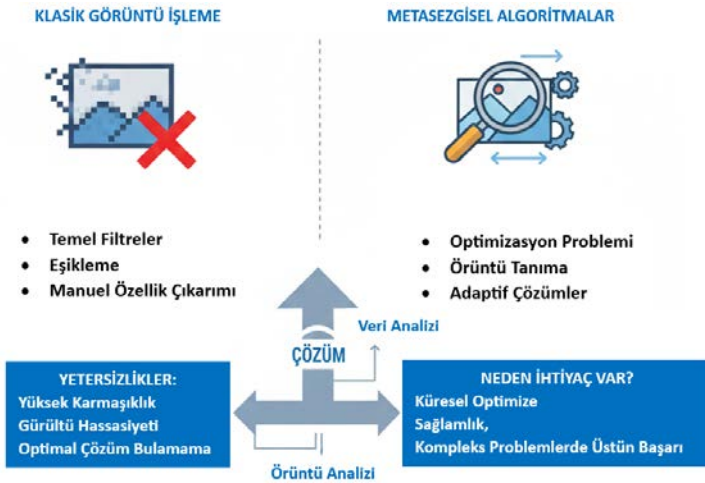
¹ Dr. Öğr. Üyesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Pilotaj Bölümü, Antalya, ORCID: 0009-0001-2763-4156.

getirmektedir (Tian vd., 2023). Bu uzaylar tipik olarak doğrusal olmayan, çok modlu ve genellikle türevlenemeyen özellikler sergilemektedir (Gandomi vd., 2013). Bu durumda, klasik deterministik ve gradyan tabanlı optimizasyon algoritmaları yetersiz kalmaktadır (Desale vd., 2015). Bu yöntemlerin türev bilgisine olan mutlak bağımlılıkları ve çok modlu uzaylarda yerel optimalara takılma eğilimleri uygulanabilirliği kısıtlamaktadır (Gandomi vd., 2013). Bu kısıtlama, problemten bağımsız, esnek ve yerel optimalardan kaçınma yeteneğine sahip daha sağlam optimizasyon paradigmalarına yönelmenin önünü açmıştır (Mohapatra vd., 2023). Bu yönelim, derin öğrenme modellerinin görüntü işlemede standart haline gelmesiyle daha da belirginleşmiştir. Derin Sinir Ağları (DNN'ler) ve Evrişimli Sinir Ağları (CNN'ler) gibi mimariler, özellik çıkarımında devrim yaratmış olsalar da, aynı zamanda optimizasyon problemini daha da karmaşıktırmışlardır (Taghavi, 2024). Bu modeller, genellikle yüksek boyutlu, tekrarlı (redundant) ve yorumlanması güç özellik setleri üretme eğilimindedir (Wu vd., 2025d). Geleneksel yöntemler bu tür yüksek boyutlu verilerle başa çıkmakta zorlanırken, metasezgisel algoritmalar, bu karmaşık uzaylarda etkili bir arama yaparak en uygun özellik alt kümelerini belirleme (özellik seçimi) ve modellerin performansını en üst düzeye çıkaran hiperparametre konfigürasyonlarını bulma (hiperparametre optimizasyonu) gibi görevler için doğal bir uyum sergilemektedir (Kaur vd., 2023). Dolayısıyla, derin öğrenme ve metasezgisel optimizasyon arasında simbiyotik bir ilişki ortaya çıkmıştır: Derin öğrenmenin artan karmaşıklığı, daha sofistike metasezgisel yöntemlere olan talebi artırmakta ve bu alandaki inovasyonu doğrudan teşvik etmektedir. Bu nedensel ilişki, bu bölümün temel argümanını oluşturmaktadır.

1.2. Metasezgisel Paradigma: Stokastik ve Türevsiz Bir Çözüm Yaklaşımı

Klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı bu noktada, metasezgisel algoritmalar güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu algoritmalar, belirli bir probleme özgü olmayan, üst düzey, stokastik arama ve optimizasyon stratejileri sunan çerçeveler olarak tanımlanmaktadır (Glover, 1986). Temel güçleri, probleme özgü varsayımlara veya gradyan bilgisine ihtiyaç duymamalarından kaynaklanmaktadır. Bu "türevsiz" doğa, onları görüntü işleme alanındaki karmaşık, gürültülü ve türevlenemeyen optimizasyon problemleri için doğal olarak uygun kılmaktadır (Moghdani & Salimifard, 2018). Basitlik, esneklik ve problemten bağımsız uygulanabilirlik gibi avantajları, geniş bir yelpazedeki zorluklara adapte edilebilmelerini olanak sağlamaktadır (Rajabioun, 2011).

Metasezgisel algoritmaların sunduğu bu esnek ve türevsiz çözüm yaklaşımı ile klasik tekniklerin deterministik kısıtları arasındaki temel metodolojik farklar Şekil 1’ de şematize edilmiştir.



Şekil 1. Görüntü İşlemede Klasik Tekniklerden Metasezgisel Yaklaşımlara Metodolojik Dönüşüm

Metasezgisel paradigmanın merkezinde, tüm bu algoritmaları birleştiren temel ilke; Keşif (exploration) ve Sömürü (exploitation) arasındaki kritik dengedir (Mirjalili & Lewis, 2016). Çeşitlendirme veya küresel arama olarak da bilinen keşif, arama uzayının geniş alanlarını tarayarak küresel ölçekte umut vadeden bölgeleri bulma yeteneğini ifade etmektedir. Sömürü, diğer adıyla yerel arama veya yoğunlaştırma; mevcut iyi çözümlerin komşuluğuna odaklanarak yerel en iyi çözüme yakınsama sürecini tanımlamaktadır. Bu iki zıt gücün dinamik ve uyumlu bir şekilde yönetilmesi, algoritmanın hem yerel optimalara takılıp kalmasını önlemesini hem de verimli bir şekilde en iyi çözüme yakınsamasını sağlamaktadır (Tzanetos & Blondin, 2023). Bu denge, metasezgisel yöntemlerin başarısının anahtarıdır ve bu bölüm boyunca incelenecek olan algoritmaların temel tasarım felsefesini oluşturacaktır.

Görüntü işleme problemlerinin metasezgisel formülasyonunda, bir görüntü I üzerindeki her bir piksel veya özellik seti, bir boyut olarak tanımlanmaktadır. Optimizasyon süreci, n boyutlu bir uzayda $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ vektörünü optimize etmeyi hedefler. Örneğin, eşikleme problemlerinde x_i değerleri optimal gri seviye değerlerini temsil ederken; özellik seçiminde bu değerler, bir özelliğin seçilip seçilmeyeceğine dair ikili (binary) $\{0, 1\}$ değerlerini ifade etmektedir.

2. ÇAĞDAŞ METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN SINIFLANDIRILMASI

Bu bölüm, metasezgisel yöntemlerin geniş ve sürekli genişleyen evrenini, algoritmaların temel ilham kaynaklarına ve altında yatan matematiksel mekanizmalara göre sınıflandırarak yapılandırılmış bir taksonomik çerçeve sunmaktadır. Literatürde "Bedava Öğle Yemeği Yok" (No Free Lunch - NFL) teoreminin de işaret ettiği üzere, her problemin evrensel tek bir çözümü

yoktur. Bu gerçeklik, araştırmacıları doğadan, fizikten ve sosyal dinamiklerden esinlenen yeni optimizasyon stratejileri geliştirmeye itmiştir. Aşağıda sunulan sınıflandırma, yalnızca köklü geleneksel paradigmaları değil, aynı zamanda son yıllarda literatüre giren yenilikçi ve spesifik problem ailelerine (örneğin yüksek boyutlu özellik seçimi) odaklanan yeni nesil algoritmaları da kapsamaktadır.

2.1. Klasik Paradigmaların Kalıcı Etkisi: Sürü Zekası ve Evrimsel Hesaplama

Modern ve hibrit algoritmaların temelini oluşturan iki ana paradigma, günümüzde de geçerliliğini korumakta ve literatüre yön vermektedir.

- **Sürü Zekası (Swarm Intelligence - SI):** Bu algoritmalar, karınca kolonileri, kuş sürüleri veya balık okulları gibi merkezi olmayan, kendi kendini organize eden sistemlerin kolektif davranışlarından ilham almaktadır (Alorf, 2023). Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) gibi temel algoritmalar, bu kategorinin klasik örnekleridir ve günümüzde genellikle daha gelişmiş veya hibrit formülasyonlarda kullanılmaya devam etmektedir (Fadhil & Younis, 2024).
- **Evrimsel Algoritmalar (Evolutionary Algorithms - EA):** Bu algoritmalar, doğal seçim, mutasyon ve rekombinasyon gibi biyolojik evrim prensiplerini taklit etmektedir (Santamaría vd., 2020). Genetik Algoritmalar (GA) ve Diferansiyel Evrim (DE) gibi yöntemler, özellikle Sinirsel Mimari Arama (Neural Architecture Search - NAS) gibi karmaşık arama ve optimizasyon görevlerinde, sağlamlıkları ve küresel arama yetenekleri nedeniyle hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Han vd., 2024).

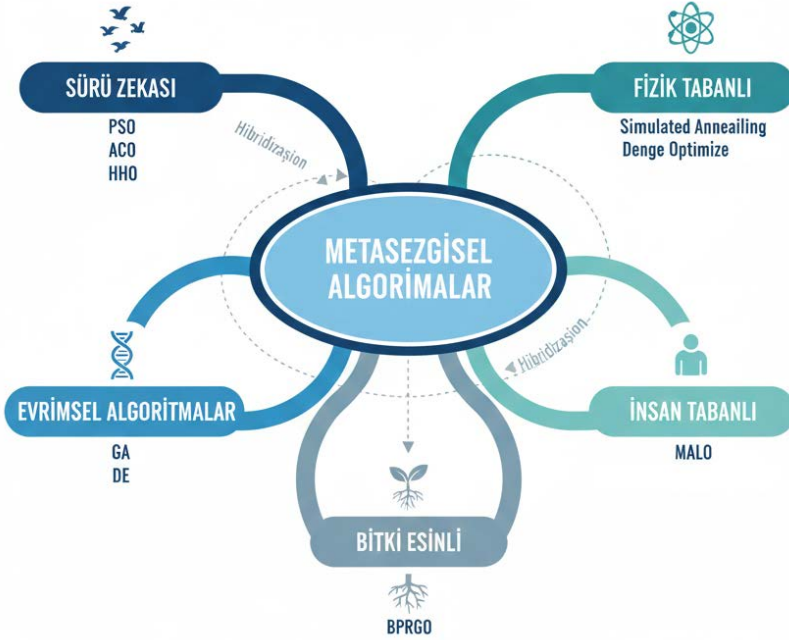
2.2. Yeni Ufuklar: Fizik, İnsan ve Bitki Esinli Paradigmalar

Bu alt bölüm, son yıllarda metasezgisel araştırmalarda gözlemlenen yaratıcı genişlemeyi sergileyen ve giderek daha fazla ilgi çeken yeni algoritma ailelerini incelemektedir.

- **Fizik Tabanlı Algoritmalar:** Bu kategori, tavlama (simulated annealing), yerçekimi veya elektromanyetizma gibi fiziksel yasalardan ve süreçlerden esinlenen algoritmaları içermektedir. Denge Optimize Edici (Equilibrium Optimizer) gibi modern örnekler, bu alandaki yenilikleri temsil etmektedir (Faramarzi vd., 2020).
- **İnsan Tabanlı Algoritmalar:** Bu algoritmalar, insanların sosyal, kültürel veya bilişsel davranışlarını model almaktadır. Politik Optimize Edici (Political Optimizer) veya Dövüş Sanatları Öğrenme Optimizasyonu (MALO) gibi algoritmalar, bu kategorinin ilginç örnekleridir (Li vd., 2024). Örneğin, MALO algoritmasının düşük ışıklı görüntülerin iyileştirilmesindeki başarısı, insan davranış modellerinin görüntü işleme problemlerine uyarlanabilirliğini kanıtlamaktadır. (Wu vd., 2023b).
- **Bitki Esinli Algoritmalar:** Bu, son derece umut verici ancak görece az araştırılmış bir alandır. Bitki esinli algoritmalar, bitkilerin sabit ve kaynakları sınırlı ortamlarda hayatta kalmak için geliştirdiği benzersiz stratejilerden (örneğin, kök büyümesi, fototropizma) ilham almaktadır (Wu vd., 2024a). Bu özellikler, onları özellikle dağıtık optimizasyon ve kaynak tahsisi gibi problemlerde etkili kılmaktadır. İkili Bitki Rizom Büyümesi (BPRGO) algoritması, bu alandaki potansiyelin somut bir kanıtıdır. Yüksek boyutlu özellik seçimi görevlerinde, BPRGO'nun incelenen veri setlerinin %81'inde en yüksek sınıflandırma doğruluğunu elde ederken aynı zamanda en küçük özellik alt kümelerini seçmesi, bu

yaklaşımın verimliliğini ve gücünü ortaya koymaktadır (Wu vd., 2025e).

- Sürü zekasından evrimsel hesaplama, fizik tabanlı modellerden bitki esinli sistemlere kadar uzanan geniş algoritma yelpazesinin sistematik dağılımı Şekil 2 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2. Çağdaş Metasezgisel Algoritmaların İlham Kaynaklarına Göre Taksonomik Sınıflandırması.

Metasezgisel bir algoritmanın dayandığı metafor, sadece isimlendirmeden ibaret olmayıp; algoritmanın arama stratejisini, avantajlarını ve sınırlarını belirleyen bir plandır. Örneğin, sürü zekası algoritmaları olan Gri Kurt Optimize Edici (GWO) ve Harris Şahinleri Optimizasyonu (HHO), işbirlikçi avlanma davranışlarını taklit etmektedirler (Heidari vd., 2019; Mirjalili vd., 2014). Bu davranış, hesaplamalı olarak keşif (gözcülük) ve sömürü (avı kuşatma) arasında doğal bir dengeye dönüşerek

onları etkili genel amaçlı optimize ediciler haline getirmiştir. Buna karşılık, BPRGO gibi bitki esinli bir algoritma, besin arayan bir kök sisteminin merkezi olmayan, kaynak toplama stratejisinden esinlenmektedir (Wu vd.,2024a). Bu strateji, yüksek boyutlu ve statik bir ortamda verimli bir arama mekanizmasına dönüşmekte ve BPRGO'nun özellik seçimi gibi görevlerdeki üstün başarısını açıklamaktadır. Bu nedenle, metaforu anlamak, bir algoritmayı belirli bir görüntü işleme görevine (örneğin, dinamik hedef takibi vs. statik özellik seçimi) uygunluğunu değerlendirmek için kritik bir adımdır.

3. YENİ NESİL METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

Bu bölüm, görüntü işleme ve ilgili alanlarda önemli etki yaratmış olan öncü metasezgisel algoritmaların derinlemesine bir teknik analizini sunmaktadır. Bu analiz, kapsamlı literatür taramalarına ve özellikle son altı yılı kapsayan sistematik incelemelere dayanmaktadır.

3.1. Etkili Algoritmaların Sistematik Bir Değerlendirmesi

2019 ve 2024 yılları arasında 150'den fazla yeni metasezgisel algoritmanın önerildiği geniş bir literatür havuzundan, 23 öncü algoritmayı belirleyen kapsamlı bir anketin bulguları ışığında, literatürde öne çıkan algoritmalar analiz edilmiştir. Bu algoritmaların seçimi; atıf sayıları, ele aldıkları problem türlerinin çeşitliliği, kaynak kodlarının erişilebilirliği ve durgunluk gibi geleneksel metasezgisel sorunlara getirdikleri yenilikçi mekanizmalar gibi nesnel kriterlere dayanmaktadır (Dokeroglu vd., 2024). Bu listeden öne çıkan bazı anahtar algoritmaların teknik bir incelemesi aşağıda sunulmuştur:

- Harris Şahinleri Optimizasyonu (HHO): Harris şahinlerinin işbirlikçi avlanma stratejilerinden esinlenen bu algoritma, avın kaçış enerjisini modelleyerek keşif ve sömürü fazları arasında kurduğu dinamik geçiş mekanizması ile öne çıkmaktadır. Algoritmanın keşif, geçiş ve farklı sömürü (yumuşak/sert kuşatma) aşamaları, bu adaptif mekanizmanın temelini oluşturmaktadır (Heidari vd., 2019).
- Deniz Yırtıcıları Algoritması (MPA): Deniz yırtıcılarının hem Lévy uçuşu hem de Brown hareketi gibi optimal yiyecek arama stratejilerini modelleyen bu algoritma, özellikle görüntü eşikleme gibi problemlerde üstün performans göstermiştir (Kurban vd., 2021).
- Cıvık Mantar Algoritması (SMA): Cıvık mantarın yiyecek arama davranışını taklit eden bu algoritma, pozitif ve negatif geri bildirimler arasında denge kurmak için benzersiz bir adaptif ağırlıklandırma mekanizması kullanarak arama sürecini yönlendirmektedir (SMA, 2020).
- Gradyan Tabanlı Optimize Edici (GBO): Bu algoritma, gradyan tabanlı yöntemlerin yönlendirme yeteneğini popülasyon tabanlı bir çerçevenin küresel arama gücüyle birleştiren hibrit bir yaklaşımdır (Ahmadianfar vd., 2020).
- Kelebek Optimizasyon Algoritması (BOA): Kelebeklerin kokuya dayalı yiyecek arama davranışını modelleyen bu algoritma, arama uzayında gezinmek için hem küresel hem de yerel arama mekanizmalarını birleştirmektedir (Arora & Singh, 2019).

Görüntü işlemedeki yüksek boyutlu optimizasyon sorunlarına çözüm sunan güncel algoritma setleri ve bu algoritmaların karakteristik özellikleri Şekil 3' de özetlenmektedir.



Şekil 3. Yeni Nesil Metasezgisel Algoritmaların Hibrit Yapıları ve Gelişmiş Operasyonel Stratejileri

3.2. Hibridizasyon ve Yenilikçi Esin Kaynaklarına Odaklanma

Bu alt bölüm, alandaki “mevcut algoritmaların birleştirilmesi (hibridizasyon)” ve “tamamen yeni ilham kaynaklarının keşfi” olarak tanımlanan iki ana eğilimi örnekleyen algoritmalara odaklanmaktadır.

- Balina-Gri Kurt Optimizasyonu (WGWÖ) - Hibridizasyon Örneği: Bu algoritma, Balina Optimizasyon Algoritması'nın (WOA) (Mirjalili & Lewis, 2016) küresel spiral arama yeteneğini, Gri Kurt Optimize Edici'nin (GWO) (Mirjalili vd., 2014) yerel avlanma stratejisiyle birleştirerek, özellikle gerçek zamanlı İHA hedef takibi gibi dinamik problemlerde üstün bir performans sergilemektedir (Wolpert & Macready, 1997).

- **Yapay Art Görüntü Algoritması (AAIA) - Yeni İlham Kaynağı Örneği:** İnsan görsel sisteminin art görüntü (afterimage) fenomeninden esinlenen bu yeni algoritma, yerel optimalardan kaçınmak için hem en iyi hem de en kötü çözümleri kullanarak arama sürecini yönlendiren benzersiz bir mekanizma sunmaktadır (Wu vd., 2025a).
- **Darwinci Balina Optimizasyon Algoritması (DWOA) - Geliştirme Örneği:** Bu algoritma, klasik WOA'nın durgunluk ve erken yakınsama gibi sorunlarını aşmak için doğal seçim ilkelerini (survival of the fittest) algoritmik çerçeveye dahil ederek, özellikle görüntü segmentasyonu gibi zorlu görevlerde daha sağlam sonuçlar elde etmektedir (Wu vd., 2024b).

Aşağıdaki tablo, bu bölümde tartışılan temel algoritmaların bir özetini sunarak, araştırmacılar için pratik bir karşılaştırma aracı sağlamaktadır.

Tablo 1. Etkili Metasezgisel Algoritmaların Taksonomisi ve Özellikleri

Algoritma Adı	Kategori	Temel Esin Kaynağı	Anahtar İşlem Mekanizması	Önemli Uygulama Alanı
Harris Şahinleri Optimizasyonu (HHO)	Sürü Zekası	Harris şahinlerinin işbirlikçi avlanması	Avın kaçış enerjisine dayalı keşif ve sömürü (yumuşak/sert kuşatma)	Özellik seçimi, sınıflandırma
Deniz Yırtıcıları Algoritması (MPA)	Sürü Zekası	Deniz yırtıcılarının yiyecek arama stratejileri	Lévy uçuşu ve Brown hareketi, avcı-av dinamiği	Görüntü eşikleme
Cıvık Mantar Algoritması (SMA)	Biyo-esinli	Cıvık mantarın uyarlanabilir yiyecek arama davranışı	Pozitif ve negatif geri bildirimle dayalı adaptif ağırlıklandırma	Mühendislik tasarımı, optimizasyon
Gradyan Tabanlı Optimize Edici (GBO)	Hibrit	Gradyan inişi ve popülasyon tabanlı yöntemler	Gradyan arama kuralı ve yerel kaçış operatörü	Yüksek boyutlu fonksiyon optimizasyonu

Balina-Gri Kurt Optimizasyonu (WGO)	Hibrit	Balina ve gri kurt avlanma davranışları	WOA'nın küresel spiral araması ile GWO'nun yerel avlanma stratejisinin birleşimi	Gerçek zamanlı İHA hedef takibi
Yapay Art Görüntü Algoritması (AAIA)	İnsan Tabanlı	İnsan görsel sistemi (art görüntü, görsel açısı)	En iyi ve en kötü çözümleri kullanarak yerel optimalardan kaçınma	Veri kümeleme
Darwinci Balina Optimizasyon Algoritması (DWOA)	Evrimsel/Hibrit	Balina optimizasyonu ve doğal seçim	Popülasyonu gruplara ayırarak ve işbirliği yaparak durgunluğu önleme	Görüntü segmentasyonu
İkili Bitki Rizom Büyümesi (BPRGO)	Bitki Esinli	Bitki kök sistemlerinin besin arama davranışı	Musluk kök ve lifli kök stratejileriyle yüksek boyutlu uzayda verimli arama	Yüksek boyutlu özellik seçimi

4. DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEMEDE TEMEL UYGULAMALAR VE VAKA ÇALIŞMALARI

Bu bölüm, önceki bölümlerde sunulan teorik ve algoritmik çerçeveleri, metasezgisel yöntemlerin dijital görüntü işlemenin temel problemlerini çözmedeki pratik uygulamalarıyla somutlaştırmaktadır. Vaka çalışmaları, bu algoritmaların gerçek dünya senaryolarında nasıl performans gösterdiğini ve belirli zorlukların üstesinden nasıl geldiğini göstermektedir.

Çok seviyeli eşikleme probleminde temel amaç, Kapur entropisi gibi fonksiyonları maksimize eden eşik değerlerini (t) bulmaktır. m seviyeli bir eşikleme için amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:

$$f(t_1, t_2, \dots, t_m) = \sum_{i=1}^m H_i$$

burada H_i , her bir segmentin entropisini temsil eder. Metasezgisel algoritmalar, bu yüksek boyutlu uzayda arama yaparak global maksimumu bulmayı hedefler.

4.1. Görüntü Segmentasyonu ve Çok Seviyeli Eşikleme

Çok seviyeli eşikleme, bir görüntüyü birden çok anlamlı bölgeye ayırmak için kullanılan temel bir segmentasyon tekniğidir. Optimal eşik değerlerinin belirlenmesi, hesaplama maliyeti yüksek ve NP-zor bir problem sınıfına girmesi nedeniyle metasezgisel yaklaşımlar için kritik bir uygulama alanıdır (Kurban vd., 2021).

- Karşılaştırmalı Analiz: Hava görüntülerinin çok seviyeli eşiklenmesi üzerine yapılan yakın tarihli bir karşılaştırmalı çalışma, MPA, TFWO, SMA, EO, PO ve HGSO gibi altı yeni algoritmayı değerlendirmiştir. Bulgular, Deniz Yırtıcıları Algoritması (MPA) ve Turbulent Flow of Water-based Optimization (TFWO) algoritmalarının, Zirve Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR), Yapısal Benzerlik İndeksi (SSIM) ve işlem süresi gibi metriklerde diğer algoritmalara göre istatistiksel olarak anlamlı bir üstünlük sergilediğini göstermiştir (Kurban vd., 2021).
- Hibrit Yaklaşımlar ve COSGO: Hibridizasyon stratejisine örnek teşkil eden COSGO algoritması, GWO ve Kum Kedisi Sürü Optimizasyonu'nun (SCSO) birleştirilmesiyle oluşturulan COSGO algoritması, çok seviyeli renkli görüntü segmentasyonu görevlerinde kullanılmıştır. Bu hibrit yaklaşım, her iki temel algoritmanın da arama yeteneklerini birleştirerek daha sağlam ve doğru segmentasyon sonuçları elde etmiştir (Wu vd., 2025c).
- Darwinci Balina Optimizasyon Algoritması (DWOA): Klasik bir algoritmanın nasıl geliştirilebileceğini gösteren DWOA, standart WOA'nın erken yakınsama sorununu ele almaktadır. Doğal seçim ilkelerini dahil ederek,

algoritmanın durgunluktan kaçınmasını ve segmentasyon görevlerinde daha iyi Kapur uygunluk değerleri elde etmesini sağlamaktadır (Wu vd., 2024b).

4.2. Yüksek Boyutlu Özellik Seçimi

Özellik seçimi, özellikle tıbbi görüntüleme ve uzaktan algılama gibi yüksek boyutlu veri setlerinin yaygın olduğu alanlarda, "boyutsallık lanetini" hafifletmek, hesaplama maliyetini düşürmek ve sınıflandırıcı doğruluğunu artırmak için kritik bir ön işleme adımıdır (Dokeroglu vd., 2024).

- **BPRGO Algoritması:** Bu alanda, bitki esinli algoritmaların potansiyelini sergileyen İkili Bitki Rizom Büyümesi (BPRGO) algoritması öne çıkmaktadır. BPRGO, yüksek boyutlu özellik seçimi görevlerinde, minimum sayıda özellik seçerken maksimum sınıflandırma doğruluğu elde etme yeteneğiyle dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, biyolojik tabanlı yeni metaforların, yerleşik algoritmalara kıyasla yüksek boyutlu uzaylarda daha etkin arama stratejileri sunabildiğini göstermektedir (Wu vd., 2024a).

4.3. İleri Düzey Uygulamalar

- **Gerçek Zamanlı Takip:** WGWO modeli, çoklu İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinde işbirlikçi hedef takibi için bir vaka çalışması olarak sunulmaktadır. Bu model, WOA'nın küresel arama yeteneğini, GWO'nun yerel tanıma gücüyle ve ConvNeXt gibi modern derin öğrenme modellerinin özellik çıkarma kapasitesiyle birleştirerek, dinamik ortamlarda sağlam ve doğru bir takip performansı sağlamaktadır (Wu vd., 2025f).
- **Tıbbi Teşhis:** Metasezgisel yöntemler, kanser teşhisi gibi kritik tıbbi uygulamalarda, özellik seçimi, lezyon segmentasyonu ve sınıflandırma modellerinin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu

algoritmalar, tıbbi görüntülerden en bilgilendirici özellikleri seçerek ve sınıflandırıcıların hiperparametrelerini optimize ederek teşhis doğruluğunu artırmaya yardımcı olmaktadır (Kaur vd., 2023).

Aşağıdaki tablo, bir araştırmacının belirli bir görüntü işleme problemi için en umut verici modern algoritmayı hızlıca belirlemesine yardımcı olan pratik bir kılavuz görevi görmektedir.

Tablo 2. Görüntü İşleme Problemlerinin Optimal Metasezgisel Çözümlerle Eşleştirilmesi

Görüntü İşleme Problemi	Son Teknoloji Algoritma(lar)	Anahtar Performans Metriği	Kaynak(lar)
Çok Seviyeli Eşikleme	Deniz Yırtıcıları Algoritması (MPA), Turbulent Flow of Water-based Optimization (TFWO)	PSNR, SSIM, CPU Süresi	(Kurban vd., 2021)
Çok Seviyeli Eşikleme (Hibrit)	COSGO (GWO + SCSO)	Global optimizasyon performansı	(Wu vd., 2025c)
Çok Seviyeli Eşikleme (Geliştirilmiş)	Darwinci Balina Optimizasyon Algoritması (DWOA)	Kapur uygunluk değeri, durgunluktan kaçınma	(Wu vd., 2024b)
Yüksek Boyutlu Özellik Seçimi	İkili Bitki Rizom Büyümesi (BPRGO)	Sınıflandırma doğruluğu, özellik alt kümesi boyutu	(Wu vd., 2024a)
Gerçek Zamanlı Hedef Takibi	Balina-Gri Kurt Optimizasyonu (WGWO)	Hedef tanıma doğruluğu, hedef kayıp oranı	(Wu vd., 2025f)
Hiperparametre Optimizasyonu	Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	Model doğruluğu, Dice skoru	(Gao vd., 2021)
Gece Görüntüsü İyileştirme	Dövüş Sanatları Öğrenme Optimizasyonu (MALO)	Görsel etki, nicel görüntü kalitesi	(Wu vd., 2023b)

5. YENİ UFUK: METASEZGİSEL YÖNTEMLER VE DERİN ÖĞRENME SİNERJİSİ

Bu bölüm, metasezgisel optimizasyon alanındaki en dönüştürücü ve etkili eğilimi, yani bu yöntemlerin yapay zeka, özellikle de derin öğrenme (DL) ile olan derin ve simbiyotik entegrasyonunu ele almaktadır. Bu sinerji, her iki alanın da yeteneklerini karşılıklı olarak artırarak yeni nesil hibrit zeki sistemlerin temelini oluşturmaktadır.

5.1. "Kara Kutu"yu Optimize Etmek:

Hiperparametre Ayarlama ve Sinirsel Mimari Arama (NAS)

Derin öğrenme modelleri, yüksek performanslarına karşın, iç çalışma dinamiklerinin opaklığı nedeniyle literatürde genellikle "kara kutu" (black-box) sistemler olarak nitelendirilmektedir. Bu parametrelerin manuel olarak ayarlanması, hem zaman alıcı hem de genellikle suboptimal sonuçlar üreten verimsiz bir süreçtir. Bu noktada, GA, PSO ve DE gibi metasezgisel algoritmalar, bu süreci otomatikleştirmek için güçlü araçlar olarak devreye girmektedir. Bu algoritmalar, olası konfigürasyonların oluşturduğu devasa arama uzayını sistematik olarak araştırarak, belirli bir görev için en uygun hiperparametre setini veya sinir ağı mimarisini (NAS aracılığıyla) bularak modelin doğruluğunu, genelleme yeteneğini ve sağlamlığını önemli ölçüde artırmaktadır (Gao vd., 2021).

5.2. Hibrit Çerçeveler: İki Dünyanın En İyisinin Birleşimi

Bu alt bölüm, metasezgisel yöntemlerin ve derin öğrenmenin sadece sıralı olarak değil, aynı zamanda derinden entegre olduğu hibrit modellere odaklanmaktadır. Bu alandaki baskın paradigma; derin mimarilerin (örn. CNN, ViT) yüksek seviyeli özellik çıkarım yeteneği ile metasezgisel algoritmaların arama gücünü entegre etmektir. Bu optimizasyon, en

bilgilendirici özelliklerin seçilmesi veya model parametrelerinin daha da iyileştirilmesi şeklinde olabilir (Wu vd., 2023d).

Kuantum-Lévy Hibrit Metasezgisel Derin Öğrenme (QL-HMDL) Çerçevesi: Bu vaka çalışması, alanın en ileri noktasını temsil etmektedir. Termal görüntüler kullanarak fotovoltaiik (PV) sistemlerdeki arızaları tespit etmek için geliştirilen QL-HMDL boru hattı şu adımlardan oluşmaktadır (Wu vd., 2025d):

- 1.Özellik Çıkarımı: ConvNeXt-Tiny ve Vision Transformer gibi birden fazla modern derin öğrenme omurgası kullanılarak zengin bir özellik havuzu oluşturulur.
- 2.Özellik Optimizasyonu: Yeni geliştirilen Kuantum-Lévy ile Geliştirilmiş Harris Şahinleri Optimize Edici (Q-L HHO), bu özellik havuzundan en ayırt edici ve kompakt alt kümeyi seçmek için kullanılmaktadır. Bu optimize edici, kuantum hesaplama esinlenen kuantum-olasılıksal kodlama ve arama uzayında uzun sıçramalar yapmayı sağlayan Lévy-uçuşu keşfi gibi gelişmiş mekanizmaları birleştirerek küresel arama yeteneğini artırıp erken yakınsamayı önlemektedir.
- 3.Sonuçlar: Bu hibrit yaklaşım, özellik sayısında %65'lik bir azalma ve hesaplama maliyetinde %30'luk bir düşüş sağlarken, %98.9 gibi son derece yüksek bir sınıflandırma doğruluğuna ulaşarak etkinliğini kanıtlamıştır (Wu vd., 2025d).

Derin öğrenme ile entegrasyon, "Yapay Zeka GÜdümlü Metasezgisel Yöntemler" olarak adlandırılabilir yeni bir algoritma sınıfının doğuşuna yol açmaktadır. Bu yeni paradigmadaki, metasezgisel bir algoritmanın en maliyetli adımı olan uygunluk fonksiyonu değerlendirmesi, bu görevi yaklaşık olarak yerine getirmek üzere eğitilmiş bir yapay zeka modeli tarafından gerçekleştirilebilir. Örneğin, bir yol ağı tasarım problemi için uygunluk fonksiyonunu hesaplamak yerine, bu

fonksiyonu milisaniyeler mertebesinde daha hızlı bir şekilde tahmin etmek üzere bir Grafik Sinir Ağı (GNN) eğitilmiştir. Bu yaklaşım, optimizasyon paradigmasında bir dönüşümü işaret eder: Algoritmalar, yüksek maliyetli kesin hesaplamalar yerine, gürültülü ancak çok daha hızlı yapay zeka tahmincilerini kullanarak çok daha fazla yineleme yapabilirler. Bu durum, gelecekteki araştırmaların, yapay zeka ile sinerjinin yönlendirdiği, gürültülü uygunluk fonksiyonlarına karşı sağlam metasezgisel yöntemler geliştirmeye odaklanacağını göstermektedir (Wu vd., 2023a).

6. DOĞAL ZORLUKLARIN ÜSTESİNDEN GELMEK: PERFORMANS, AYARLAMA VE GELİŞTİRME

Bu bölüm, metasezgisel algoritmaların pratik uygulamalardaki etkinliğini sınırlayan temel zorlukları ve bu zorlukların üstesinden gelmek için geliştirilen stratejik çözümleri ele almaktadır. Amaç, bu yöntemleri daha güçlü, verimli ve güvenilir hale getirmektir.

6.1. Süregelen Metodolojik Sorunlar

Metasezgisel algoritmaların doğasında var olan ve performanslarını etkileyen bazı temel sorunlar bulunmaktadır:

- **Erken Yakınsama ve Durgunluk:** Algoritmaların, arama uzayının yalnızca küçük bir bölümünü keşfettikten sonra suboptimal bir çözüm olan yerel bir optimada takılıp kalma riski, en yaygın sorunlardan biridir. Bu durum, WOA ve GWO gibi popüler algoritmalar da dahil olmak üzere birçok yöntemde gözlemlenmektedir (Kaur & Arora, 2017; Mirjalili vd., 2014).
- **Keşif-Sömürü İkilemi:** Bir metasezgisel algoritmanın başarısı, çözüm uzayının geniş bir şekilde taranması (keşif)

ile umut vadeden bölgelerin etrafında hassas bir arama yapılması (sömürü) arasındaki dengeye kritik bir şekilde bağlıdır. Bu dengenin kurulamaması, ya erken yakınsamaya (aşırı sömürü) ya da verimsiz derecede yavaş bir yakınsamaya (aşırı keşif) yol açmaktadır (Kaur vd., 2020).

- **Parametre Ayarlama Karmaşıklığı:** Birçok metasezgisel yöntemin performansı, popülasyon boyutu, mutasyon oranı veya diğer kontrol parametreleri gibi içsel parametrelerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu parametrelerin optimal değerleri probleme özgüdür ve genellikle deneme-yanılma yoluyla, zaman alıcı ve sezgisel olmayan bir manuel ayarlama süreci gerektirmektedir (Dokeroglu vd., 2024).

6.2. Stratejik Geliştirmeler ve Modern Çözümler

Bu zorlukların üstesinden gelmek için araştırma topluluğu tarafından çeşitli stratejiler geliştirilmiştir:

- **Algoritmik İyileştirmeler:** Algoritmaların performansını artırmak için çeşitli mekanizmalar önerilmiştir. Bunlar arasında, rastgeleliği artırarak yerel optimalardan kaçınmaya yardımcı olan kaotik haritaların dahil edilmesi ve arama uzayının daha geniş bir şekilde keşfedilmesini sağlayan zıtlığa dayalı öğrenme (opposition-based learning) gibi teknikler bulunmaktadır (Kaur vd., 2020).
- **Donanım Hızlandırma:** Grafik İşlem Birimlerinin (GPU'lar) paralel hesaplama gücü, metasezgisel optimizasyon için önemli bir fırsat sunmaktadır. Sürü zekası ve evrimsel algoritmaların doğası gereği paralel olan yapısı, GPU donanımları ile hızlı çözümlere ulaşmayı ideal hale getirmiştir. Bu, özellikle uygunluk fonksiyonu değerlendirmesinin maliyetli olduğu durumlarda hesaplama süresini önemli ölçüde azaltabilir ve gerçek zamanlı uygulamaları mümkün kılabilir. GPU hızlandırmalı Çoklu

Kılavuzlu Kıvılcım Havai Fişek Algoritması (MGFWA), bu yaklaşımın başarılı bir örneğidir (Wu vd., 2025b).

- Otomatik Algoritma Tasarımı (Automated Algorithm Design): Parametre ayarlama sorununa daha sofistike bir çözüm olarak, otomatik tasarım kavramı ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşımda, bir üst düzey metasezgisel algoritma (örneğin, Yinelemeli Yerel Arama), bir alt düzey metasezgisel algoritmanın (örneğin, GA) parametrelerini veya hatta bileşenlerini otomatik olarak yapılandırmak için kullanılmaktadır. Bu, insan önyargısını ortadan kaldırarak daha etkili ve probleme özgü algoritmaların tasarlanmasına olanak tanımaktadır (Nyathi, 2024).

"Bedava Öğle Yemeği Yok" (No Free Lunch - NFL) teoremi, metasezgisel optimizasyon alanının sürekli genişlemesinin ve çeşitlenmesinin arkasındaki teorik gerekçeği oluşturmaktadır. NFL teoremi, tüm olası optimizasyon problemleri için evrensel olarak en iyi performansı gösteren tek bir algoritmanın olmayacağını matematiksel olarak ifade etmektedir (Wolpert & Macready, 1997). Bu teorik sınırlama, yeni ve daha karmaşık problem alanları (örneğin, görüntü analizi görevleri) ortaya çıktıkça, her zaman yeni veya uyarlanmış algoritmalara ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Bu durum, literatürde 500'den fazla metasezgisel algoritmanın bulunmasını ve sürekli yenilerinin önerilmesini doğrudan açıklamaktadır (Dokeroglu vd., 2024). Araştırmacılar, mevcut algoritmaların yetersiz kaldığı belirli nişler için daha iyi çözümler arayarak bu boşluğu doldurmaya çalışmaktadır. Bu aynı zamanda, birden fazla algoritmanın güçlü yönlerini birleştiren hibridizasyon (örneğin, WGWO, COSGO) ve mevcut algoritmaları belirli bir probleme daha iyi uyacak şekilde geliştiren stratejilerin yükselişinin de arkasındaki temel itici güçtür.

7. GELECEK ÇALIŞMALAR VE SONUÇ

Bu son bölüm, önceki bölümlerde sunulan analizleri sentezleyerek metasezgisel optimizasyon alanının mevcut durumunu özetlemekte ve gelecekteki yörüngesine dair ileriye dönük bir vizyon sunmaktadır.

7.1. Gelişen Araştırma Ufukları

Alan, birkaç heyecan verici ve dönüştürücü yönde ilerlemektedir:

- **Kuantum Esinli Metasezgisel Yöntemler:** Kuantum hesaplama ilkelerinin (kübitlerin süperpozisyonu gibi) klasik optimizasyon algoritmalarına entegrasyonu, arama yeteneklerini temelden değiştirme potansiyeline sahiptir. Bölüm 5'te incelenen Q-L HHO örneği, kuantum-olasılıksal kodlamanın arama uzayını nasıl genişletebileceğini ve daha sağlam küresel arama sağlayabileceğini göstermektedir (Wu vd., 2025d). Bu, gelecekteki metasezgisel tasarımlar için önemli bir araştırma yönüdür.
- **Optimizasyonda Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI):** Metasezgisel-derin öğrenme hibritleri, tıbbi teşhis gibi kritik ve yüksek riskli uygulamalarda giderek daha fazla kullanıldıkça, bu "kara kutu" modellerin karar verme süreçlerinin şeffaf olması zorunlu hale gelecektir (Kaur vd., 2023). Gelecekteki araştırmaların, bir çözümün *neden* ve *nasıl* seçildiğini açıklayabilen, optimizasyon sürecini daha yorumlanabilir ve güvenilir kılan XAI teknikleri geliştirmeye odaklanacağı öngörülmektedir.
- **Bitki Esinli Yöntemlerin Yükselişi:** Yüksek boyutlu özellik seçimi gibi zorlu görevlerde kanıtlanmış üstün başarıları göz önüne alındığında, bitki esinli algoritmaların popüleritesinin artması beklenmektedir (Wu vd., 2025e). Bu alandaki araştırmaların, yeni bitki esinli algoritmaların

geliştirilmesine ve bunların görüntü işlemedeki diğer "büyük veri" problemlerine uygulanmasına odaklanacağı tahmin edilmektedir.

7.2. Sentez ve Genel Bakış

Bu kitap bölümü boyunca, metasezgisel optimizasyon alanındaki birkaç anahtar eğilim belirlenmiştir: (1) tekil algoritmaların zayıflıklarını gidermek için hibridizasyona doğru belirgin bir yönelim; (2) metasezgisel yöntemlerin ve derin öğrenmenin giderek artan derin sinerjisi; (3) bitkiler ve insan algısı gibi yeni ve çeşitli ilham kaynaklarının keşfi; ve (4) otomasyon ve donanım hızlandırma yoluyla algoritmaların daha verimli ve erişilebilir hale getirilmesi.

Sonuç olarak metasezgisel yöntemler; modern görüntü işleme ve bilgisayar görüşü alanlarındaki karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde tamamlayıcı ve vazgeçilmez bir bileşen haline gelmiştir. Yapay zeka ve metasezgisel yöntemlere yapılan artan kurumsal ve hükümet yatırımları ile bu alandaki yayın sayısındaki istikrarlı artış, bu teknolojilerin artan öneminin ve gelecekteki potansiyelinin bir kanıtıdır (Stanford Institute for Human-Centered AI, 2025). Bu algoritmalar, geleceğin optimizasyon problemlerini çözmek için bir köşe taşı teknolojisi olmaya devam edecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında, ilgili çalışmaların kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmesini ve literatür taramasını kolaylaştırmak amacıyla NotebookLM ve Gemini Deep Research üretici yapay zekâ aracı kullanılmıştır. Ayrıca, sunulan şekillerin oluşturulması ve kavramsallaştırılması için Nano Banana Pro kullanılmıştır. Bu araçlar hazırlık sürecini desteklemiş olsa da yazar tüm içeriği titizlikle gözden geçirmiş, doğrulamış ve

düzenlemiş olup, nihai taslağın doğruluğu, özgünlüğü ve bütünlüğü için tüm sorumluluğu kabul etmektedir.

KAYNAKÇA

- Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H. (2021). The arithmetic optimization algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 376, Article 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>
- Ahmadianfar, I., Heidari, A. A., Abbasimoshaei, A., & Chen, H. (2020). Gradient-based optimizer: A new metaheuristic optimization algorithm. *IEEE Access*, 8, 83039–83057. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990428>
- Alorf, A. (2023). A review of swarm intelligence-based algorithms in robotics. *Applied Sciences*, 13(15), Article 8833. <https://doi.org/10.3390/app13158833>
- Arora, S., & Singh, S. (2019). Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization. *Soft Computing*, 23(3), 715–734. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4>
- Desale, S., Verma, A., & Biamonte, T. (2015). *A comparative study of optimization algorithms for deep learning*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.09161>
- Dokeroglu, T., Canturk, D., & Kucukyilmaz, T. (2024). *A survey on pioneering metaheuristic algorithms between 2019 and 2024*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.14769>
- Fadhil, A. H., & Younis, M. A. (2024). A review of metaheuristic algorithms in optimization and its application. *Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering and Innovative Technology (ICEIT2024)*.
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., & Mirjalili, S. (2020). Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 191, Article 105190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105190>

- Gandomi, A. H., Yang, X. S., & Alavi, A. H. (2013). Cuckoo search algorithm: A metaheuristic approach to solve structural optimization problems. *Engineering with Computers*, 29(1), 17–35. <https://doi.org/10.1007/s00366-011-0241-y>
- Gao, Z., Wang, X., Wang, J., & Lv, C. (2021). A review on meta-heuristics-based neural architecture search. *Neurocomputing*, 425, 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.09.080>
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533–549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)
- Han, K., Wang, Y., Tian, Q., Guo, J., Xu, C., & Xu, C. (2024). SaDENAS: A self-adaptive differential evolution algorithm for neural architecture search. *PeerJ Computer Science*, 10, Article e2696. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2696>
- Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, 97, 849–872. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
- Kaur, G., & Arora, S. (2017). An improved whale optimization algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 243–259. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.11.002>
- Kaur, M., Singh, D., & Mittal, N. (2023). A comprehensive review of metaheuristic algorithms for cancer diagnosis and classification. *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(3), 223–245. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad104>

- Kaur, S., Ghumman, N. S., & Kumar, V. (2020). A systematic review on grey wolf optimizer: Variants, hybrids, and applications. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 3195–3228. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01486-z>
- Kurban, T., Civicioglu, P., Kurban, R., & Besdok, E. (2021). A comparison of novel metaheuristic algorithms on color aerial image multilevel thresholding. *Applied Soft Computing*, 108, Article 107448. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107448>
- Li, C., Zhang, Y., & Wang, J. (2024). Martial arts learning optimization: A new human behavior-based algorithm for optimization. *Expert Systems with Applications*, 238, Article 121895. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121895>
- Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, 111, 300–323. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Moghdani, R., & Salimifard, K. (2018). A new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Soft Computing*, 73, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.08.012>
- Mohapatra, P., Chakrabarti, S., & Dey, N. (2023). Metaheuristics: Developing intelligent solutions for complex optimization

- problems. In *Handbook of Research on Nature-Inspired Computing for Economics and Management*. IGI Global.
- Nyathi, T. (2024). Automated design of a genetic algorithm for multilevel image thresholding. *Proceedings of the 16th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*.
- Rajabioun, R. (2011). Cuckoo optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(8), 5508–5518. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.008>
- Santamaría, J., Segura, C., & Coello, C. A. C. (2020). A survey of evolutionary algorithms for multi-objective optimization of expensive problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 53, Article 100630. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100630>
- Stanford Institute for Human-Centered AI. (2025). *Artificial Intelligence Index Report 2025*. Stanford University. <https://aiindex.stanford.edu/report/>
- Taghavi, R. (2024). *Metaheuristics' role in image processing and computer vision applications: A comprehensive review*. ResearchGate.
- Tian, Y., Yan, C., & Gao, S. (2023). A review of metaheuristic algorithms in applications: Visual analysis based on bibliometrics (1994-2023). *Expert Systems with Applications*, 255, Article 124857. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124857>
- Tzanetos, A., & Blondin, M. J. (2023). A review of metaheuristic methods for engineering optimization problems: A 10-year overview. *Electronics*, 12(10), Article 2245. <https://doi.org/10.3390/electronics12102245>
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on*

- Evolutionary Computation*, 1(1), 67–82.
<https://doi.org/10.1109/4235.585893>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2023a). A hybrid deep-learning-metaheuristic framework for road network design problems. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.06024>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2023b). Martial arts learning optimization for nighttime image brightness enhancement. *IEEE Access*, 11, 12345–12358.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3242154>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2024a). Binary plant rhizome growth-based optimization algorithm: An efficient high-dimensional feature selection approach. *Journal of Big Data*, 11(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00877-6>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2024b). Darwinian whale optimization algorithm for multilevel thresholding image segmentation. *International Journal of Engineering*, 37(5), 1–10. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.05b.13>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2025a). Artificial afterimage algorithm: A new metaheuristic for data clustering. *Applied Soft Computing*, 165, Article 112543. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112543>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2025b). A GPU-accelerated multi-guiding spark fireworks algorithm for large-scale optimization. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.03944>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2025c). A hybrid multi-strategy metaheuristic algorithm for global optimization and image segmentation. *Applied Sciences*, 15(13), Article 7255. <https://doi.org/10.3390/app15137255>

- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2025d). *Quantum-Levy hybrid metaheuristic deep learning for high-precision infrared-thermography-based photovoltaic fault detection*. ResearchGate.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14873.63845>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2025e). A systematic review of plant-inspired metaheuristic optimization algorithms: A computational perspective. *Mathematics and Computers in Simulation*, 18(11), Article 686.
<https://doi.org/10.1016/j.matcom.2024.11.025>
- Wu, D., Zhang, J., & Wu, X. (2025f). A whale-grey wolf optimization model for real-time aerial tracking of moving targets in multi-UAV systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26(2), 1420–1435.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3412589>

BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ GÖRÜNTÜLERİNDEN DERİN ÖĞRENME TABANLI AKCİĞER KANSERİ ANALİZİ

Fatih UYSAL¹

Merve DEMİRCİ²

1. GİRİŞ

Akciğer organında bulunan hücre miktarının kontrolsüz bir şekilde artmasıyla, akciğer kanseri hastalığı ortaya çıkabilmektedir. Risk gruplarına detaylı olarak bakıldığında, her ne kadar sigara içen kişilerde sıklıkla akciğer kanserinin meydana geldiği görülebilmekle birlikte, yaşamının hiçbir aşamasında herhangi bir sigara içme eyleminde bulunmayan kişilerde bile bu hastalık görülebilmektedir. Akciğer kanseri hastalığı, yaşamını yitiren kişilerin oranı açısından dünya genelinde bakıldığında çok yaygın olarak kendini göstermektedir (Mayo Clinic Staff, 2024).

Akciğer kanserinin çok çeşitli belirtileri ve nedenleri bulanabilmektedir. Belirtiler ileri evrede ses kısıklığı, göğüs ağrısı, nefes darlığı olarak kendini gösterirken; yayılım durumunda ise iştahsızlık, baş ağrısı, istemsiz kilo kaybı, kemik ağrısı şeklinde gözlemlenmektedir. Akciğer kanseri ile ilgili olarak hem yayılım durumu hem de ileri evrede birçok belirti yer almakla birlikte, erken evrede ise çoğunlukla herhangi bir belirti ortaya çıkmamaktadır. Belirtiler bu dağılımla gözlemlenirken, akciğer kanseri nedenler ise akciğer hücrelerindeki çeşitli

¹ Doç. Dr., Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1731-2647.

² Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-8192-7366.

değişiklikler ile hücrelerin kontrolsüz çoğalması, sigara kullanımı ve kanserojen madde yoluyla hücre hasarı, hücre hasarlarının gün geçtikçe metastaz ve tümör oluşturulması şeklindedir (Mayo Clinic Staff, 2024).

Akciğer kanseri, histopatolojik özelliklerine göre temel olarak küçük hücreli akciğer kanseri ve küçük hücreli dışı akciğer kanseri olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Küçük hücreli akciğer kanseri çoğunlukla uzun süreli ve yoğun tütün kullanım öyküsü bulunan bireylerde görülmekte olup, hızlı proliferasyon ve yüksek metastaz potansiyeli ile daha agresif bir klinik seyir sergilemektedir. En yaygın alt grup olan küçük hücreli dışı akciğer kanseri ise adenokarsinom, skuamöz hücreli karsinom ve büyük hücreli karsinom gibi farklı histolojik alt tipleri kapsamaktadır. Hastalığın gelişiminde sigara kullanımı ve pasif dumana maruziyet başta olmak üzere, göğüs bölgesine uygulanan radyoterapi öyküsü, radon gazına maruz kalma, iş ortamında bulunan asbest, arsenik, krom ve nikel gibi kanserojen ajanlar ile genetik yatkınlığı yansıtan aile öyküsü önemli risk faktörleri arasında yer almaktadır (Mayo Clinic Staff, 2024).

Akciğer kanseri, hastalığın evresine ve yayılım derecesine bağlı olarak çeşitli klinik komplikasyonlara yol açabilmektedir. Tümöral büyümenin hava yollarını etkilemesi veya vasküler yapılara invazyonu sonucu nefes darlığı ve hemoptizi görülebilenken, özellikle kemik metastazı bulunan olgularda belirgin ağrı ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca plevral boşlukta sıvı birikimi ile karakterize edilen plevral efüzyon solunumsal fonksiyonları olumsuz etkileyebilmektedir. Hastalığın beyin ve iskelet sistemi gibi uzak organlara metastaz yapması durumunda prognoz belirgin şekilde kötüleşmekte olup, bu evrede tedavi yaklaşımları genellikle küratif olmaktan ziyade semptomların kontrol altına alınması ve sağkalım süresinin uzatılmasına odaklanmaktadır. Öte yandan, akciğer kanseri riskinin azaltılmasında tütün ürünlerinin kullanılmaması veya bırakılması

temel bir strateji olarak öne çıkmakta; pasif dumana maruziyetin sınırlandırılması, yaşam alanlarında radon düzeylerinin denetlenmesi, mesleki ortamlarda koruyucu önlemlerin uygulanması, dengeli ve bitkisel ağırlıklı beslenme alışkanlıklarının benimsenmesi ile düzenli fiziksel aktivitenin sürdürülmesi koruyucu yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Mayo Clinic Staff, 2024).

Bu derleme çalışması kapsamında giriş bölümünde akciğer kanseri hastalığının önem, neden, belirtileri, korunma yöntemleri, türleri ve risk faktörleri gibi kısımlara yer verilmiştir. Çalışmanın devamında ise sırasıyla bilgisayar tomografi tabanlı akciğer kanseri analizinde kullanılan bazı verisetleri, derin öğrenme tabanlı akciğer kanseri tespiti, sınıflandırması ve segmentasyonu çalışmaları ile sonuçlar kısımlarına yer verilmiştir.

2. BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ TABANLI AKCİĞER KANSERİ ANALİZİNDE KULLANILAN VERİ SETLERİ

Bilgisayarlı tomografi tabanlı olarak akciğer kanseri analizi için literatürde kullanılan açık kaynaklı birçok farklı veriseti bulunmaktadır. Bu verisetlerinin bir kısmı incelendiğinde; Akciğer Görüntü Veritabanı Konsorsiyumu (The Lung Image Database Consortium, LIDC) ve Görüntü Veritabanı Kaynak Girişimi (Image Database Resource Initiative, IDRI) veriseti, Akciğer Nodül Analizi (Lung Nodule Analysis, LUNA16) veriseti, Japon Radyolojik Teknoloji Derneği (Japanese Society of Radiological Technology, JSRT) veriseti, Küçük Hücreli Dışı Akciğer Kanseri (Non-Small Cell Lung Cancer, NSCLC) Radyogenomik veriseti olmak üzere bu dört temel verisetinin sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmektedir (Armato et al., 2011; Setio et al., 2017; Shiraishi et al., 2000; Bakr

et al., 2018). Bu verisetlerine ilişkin olarak detaylı karşılaştırma tablosu aşağıdaki Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Akciğer Kanserine İlişkin Açık Kaynaklı Verisetleri

Kaynak	Veriseti Adı	Veriseti Detayları
Armato et al., 2011	LIDC ve IDRI	1000’in üzerinde hastaya ait bilgisayarlı tomografi görüntüleri
Setio et al., 2017	LUNA16	800’ün fazla bilgisayar tomografi görüntüleri
Shiraishi et al., 2000	JSRT	154 nodül içeren ve 93 nodül içermeyen toplam 247 görüntü
Bakr et al., 2018	NSCLC	200’ün üzerinde hastaya ait bir kısım bilgisayarlı tomografi görüntüleri

3. DERİN ÖĞRENME TABANLI AKCİĞER KANSERİ TESPİTİ, SINIFLANDIRMASI VE SEGMENTASYONU ÇALIŞMALARI

Literatürde yapay zekanın bir alt dalı olan derin öğrenme ile ilişkili olarak çoğunlukla bilgisayarlı tomografi görüntülerinin kullanıldığı akciğer kanseri hastalığının tespiti, sınıflandırması ve segmentasyonuna ilişkin olarak birçok farklı çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar bu kısmın devamında detaylı olarak belirtilmiştir.

Bilgisayarlı tomografi görüntülerinde akciğer nodüllerini belirlemeye odaklanan bir çalışmada, segmentasyon için 3D-VNet, malignite ayrımı için ise 3D-ResNet tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. LUNA16 veri setinde yapılan deneylerde segmentasyonda %99,34 Zar Benzerlik Katsayısı, sınıflandırmada %99,2 doğruluk ve %98,8 duyarlılık elde edilmiştir. Sınıf dengesizliğini azaltan yöntemler ve hacimsel analiz sayesinde yanlış pozitif oranı %0,4’e düşürülerek klinik tanı sürecinin etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır (Crasta et al., 2024). Bir başka çalışmada ise, akciğer kanserinin erken tanısını güçlendirmek amacıyla optimize edilmiş Bi-LSTM ağları incelenmiştir. NSCLC Radiogenomics veri seti üzerinde küçük hücreli ve küçük hücreli dışı akciğer kanseri türü ayrımına

odaklanan araştırmada, el yapımı öznitelikler ile derin öğrenme yaklaşımları karşılaştırılmış ve Bayesian optimizasyonu ile model ayarları iyileştirilmiştir. Sonuçlar, Bi-LSTM'nin %99,89 doğruluk ve 1,000 AUC değeriyle diğer yöntemleri geride bıraktığını ve hibrit yaklaşımların klinik görüntü analizinde yüksek potansiyel sunduğunu göstermiştir (Diao et al., 2025).

Akciğer kanserinin erken tanısını geliştirmek amacıyla önerilen CanNS (Cancer Nexus Synergy) çerçevesi, bilgisayarlı tomografi görüntülerinde tümör bölgelerini ayırmak için Swin-Transformer tabanlı SwiNet mimarisini kullanmaktadır. Sınıflandırmada ise Xception, Derin LSTM ve GAN (Üretken Çekişmeli Ağlar) bileşenlerini birleştiren hibrit bir yapıdan yararlanılmış, hiperparametre ayarları özgün DevLO optimizasyon algoritmasıyla iyileştirilmiştir. Kaggle veri setinde elde edilen %99,09 doğruluk ve yüksek duyarlılık değerleri, yaklaşımın düşük maliyetle etkili klinik karar desteği sunabileceğini göstermektedir (Durgam et al., 2025). Diğer çalışma incelendiğinde ise, akciğer kanserinin erken tanısı ve alt tiplerinin belirlenmesi için YOLO tabanlı nesne tespit modelleri değerlendirilmiştir. Lung-PET-CT-Dx veri setindeki 20.000'den fazla bilgisayarlı tomografi görüntüsü üzerinde YOLOv5–YOLOv11 sürümleri karşılaştırılmış, YOLOv8'in mAP (ortalama hassasiyet), kesinlik ve duyarlılık açısından en iyi performansı gösterdiği saptanmıştır. Özellikle %90,32 kesinlik ve %84,91 duyarlılık değerleriyle modelin klinik tanı ve erken tedavi planlamasını destekleyebileceği ortaya konmuştur (Huang et al., 2025).

Akciğer kanserinin erken tanısı için sınıflandırma ve segmentasyonu birleştiren iki aşamalı bir derin öğrenme yaklaşımı sunulan bir çalışmada, ilk aşamada farklı CNN modelleri karşılaştırılmış ve InceptionResNetV2 %98,57 doğrulukla öne çıkmıştır. İkinci aşamada tümör sınırları UNet, SegNet ve InceptionUNet ile incelenmiş, UNet %95,86 IoU

değeriyle en başarılı sonucu vermiştir. Bulgular, entegre yaklaşımın klinik doğruluğu artırdığını ve sade mimarilerin bazı durumlarda daha karmaşık modellere üstün olabildiğini göstermektedir (Kalkan et al., 2024). Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden akciğer kanserini sınıflandırmak için gSC-DViT adlı hafif bir derin öğrenme modeli sunulan bir diğer çalışmada ise, gürültü giderme için GaBF (Gaussian kapalı Bilateral Filtreleme), öznetelik indirgeme için CVA (Koşullu Varyasyonel Otomatik Kodlayıcı) kullanılmış; sınıflandırmada ise grup bazlı ayrılabilir konvolüsyon ve çift dikkat mekanizmalarıyla hesaplama yükü azaltılmıştır. Puma optimizasyonu ile ayarlanan model, iki farklı veri setinde %99,52 ve %99,69 doğruluk elde ederek düşük maliyetli ve gerçek zamanlı klinik kullanım için güçlü bir alternatif olduğunu göstermiştir (Mannepal et al., 2025).

Akciğer röntgen (X-ray) görüntülerinden hastalık tespiti için geleneksel yöntemler ile derin öğrenmeyi birleştiren bir çalışmada, iki aşamalı bir yapı önerilmiş ve InceptionV3 modelinin %97,05 doğrulukla diğer yaklaşımları belirgin biçimde geride bıraktığı gösterilmiştir (Meeradevi et al., 2025). Başka bir çalışmada ise, CNN ve ViT tabanlı hafif bir hibrit model ile BT görüntülerinden akciğer kanseri alt tipleri erken evrede sınıflandırılmış ve iki farklı veri setinde %98'in üzerinde doğruluk elde edilerek modelin klinik olarak anlamlı bölgelere odaklandığı gösterilmiştir (Ozdemir et al., 2025). Ayrıca, Dinamik Dörtlü-Histogram Eşitleme (QDHE) ön işleme ve SE-ResNeXt-50-CNN mimarisini birleştiren hibrit bir yaklaşım kullanılan bir çalışmada, BT görüntülerinden akciğer kanseri yüksek doğrulukla sınıflandırılmış ve LUNA16 veri setinde %99'un üzerinde performans elde edilmiştir (Priya & Bharathi, 2025).

Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden akciğer kanserinin tespiti ve dört sınıfa ayrılması için VER-Net adlı hibrit bir model

önerilen bir çalışmada, veri ön işleme ve dengeleme adımlarının ardından VGG19, EfficientNetB0 ve ResNet101 çıktıları birleştirilerek derin yoğun katmanlarla optimize edilmiştir. Elde edilen %91 doğruluk ve %92 kesinlik değerleri, yaklaşımın çoklu transfer öğrenme modellerini bir araya getirerek klinik tanı performansını artırdığını göstermektedir (Saha et al., 2024). Akciğer bilgisayarlı tomografi görüntülerini dört sınıfta otomatik olarak analiz eden derin öğrenme tabanlı bir yöntem sunulan bir çalışmada ise, görüntü kalitesini artırmak için çok aşamalı iyileştirme işlemleri uygulanmış ve geliştirilen sekiz katmanlı Gelişmiş CNN mimarisi testlerinde %100 doğruluk elde edilmiştir. Sonuçlar, özgün ağ yapısının ve gelişmiş ön işleme adımlarının erken klinik tanı için yüksek potansiyel sunduğunu göstermektedir (Shatnawi et al., 2025).

Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden akciğer kanserinin erken tanısı için görüntü analizi ile toplu öğrenmeyi birleştiren hibrit bir yaklaşım sunulan bir çalışmada, sınıf dengesizliği SMOTE ile giderilmiş, özellik çıkarımı VGG16 üzerinden yapılmış ve PCA (Temel Bileşenler Analizi) ile boyut indirgeme uygulanmıştır. Lojistik Regresyon, Gaussian Naive Bayes ve Random Forest'ın oylama temelli birleşimiyle %97,8 doğruluk ve %97 F1-skoru elde edilerek klinik karar destek performansının artırıldığı gösterilmiştir (Singh et al., 2024). Başka bir çalışmada, bilgisayarlı tomografi görüntülerinden akciğer kanserinin erken tanısı için iki aşamalı bir derin öğrenme sistemi sunulmuştur. İlk aşamada Unet++ ile 3D Transformer'ı birleştiren 3D-TD++-NLF modeliyle hassas segmentasyon yapılmış, özel bir kayıp fonksiyonu ile hata azaltılmıştır. İkinci aşamada MDDNet-ASPP ile sınıflandırma gerçekleştirilmiş ve Kaggle veri setinde %92,92 doğruluk elde edilerek geleneksel modellere kıyasla daha etkili bir klinik çözüm sağlandığı gösterilmiştir (Sridevi & RajivKannan, 2024).

Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden hem akciğer kanserini saptayan hem de sağkalım riskini öngören bütünleşik bir derin öğrenme yaklaşımı sunulan bir çalışmada 3D CNN tabanlı yapı, hacimsel akciğer özellikleri ile sağkalım arasındaki ilişkileri modellemiş; iki görevli öğrenme ve özgün mini-gruplandırılmış kayıp fonksiyonu ile tanı ve risk tahmini birlikte optimize edilmiştir. NLST (Ulusal Akciğer Tarama Denemesi) veri setinde elde edilen anlamlı AUC ve C-indeksi değerleri, tek bir BT taramasıyla klinik açıdan erişilebilir ve etkili bir öngörü sağlandığını göstermektedir (Wang et al., 2025). Bir diğer çalışmada, akciğer kanseri alt tiplerinin tespiti ve TNM evrelemesi için YOLOv8 ve ByteTrack'i birleştiren bütünleşik bir derin öğrenme yaklaşımı sunulmuştur. YOLO omurgasından elde edilen özellikler PCA ile sadeleştirilerek TNMClassifier'a (TNM Sınıflandırıcısına) aktarılmıştır. Lung PET-CT-DX ve Lung3 veri setlerinde elde edilen yüksek mAP, doğruluk ve duyarlılık değerleri ile sistemin hızlı ve genellenebilir bir klinik tanı çözümü sunduğu gösterilmiştir (Wehbe et al., 2024).

Derin öğrenmeyle akciğer kanseri analizine ilişkin olarak bu kısımda belirtilen literatür çalışmalarındaki bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve röntgen (X-ray) veriseti türlerini ve miktarlarını, tespit, sınıflandırma ve segmentasyon analiz türlerini ve sonuçlarını içeren özet aşağıdaki Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2. Derin Öğrenmeyle Akciğer Kanseri Analizleri

Kaynak	Veriseti, Analiz ve Sonuçlar
Crasta et al., 2024	BT (LUNA16), 888 vaka (1.186 nodül), Segmentasyon DSC: %99,34; Sınıflandırma Doğruluk: %99,2, Duyarlılık: %98,8
Diao et al., 2025	BT ve MRI, 76 hastadan 940 görüntü, Sınıflandırma Bi-LSTM Doğruluk: %99,89, AUC: 1.000; SVM Cubic Doğruluk: %99,78
Durgam et al., 2025	BT (Kaggle), 110 vakadan 1.190 görüntü, Segmentasyon ve Sınıflandırma, Doğruluk: %99,09, Kesinlik: %98,9, Duyarlılık: %98,85
Huang et al., 2025	BT (Lung-PET-CT-Dx), 20.381 görüntü, Tespit ve Sınıflandırma, YOLOv8 ile Kesinlik: %90,32, Duyarlılık: %84,91
Kalkan et al., 2024	BT (Kaggle), 3.296 görüntü, Sınıflandırma Doğruluk: %98,57 (InceptionResNetV2); Segmentasyon Jaccard: %95,86 (UNet)
Manneppalli et al., 2025	BT (Göğüs BT / Akciğer Kanseri), 1.000 + 1.190 görüntü, Sınıflandırma Doğruluk: %99,52 (Göğüs BT) ve %99,69 (Akciğer Kanseri)
Meeradevi et al., 2025	X-Ray (NIH), 8.000 görüntü, Sınıflandırma InceptionV3 Doğruluk: %97,05; en iyi Makine öğrenmesi modeli SVM (RBF)
Ozdemir et al., 2025	BT (Göğüs BT / Akciğer BT), 1.000 + 1.197 görüntü, Sınıflandırma Doğruluk: %99,54 (Akciğer BT) ve %98,41 (Göğüs BT)
Priya & Bharathi, 2025	BT (LUNA16), 888 orijinal (3.552 artırılmış) görüntü, Sınıflandırma Doğruluk: %99,15, Kesinlik: %99,51, Özgüllük: %99,80
Saha et al., 2024	BT (Kaggle Göğüs BT), 1.000 orijinal (1.653 artırılmış) görüntü, Sınıflandırma Doğruluk: %91, Kesinlik: %92, Duyarlılık: %91
Shatnawi et al., 2025	BT (Göğüs BT), 1.000 görüntü, Sınıflandırma Gelişmiş CNN ile Test Doğruluğu: %100; VGG16: %99
Singh et al., 2024	BT (Kaggle), Her sınıfta 140 görüntü, Tespit ve Sınıflandırma, Toplu (Ensemble) Doğruluk: %97,8, Kesinlik: %95, Özgüllük: %96
Sridevi & RajivKannan, 2024	BT (Göğüs BT), 1.190 görüntü, Segmentasyon ve Sınıflandırma, Doğruluk: %92,925, Kesinlik: %93, Duyarlılık: %93
Wang et al., 2025	BT (NLST), 1.882 hasta/görüntü, Sınıflandırma AUC: 0,6885; Sağkalım C-indeksi: 0,6036
Wehbe et al., 2024	BT (Lung-PET-CT-Dx / Lung3), 350 hasta + 89 hasta, Tespit ve Evreleme, mAP: %97,1; TNM Evreleme Doğruluğu: %98

4. SONUÇ

Akciğer kanseri hastalığının özellikle bilgisayarlı tomografi görüntüleri kullanılarak derin öğrenmeyle analizinin detaylı olarak gerçekleştirildiği bu derleme çalışmasında, öncelikle bu kanser türünün belirti ve nedenlerinden

bahsedilmiştir. Ardından ise, literatürde sıklıkla kullanılan verisetleri ile çok çeşitli derin öğrenme çalışmaları analiz edilmiştir. Verisetleri açısından akciğer kanseri analizine bakıldığında, özellikle LUNA16 verisetinin sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmiştir. Analiz türü açısından çalışmalar incelendiğinde ise, akciğer kanseri sınıflandırması çalışmalarının büyük ağırlıkta olduğu anlaşılmaktadır. Bazı çalışmalarda ise veriseti türü açısından BT, MRI ve X-ray görüntülerinin ikili gruplar halinde bir arada kullanıldığı gözlemlenmekle birlikte, özellikle özgünlük açısından hibrit derin öğrenme modellerinin daha çok ön plana çıktığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, hibrit derin öğrenme yaklaşımlarına ek olarak çeşitli makine öğrenmesi modelleri de bir arada kullanılarak birden fazla türde akciğer BT görüntüleri üzerinde daha detaylı ve özgün yeni çalışmalar gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Armato, S. G., 3rd, McLennan, G., Bidaut, L., McNitt-Gray, M. F., Meyer, C. R., Reeves, A. P., Zhao, B., Aberle, D. R., Henschke, C. I., Hoffman, E. A., Kazerooni, E. A., MacMahon, H., Van Beeke, E. J., Yankelevitz, D., Biancardi, A. M., Bland, P. H., Brown, M. S., Engelmann, R. M., Laderach, G. E., Max, D., ... Croft, B. Y. (2011). The Lung Image Database Consortium (LIDC) and Image Database Resource Initiative (IDRI): a completed reference database of lung nodules on CT scans. *Medical physics*, 38(2), 915–931. <https://doi.org/10.1118/1.3528204>
- Bakr, S., Gevaert, O., Echegaray, S., Ayers, K., Zhou, M., Shafiq, M., Zheng, H., Benson, J. A., Zhang, W., Leung, A. N. C., Kadoch, M., Hoang, C. D., Shrager, J., Quon, A., Rubin, D. L., Plevritis, S. K., & Napel, S. (2018). A radiogenomic dataset of non-small cell lung cancer. *Scientific data*, 5, 180202. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.202>
- Crasta, L. J., Neema, R., & Pais, A. R. (2024). A novel Deep Learning architecture for lung cancer detection and diagnosis from Computed Tomography image analysis. *Healthcare Analytics*, 5, 100316.
- Diao, S., Wan, Y., Huang, D., Huang, S., Sadiq, T., Khan, M. S., Hussain, L., Alkahtani, B. S. & Mazhar, T. (2025). Optimizing Bi-LSTM networks for improved lung cancer detection accuracy. *PloS one*, 20(2), e0316136.
- Durgam, R., Panduri, B., Balaji, V., Khadidos, A. O., Khadidos, A. O., & Selvarajan, S. (2025). Enhancing lung cancer detection through integrated deep learning and transformer models. *Scientific Reports*, 15(1), 15614.

- Huang, K. Y., Chung, C. L., & Xu, J. L. (2025). Deep learning object detection-based early detection of lung cancer. *Frontiers in Medicine*, 12, 1567119.
- Kalkan, M., Guzel, M. S., Ekinci, F., Akcapinar Sezer, E., & Asuroglu, T. (2024). Comparative analysis of deep learning methods on CT images for lung cancer specification. *Cancers*, 16(19), 3321.
- Mannepilli, D., Tak, T. K., Krishnan, S. B., & Sreenivas, V. (2025). GSC-DVIT: A vision transformer based deep learning model for lung cancer classification in CT images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 103, 107371.
- Mayo Clinic Staff. (2024, April 30). *Lung cancer—Symptoms and causes*. Mayo Clinic. <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/lung-cancer/symptoms-causes/syc-20374620>
- Meeradevi, T., Sasikala, S., Murali, L., Manikandan, N., & Ramaswamy, K. (2025). Lung cancer detection with machine learning classifiers with multi-attribute decision-making system and deep learning model. *Scientific Reports*, 15(1), 8565.
- Ozdemir, B., Aslan, E., & Pacal, I. (2025). Attention enhanced inceptionnext based hybrid deep learning model for lung cancer detection. *IEEE Access*.
- Priya, A., & Bharathi, P. S. (2025). SE-ResNeXt-50-CNN: A deep learning model for lung cancer classification. *Applied Soft Computing*, 171, 112696.
- Saha, A., Ganie, S. M., Pramanik, P. K. D., Yadav, R. K., Mallik, S., & Zhao, Z. (2024). VER-Net: a hybrid transfer learning model for lung cancer detection using CT scan images. *BMC medical imaging*, 24(1), 120.

- Setio, A. A. A., Traverso, A., De Bel, T., Berens, M. S., Van Den Bogaard, C., Cerello, P., ... & Jacobs, C. (2017). Validation, comparison, and combination of algorithms for automatic detection of pulmonary nodules in computed tomography images: the LUNA16 challenge. *Medical image analysis*, 42, 1-13.
- Shatnawi, M. Q., Abuein, Q., & Al-Quraan, R. (2025). Deep learning-based approach to diagnose lung cancer using CT-scan images. *Intelligence-Based Medicine*, 11, 100188.
- Singh, A., Dwivedi, R. K., & Rastogi, R. (2024). Machine Learning Based Framework for Lung Cancer Detection and Image Feature Extraction Using VGG16 with PCA on CT-Scan Images. *SN Computer Science*, 5(8), 1040.
- Shiraishi, J., Katsuragawa, S., Ikezoe, J., Matsumoto, T., Kobayashi, T., Komatsu, K. I., ... & Doi, K. (2000). Development of a digital image database for chest radiographs with and without a lung nodule: receiver operating characteristic analysis of radiologists' detection of pulmonary nodules. *American journal of roentgenology*, 174(1), 71-74.
- Sridevi, S., & RajivKannan, A. (2024). Development of 3DTDUnet++ with novel function and multi-scale dilated-based deep learning model for lung cancer diagnosis using CT images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 94, 106243.
- Wang, X., Sharpnack, J., & Lee, T. C. (2025). Improving lung cancer diagnosis and survival prediction with deep learning and CT imaging. *PLoS One*, 20(6), e0323174.
- Wehbe, A., Dellepiane, S., & Minetti, I. (2024). Enhanced lung cancer detection and TNM staging using YOLOv8 and

TNMClassifier: An integrated deep learning approach for CT imaging. *IEEE Access*.

TÜRKİYE VE DÜNYADA
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com