

ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Doç.Dr. Mehmet Eşref ALKIŞ

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Doç.Dr. Mehmet Eşref ALKIŞ

yaz
yayınları

2025

**Elektrik-Elektronik ve Haberleşme
Mühendisliği Değerlendirmeleri**

Editör: Doç.Dr. Mehmet Eşref ALKIŞ

© 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 978-625-5838-81-0

Ekim 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

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

**Lazer Ablasyon ile Nanoyapı Mühendisliği: Biyomedikal,
Çevresel ve Enerji Uygulamaları İçin Çok Yönlü Bir
Platform.....1**

*Muhammet Emin KALÇIK, Miraç Dilruba GEYİKOĞLU,
Muhammed Fatih ÇORAPSIZ*

**Modelling Energy-Efficient Illumination Systems Using
Modern Design Approaches27**

Serhat Berat EFE

**Yangın Algılama Teknolojilerinde Tarihsel Gelişim,
Mevcut Uygulamalar ve Gelecek Eğilimler46**

Cihat Çağdaş UYDUR

**Endüstriyel İşletmelerde Elektrikli Şarj İstasyonlarının
Etki Analizi: Şebeke, Ekonomi ve Optimizasyon
Perspektifleri.....63**

Cihat Çağdaş UYDUR

**Applications of Convolution Neural Networks in
Medicine: An Engineering Perspective81**

Hıdır Selçuk NOGAY

Fotovoltaik Enerji ve Hücre Modellemesi104

Evren İŞEN, Burçin ÖZKAYA

**An Improved Starfish Optimization Algorithm
Based on Dynamic Fitness-Distance Balance Method for
Global Optimization Problems120**

Burçin ÖZKAYA, Evren İŞEN

**A Simscape-Based Modeling Approach for the
Dynamic Behavior of a Pneumatic Actuator System.....140**

Batın DEMİRCAN, Tuğçe YAREN

**Güneş Panelleri İçin Gerçek Zamanlı Performans
Ölçümü Yapan Arduino Tabanlı Veri Toplama ve
Kayıt Sistemi.....161**

Ali YÜCE, Kadir DOĞANŞAHİN

**Doğanın Diliyle Rüzgarı Anlamak: Gramatik Evrim ve
Genetik Eşitlik Programlama184**

Şehmus FİDAN, Emre ERKAN

"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."

LAZER ABLASYON İLE NANOYAPI MÜHENDİSLİĞİ: BİYOMEDİKAL, ÇEVRESEL VE ENERJİ UYGULAMALARI İÇİN ÇOK YÖNLÜ BİR PLATFORM

Muhammet Emin KALÇIK¹

Miraç Dilruba GEYİKOĞLU²

Muhammed Fatih ÇORAPSIZ³

1. GİRİŞ

Son yıllarda nanoteknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, malzeme mühendisliği, biyomedikal uygulamalar, çevresel iyileştirme teknolojileri ve enerji sistemleri gibi çok sayıda disiplini derinden etkilemiştir. Bu alanlardaki ilerlemenin temel taşlarından biri, fonksiyonel ve yüksek saflıkta nanomalzemelerin kontrollü şekilde sentezlenmesidir. Bu bağlamda, sıvı ortamda darbeli lazer ablasyonu (PLAL- Pulsed Laser Ablation in Liquid), özellikle yüksek saflıkta, katkısız ve çevre dostu nanomalzeme üretimi için umut vadeden bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. PLAL hem metal hem de metal oksit nanoparçacıkların sentezinde kullanılabilmekte, ayrıca biyoyumlu, antimikrobiyal ve fotokatalitik özelliklere sahip nanoyapıların elde edilmesine olanak tanımaktadır.

¹ Öğr. Gör. Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, drkalcik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8601-1269.

² Doç. Dr. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, miracg@atauni.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0173-5477.

³ Doç. Dr. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, corapsiz@atauni.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2399-4741.

Lazer ablasyonu temelli bu teknik, yüksek enerjili kısa süreli lazer darbelerinin bir hedef malzeme üzerine odaklanmasıyla başlar ve hedef malzemenin yüzeyinden buharlaşma, iyonizasyon ve plazma oluşumu gibi süreçlerle nanoparçacıkların oluşmasını sağlar. PLAL'nin önemli avantajlarından biri, geleneksel kimyasal yöntemlerin aksine toksik reaktiflerin kullanılmaması ve ürün saflığının yüksek olmasıdır. Ayrıca, sentez koşullarının (lazer dalga boyu, darbeli enerji, odak uzaklığı, ortam tipi gibi) sistematik olarak kontrol edilebilmesi, farklı büyüklük ve morfolojide parçacıklar elde edilmesine olanak tanır.

Bu derleme, PLAL yöntemiyle üretilmiş nanomalzemelerin çeşitli mühendislik alanlarındaki uygulama potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. İncelenen literatür, farklı lazer parametreleri ile sentezlenmiş palladyum (Pd), bakır oksit (CuO), nikel oksit (NiO), demir (Fe), titanyum dioksit (TiO₂) ve karbon nanotüp (CNT) gibi nanoyapıların biyomedikal, çevresel ve enerjiye dayalı sistemlerdeki etkinliğine odaklanmaktadır. Özellikle antibakteriyel etkinlik, kanser hücresi inhibisyonu, fotokatalitik boya bozunumu, gaz algılama ve manyetik hipertermi gibi çeşitli işlevsel alanlarda lazerle üretilmiş nanoparçacıkların sunduğu avantajlar dikkat çekicidir.

Biyomedikal alanda, PLAL yöntemiyle sentezlenen nanoparçacıkların Gram pozitif (*Staphylococcus aureus*) ve Gram negatif (*Escherichia coli*) bakterilere karşı güçlü antimikrobiyal etkiler gösterdiği bildirilmiştir. Bazı çalışmalar, bu nanoparçacıkların kanser hücrelerine karşı sitotoksik etkiler sergileyebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, lazer ablasyonun çocuk hastalarda tümör ablasyonu ve benign tiroid nodüllerinin tedavisi gibi klinik uygulamalara da entegre edilmeye başlandığı gözlenmektedir.

Çevre mühendisliğinde ise NiO ve TiO₂ gibi metal oksit temelli yapılar, metilen mavisi ve metil oranj gibi kirleticilerin fotokatalitik bozunmasında etkili olmuş; karbon nanotüplerle desteklenen bu yapılar hem yüzey alanı hem de adsorpsiyon kapasitesi sayesinde yüksek verim sunmuştur. Benzer şekilde, CuO ve Cu-Fe/Cu-Ni gibi bimetalik yapılar da su arıtımı ve biyolojik kontaminantların giderimi gibi uygulamalarda umut verici sonuçlar göstermiştir.

Enerji sistemlerinde ise PLAL ile sentezlenen nanoyapılar, elektrokataliz, fotovoltaiik sistemler ve elektrokimyasal hücrelerde katalizör olarak kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Örneğin, lazerle üretilmiş Co-Fe temelli çift hidroksit yapılar, düşük aşırı potansiyel değerleriyle su ayrıştırma reaksiyonlarında yüksek verimlilik sergilemektedir.

Bu bağlamda, bu çalışmada yer verilen çalışmalar; PLAL yönteminin temel prensiplerini, kullanılan lazer sistemlerini, sentezlenen nanoyapıların özelliklerini ve bunların farklı alanlardaki fonksiyonel uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bu giriş bölümünün ardından, derlemede sırasıyla yöntemin teknik temelleri, biyomedikal uygulamalar, çevre teknolojileri, enerji sistemleri ve diğer mühendislik alanlarındaki kullanım örnekleri ayrıntılı olarak değerlendirilecektir.

2. LAZER ABLASYON YÖNTEMİNİN TEMELLERİ

2.1. Sıvı Ortamda Darbeli Lazer Ablasyonu

Sıvı ortamda darbeli lazer ablasyonu, malzeme işleme ve biyomedikal uygulamalar dahil olmak üzere çeşitli alanlarda önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu ablasyon tekniği, lazer ışınlarının sıvı ortamda belirli materyallere uygulanması yoluyla bu materyallerin buharlaşma veya parçalanma işlemi

gerçekleştirmesi esnasında ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal süreçleri kapsamaktadır (Al Baroot et al., 2022).

Darbeli lazer ablasyonu, nanokompozitlerin sentezinde oldukça etkili bir yöntemdir. Örneğin, Baroot ve diğerleri, ZnO/CuO nanokompozitlerinin sıvı ortamda lazer ablasyonu ile elde edildiği bir çalışmada, bu kompozitlerin antibakteriyel aktivitesinin artırıldığını göstermiştir (Al Baroot et al., 2022). Benzer şekilde, Manda et al., TiO₂/Y₂O₃ nanokompozitlerinin nanosecond pulsed lazer ablasyon tekniği ile yüksek verimlilikte UV-görünür absorpsiyon gösterdiğini ve bu tür materyallerin çeşitli pratik uygulamalarda kullanılabileceğini vurgulamaktadır (Manda et al., 2022). Ayrıca, Elsayed ve diğerleri, lazer ablasyon kullanarak hazırlanan TiO₂/Au nanokompozitlerinin kanser hücreleri üzerindeki araştırmış ve önemli antikanser aktivitesine sahip olduğunu göstermiştir (Khaled A. Elsayed et al., 2022). Bu çalışmalar, sıvı ortamda lazer ablasyonunun yalnızca yeni malzemelerin sentezi için değil, aynı zamanda tıbbi uygulamalar için de umut verici olduğuna işaret etmektedir.

Sıvı ortamda gerçekleştirilen lazer ablasyon, aynı zamanda farklı nanoparçacıkların özelliklerini de değiştirme potansiyeline sahiptir. Örneğin, Naik ve diğerleri, pulsed lazer ablasyon tekniği ile elde edilen CoFe katmanlı çift katyonlu hidroksit nanosheetlerinin elektrokimyasal su ayırma süreçlerindeki verimliliğini incelemiş ve yapısal değişikliklerin bu verimliliği artırdığını kaydetmiştir (Shankar Naik et al., 2023). Bu tür çalışmalar, lazer ablasyon teknolojisinin temel kimyasal süreçlerdeki rolünü ve malzeme mühendisliğindeki önemini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Lazer ablasyonun biyomedikal alandaki uygulamaları önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Manda ve Sulaiman'ın çalışmaları, sıvı ortamda gerçekleştirilen lazer ablasyonun, nanoparçacıkların biyomedikal kullanımlarındaki

etkinliğini artırabileceğini ortaya koymaktadır (Tijani, Dandekar, Karve, Banga, & Puri, 2023). Bu yaklaşım, yalnızca malzeme özelliklerini şekillendirme yeteneğiyle değil, aynı zamanda tıbbi tedavi stratejileri üzerindeki etkileriyle de dikkat çekmektedir.

Sıvı ortamda darbeli lazer ablasyonu, malzeme bilimi ve biyomedikal mühendisliğinde geniş bir uygulama alanı sunmakta; bu yöntemle elde edilen nanomalzemeler, sağlık teknolojilerinde yeni kullanım alanlarının kapılarını aralamaktadır. Mevcut literatür, bu teknolojinin bilimsel ve pratik boyutlarının daha kapsamlı şekilde araştırılması gerektiğini açıkça göstermektedir.

2.2. Kullanılan Lazer Türleri ve Parametreler

Lazer ablasyonu, özellikle nanoteknoloji uygulamaları için önemli bir yöntemdir. Bu yöntemin çeşitleri ve parametreleri, elde edilen ürünlerin özelliklerini doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Lazerin türü ve parametreleri, genellikle hedef malzeme özellikleri, ablasyon hızı ve nanoyapıların kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Ablasyon sırasında, lazerin dalga boyu, atım süresi, enerji yoğunluğu ve tekrarlama hızı, çıkarılan malzeme miktarını ve nanoparçacıkların boyutunu etkiler. Titanyum dioksit (TiO_2) ve nadir toprak elementleri içeren itrium oksit (Y_2O_3) nanokompozitlerinin nanosaniyelik lazer ablasyon tekniği ile hazırlanmasında UV-görünür absorpsiyon verimliliği artırılmıştır (Manda et al., 2022). Ayrıca, sürekli lazer ablasyon kullanılarak CuO nanoparçacıkları sentezlenmiş ve bu parçacıkların antibakteriyel aktiviteleri araştırılmıştır (Khalaf Ajaj, Abdullah M. Ali, & Al-Jubbori, 2024).

Farklı lazer türlerinin kullanılması, nano yapıları malzemelerin özelliklerinde değişikliklere yol açar. Örneğin, Nd:YAG lazeri, yüksek güçlü lazerler arasında yer almakta olup, bu tür lazerlerle elde edilen metal oksit nanoparçacıkları

genellikle daha iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler (Ali et al., 2023). Bu bağlamda, ablasyon parametreleri (enerji yoğunluğu, süre ve dalga boyu) optimize edilerek, istenen kalite ve performans hedeflenmektedir (Salman, Khashan, & Hadi, 2023).

Lazer ablasyonu ile üretilen materyallerin uygulama alanları geniş bir yelpazeye sahiptir. Örneğin, bimetalik nanoparçacıklar (ZnO-Ag) kanser tedavisinde kullanılabilirken, diğer nanoparçacıklar antibakteriyel uygulamalarda başarılı sonuçlar vermektedir (K. A. Elsayed et al., 2022). Lazer ablasyon tekniğinin faydalı yönleri, yalnızca malzeme kültürü ile sınırlı kalmaz; çevresel etkilere karşı duyarlılık ve biyouyum gibi önemli özellikleri de göz önünde bulundurur (Al Baroot et al., 2022).

Özetlemek gerekirse, lazer ablasyon teknikleri ve kullanılan lazer türleri, ortaya çıkan malzemelerin kalitesi ile fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde derin bir iz bırakmaktadır. Nanoteknolojik üretim süreçlerinde, lazerin türü, ablasyon süreleri ve güç ayarları nihai ürün kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, lazer parametrelerinin dikkatle belirlenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir.

2.3. Nanoparçacık Oluşum Mekanizması

Nanoparçacık oluşum mekanizması, nanomateriallerin sentezinde kritik öneme sahiptir. Bu süreç, farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen fiziksel ve kimyasal reaksiyonları içerir. Özellikle lazer ablasyonu, nanoparçacıkların sentezinde hızla popüler hale gelen bir tekniktir. Lazer ablasyonu, maddelerin yüksek enerjili lazer ışınları ile buharlaştırılıp, ardından soğutulup yoğunlaşarak nanoparçacıkların olduğu bir yöntemdir. Bu metod en iyi şekilde, katı bir hedef malzeme (genellikle metal veya metal oksit) su veya başka bir sıvı ortam

içerisinde büyük bir lazer ile ardışık olarak vurulduğunda çalışır (Al Baroot et al., 2022; Shankar Naik et al., 2023).

Lazer ablasyonunun avantajlarından biri, yüksek saflıktaki nanoparçacıkların ve düşük kirlenme seviyelerinin elde edilmesine olanak sağlamasıdır. Örneğin, ZnO/CuO nanokompozitleri lazer ablasyonu ile sentezlenirken, bu süreç boyunca su ortamı, parçacıkların bir araya gelmesini ve stabilizasyonunu destekleyerek, homojen bir nanoparçacık yapısı oluşturur (Al Baroot et al., 2022). Ek olarak, TiO₂/Y₂O₃ nanokompozitleri benzer bir yöntemle yüksek UV-görünür absorpsiyon yeteneği ile başarılı bir şekilde sentezlenmiştir; bu durum, sentez sürecinin mekanizmasını anlamada önemlidir (Manda et al., 2022).

Ablasyon sırasında oluşan nanoparçacıkların özellikleri ve etkileşimleri, materyalin yapısına, ablayıcı lazerin gücüne ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir. Örneğin, CoFe katyonlu katmanlı çift hidroksit nanosheet'leri, lazer ablasyonu tekniğiyle elde edilmiştir ve bu süreç içinde katmanlar arası CO₂ varlığı yapının stabilize olmasına katkı sağlamıştır, böylece aktif alanların daha homojen bir şekilde dağılımını mümkün kılmıştır (Shankar Naik et al., 2023). Ayrıca, TiO₂/Au nanokompozitleri, kanser hücrelerine karşı önemli bir antibakteriyel aktivite göstermiştir (Khaled A. Elsayed et al., 2022).

Buna ek olarak, lazer ablasyon tekniği ile üretilen nanoparçacıkların boyutu, morfolojisi ve antibakteriyel etkinlikleri gibi özellikler, lazerin yoğunluğu ve kullanılan malzemelerin türü ile ilişkilidir. Çalışmalar, paladyum nanoparçacıklarının lazer ablasyonu ile üretilmesi sürecinde, elde edilen parçacıkların boyutlarının ve şekillerinin, lazerin fluencesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir (Salman et al., 2023). Hatta, CuO nanopartiküllerinin karakterizasyon

çalışmaları, bu parçacıkların antibakteriyel özelliklerini etkileyen önemli bilgiler sunmaktadır (Khalaf Ajaj et al., 2024).

Sonuç olarak, nanoparçacık oluşum mekanizması, lazer ablasyonu gibi modern sentez yöntemleri ile zenginleşmektedir. Ayrıntılı analizler ve karakterizasyon teknikleri ile desteklenen bu süreçler, gelecekteki malzeme bilimi araştırmalarında önemli roller oynamaktadır. Geliştirilen nanomateriyaller, yalnızca bilimsel araştırmalarda değil, aynı zamanda uygulamalı alanlarda da geniş bir yelpazede kullanılabilecektir.

2.4. Karakterizasyon Teknikleri

Karakterizasyon teknikleri, malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan kritik yöntemlerdir. Bu teknikler, nanomateriyaller, kompozitler ve diğer gelişmiş malzemelerin özelliklerini anlamak ve optimize etmek için temel bir rol oynamaktadır. Özellikle lazer ablasyonu gibi modern sentez yöntemleri ile üretilen nanomateriyallerin karakterizasyonu, bu malzemelerin uygulama alanlarını genişletmektedir.

Lazer ablasyon yöntemleri, nanomateriyallerin sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, ZnO/CuO nanokompozitleri, lazer ablasyon yöntemi ile başarıyla sentezlenmiş ve antibakteriyel aktiviteleri değerlendirilmiştir (Al Baroot et al., 2022). Ayrıca, TiO₂/Y₂O₃ nanokompozitleri, nanosaniye darbeli lazer ablasyonu tekniği kullanılarak hazırlanmış ve UV-görünür absorpsiyon verimlilikleri yüksek bulunmuştur (Manda et al., 2022). Bu tür karakterizasyonlar, nanomateriyallerin potansiyel uygulamalarını belirlemede önemlidir.

Nanopartiküllerin morfolojik ve yapısal özellikleri de karakterizasyon teknikleri ile incelenmektedir. Örneğin, TEM (Transmisyon Elektron Mikroskobu) görüntüleri, paladyum nanopartiküllerinin biçimini ve boyut dağılımını belirlemede

kullanılmaktadır (Salman et al., 2023). Bu tür görüntülemeler, nanopartiküllerin biyomedikal ve antibakteriyel uygulamalarındaki etkinliğini anlamak için kritik öneme sahiptir. Özellikle CuO nanopartiküllerinin karakterizasyonu, bunların antimikrobiyal aktivite üzerindeki etkilerini ortaya koymak için detaylı bir şekilde yapılmıştır (Khalaf Ajaj et al., 2024).

Ayrıca, lazer ablasyonu ile üretilen bimetalik nanopartiküllerin karakterizasyonu, çeşitli uygulama alanları için önemli bilgiler sağlamaktadır. Örneğin, ZnO-Ag bimetalik nanopartiküllerin sentezi ve bunların kanser hücreleri üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemelerin sağlık alanındaki potansiyelini vurgulamaktadır (K. A. Elsayed et al., 2022). Bu nanopartiküller, karakterizasyon sürecinden elde edilen verilerle etkinliklerini artırmak için optimize edilebilir.

3. NANOMALZEME TÜRLERİ VE YAPISAL ÖZELLİKLER

PLAL çeşitli kompozisyon ve morfolojide nanomalzemelerin sentezlenmesine olanak tanıyan, katkı maddesi içermeyen ve çevre dostu bir yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen nanoyapılar, özellikle metalik, metal oksit, bimetalik ve hibrit yapı formlarında geniş bir çeşitlilik göstermektedir.

Paladyum nanoparçacıkları (Pd NPs), PLAL tekniğiyle damıtılmış su ortamında sentezlenmiş ve FT-IR, XRD, TEM ve UV-vis analizleriyle karakterize edilmiştir. Elde edilen nanoparçacıkların küresel şekilli ve birkaç nanometreden onlarca nanometreye kadar değişen boyutlara sahip olduğu gösterilmiştir. XRD analizi ile Pd NPs'nin yüzey merkezli kübik yapıda kristallenme gösterdiği doğrulanmıştır. Özellikle 10.2 J/cm^2 lazer yoğunluğunda sentezlenen parçacıklar, daha yüksek antibakteriyel etkinlik sunmuştur (Salman et al., 2023).

Bakır oksit (CuO) nanoparçacıkları da PLAL yöntemiyle çift damıtılmış suda, 200 mJ ve 400 mJ enerji seviyelerinde sentezlenmiş; XRD, TEM ve UV-vis teknikleriyle incelenmiştir. Elde edilen nanoparçacıkların ortalama boyutları sırasıyla 46 nm ve 52 nm olarak ölçülmüş, küresel morfolojide ve monoklinik kristal yapıda oldukları saptanmıştır. 200 mJ enerjide sentezlenen CuO nanoparçacıkları hem Gram pozitif hem de Gram negatif bakterilere karşı daha etkili bulunmuştur (Khalaf Ajaj et al., 2024).

Bimetalik nanoparçacıklar arasında Cu–Ni ve Cu–Fe yapıları dikkat çekmektedir. Bu nanoyapılar, lazerle ablasyon ile önceden hazırlanmış alaşımlardan elde edilmiş ve TEM, XRD, DLS ve VSM analizleriyle detaylı biçimde incelenmiştir. Cu–Ni nanoparçacıklar ortalama 20 nm, Cu–Fe nanoparçacıklar ise 34 nm boyutundadır. Her iki yapı da antibakteriyel etkinlik göstermiştir; ancak Cu–Ni daha güçlü aktivite sergilemiştir. Ayrıca Cu–Fe nanoparçacıkları, manyetik hipertermi uygulamalarında daha yüksek özgül ısı emme kapasitesi göstermiştir (Ali et al., 2023).

NiO nanoparçacıklarının fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) üzerine PLAL yöntemiyle kaplanmasıyla elde edilen NiO–MWCNT kompozitleri de yapısal olarak dikkat çekicidir. XRD, SEM ve Raman analizleri, bu yapıların hem kristal yapılarını hem de karbon destekle güçlü etkileşimlerini ortaya koymuştur. Kompozit yapı, özellikle organik boya bozunum reaksiyonlarında yüksek verimlilik göstermiştir (Mostafa, Mwafy, & Toghan, 2021).

TiO₂ ve türevleri de PLAL ile sentezlenen önemli malzemeler arasındadır. Elektrospraying ve lazer ablasyon tekniklerinin birleştirilmesiyle elde edilen Au katkılı TiO₂ nanoliflerin, geniş yüzey alanı ve yüksek ışık absorpsiyon kabiliyeti sayesinde sensör ve fotokataliz uygulamalarında

kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu yapılar özellikle görünür ışık aralığında gösterdikleri fotokatalitik etkinlikle ön plana çıkmaktadır (Mostafa et al., 2021).

Sonuç olarak, PLAL yöntemiyle sentezlenen nanomalzemeler, yüksek saflık, kontrollü morfoloji ve üstün yüzey özellikleri ile dikkat çekmektedir. Morfolojik ve kristal yapının lazer parametrelerine doğrudan bağlı olduğu bu yöntemde, doğru kontrol ile uygulamaya özel tasarımlar mümkün hale gelmektedir.

4. BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR

4.1. Antibakteriyel Etki

PLAL ile sentezlenen metal ve metal oksit nanoparçacıkların en dikkat çeken biyomedikal uygulamalarından biri antibakteriyel etkidir. Yöntem sayesinde sentezlenen parçacıklar, kimyasal reaktif içermediği için yüksek biyouyumluluğa sahip olup mikroorganizmalara karşı doğrudan kullanılabilmektedir.

Özellikle bakır oksit (CuO) nanoparçacıkları, hem Gram negatif (*Escherichia coli*) hem de Gram pozitif (*Staphylococcus aureus*) bakterilere karşı anlamlı antibakteriyel aktivite göstermiştir. CuO nanoparçacıkları çift damıtılmış su içerisinde, 200 mJ ve 400 mJ gibi farklı lazer enerjilerinde sentezlenmiş; daha düşük enerji düzeyinde (200 mJ) üretilen parçacıkların daha güçlü bakteriyel inhibisyon sağladığı gözlemlenmiştir (Khalaf Ajaj et al., 2024).

Paladyum nanoparçacıkları da antibakteriyel potansiyeli yüksek materyaller arasında yer almaktadır. PLAL yöntemiyle elde edilen Pd NPs'ler, lazer fluencesi ile büyüklük ve yüzey reaktivitesi açısından optimize edilmiş, yapılan testlerde *E. coli* ve *S. aureus* bakterilerine karşı etkili olmuştur (Salman et al.,

2023). Aynı şekilde Cu–Ni ve Cu–Fe gibi bimetalik yapılar da güçlü bakteriyel inhibisyon kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Cu–Ni parçacıkları daha geniş spektrumlu etki gösterirken, Cu–Fe yapılar ise manyetik hipertermi ile kombineli kullanılabilecek antibakteriyel ajanlar arasında yer almaktadır (Ali et al., 2023).

Lazerle modifiye edilmiş NiO nanoparçacıkları da antibakteriyel aktivitede incelenmiştir. Özellikle yüzey fonksiyonelleştirmesi yapılan NiO nanoparçacıklarında lazer fluencesi arttıkça antimikrobiyal etkinin de optimize edildiği bildirilmiştir. Bu etkinin iyon salınımı ve yüzeyde oluşan reaktif oksijen türlerinin etkisiyle gerçekleştiği düşünülmektedir (Mostafa et al., 2021).

Antibakteriyel etkinin temelinde yatan mekanizmalar arasında hücre zarının yapısal bozulması, metal iyonlarının salımı, reaktif oksijen türlerinin üretimi ve protein/DNA denatürasyonu yer almaktadır. Bu süreçler nanoparçacığın boyutu, yüzey yükü ve kristal yapısı gibi özelliklerinden etkilenmektedir. Lazer parametreleri bu özellikleri doğrudan etkileyebildiği için PLAL yöntemi, biyouyumlu ve kontrollü antibakteriyel ajan üretiminde güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

4.2. Antikanser ve Sitotoksik Etkiler

PLAL yöntemiyle sentezlenen metal ve metal oksit nanoparçacıklar, yalnızca antibakteriyel değil, aynı zamanda antikanser özellikleri açısından da dikkat çekmektedir. Bu tür nanoparçacıklar, özellikle sitotoksikite mekanizmalarıyla kanser hücrelerinde hücre ölümünü indükleyerek biyomedikal uygulamalarda potansiyel taşıyan ajanlar olarak değerlendirilmektedir.

Au katkılı TiO₂ nanoparçacıkları ile yürütülen bir çalışmada, bu yapının kanser hücrelerinde ışık uyarımı altında sitotoksik etkiyi önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Lazer

ablatif yöntemle üretilen bu yapıların, meme (MCF-7) ve servikal (HeLa) kanser hücreleri üzerinde yaklaşık %40 oranında hayatta kalma oranını azalttığı bildirilmiştir (Iqbal et al., 2021). Bu durum, yüzey plazmon rezonansı etkisiyle fototerml etkinin artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Benzer şekilde, ZnO–Ag bimetalik nanoparçacıklar da antikanser aktivite göstermiştir. Bu nanoparçacıkların kolon kanseri (HT-29) ve HeLa hücre hatları üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve konsantrasyon bağımlı bir sitotoksik etki gözlemlenmiştir. Lazer ablasyonu ile sentezlenen parçacıkların hücre zarına zarar vererek apoptoz sürecini başlattığı düşünülmektedir (K. A. Elsayed et al., 2022).

Sitotoksik etkinin altında yatan temel mekanizmalar arasında hücre zarının geçirgenliğinde artış, mitokondriyal disfonksiyon, ROS (reaktif oksijen türleri) üretimi, DNA hasarı ve kaspaz aracılı apoptoz süreçleri yer almaktadır. Bu mekanizmalar genellikle nanoparçacıkların boyutu, yüzey alanı, iyon salınım kapasitesi ve lazer parametrelerine duyarlılığı ile ilişkilidir.

Özellikle yüzeyi fonksiyonelleştirilmiş veya ışığa duyarlı hale getirilmiş nanoparçacıklar, hedeflenmiş tedavi uygulamalarında daha seçici etki sağlayabilmekte, sağlıklı hücreler üzerinde daha az toksisite yaratmaktadır. Bu bağlamda, PLAL yöntemi, kontrollü boyut ve saflıkta nanoparçacık üretimi sayesinde biyoyumlu antikanser ajan tasarımında önemli bir yer tutmaktadır.

4.3. Manyetik Hipertermi ve Hedeflenmiş Tedavi

Lazer ablasyon yöntemiyle sentezlenen manyetik nanoparçacıklar, hedeflenmiş kanser tedavilerinde özellikle manyetik hipertermi uygulamaları açısından dikkat çeken materyallerdir. Manyetik hipertermi, alternatif manyetik alan altında manyetik özellikli nanoparçacıkların ısı üretme prensibine

dayanır ve bu sayede tümör dokularında lokal sıcaklık artışı sağlanarak kanser hücrelerinin kontrollü şekilde tahrip edilmesi amaçlanır. Bu teknik, çevre sağlıklı dokulara minimum zarar verme avantajı sunar.

Cu-Ni ve Cu-Fe bimetallik nanoparçacıklar, PLAL yöntemiyle sentezlenerek manyetik hipertermi uygulamaları için uygun yapılar olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, Cu-Ni parçacıkları 5.04 ve 2.18 W/g özgül ısı emme kapasitesi sergilerken, Cu-Fe parçacıkları 9.74 ve 7.39 W/g değerlerine ulaşmıştır. Bu veriler, Cu-Fe yapılarının daha yüksek manyetik ısı üretimi potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Ali et al., 2023). Parçacıkların morfolojik ve yapısal özellikleri, XRD, TEM ve VSM gibi tekniklerle detaylı olarak analiz edilmiştir.

Manyetik hipertermi sürecinde ortaya çıkan ısı etkiler, özellikle parçacıkların Neél ve Brownian gevşeme mekanizmaları yoluyla enerjiyi ısıya dönüştürmesine bağlıdır. Bu özellikler, partikül büyüklüğü, yüzey modifikasyonu ve uygulanan alanın frekansına duyarlıdır. Lazer parametrelerinin hassas kontrol edilebilirliği sayesinde PLAL yöntemi, bu tür manyetik nanoparçacıkların biyomedikal amaçlar doğrultusunda uygun biçimde tasarlanmasına olanak tanımaktadır.

Cu-Ni nanoparçacıkları, özellikle ayarlanabilir Curie sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle istenen sıcaklık aralığında stabilize edilebilen yapılar sunar. Böylece aşırı ısınma riski ortadan kaldırılarak güvenli bir hipertermi tedavisi uygulanabilir. Bu tür nanoparçacıklar ayrıca manyetik yönlendirme yoluyla ilaç taşıma gibi çok işlevli uygulamalara da entegre edilebilmektedir. Bu özellikleriyle hem ısı ablasyon hem de lokalize tedavi stratejileri için ideal bir platform oluşturmaktadır.

4.4. Klinik ve Radyolojik Uygulamalar

Klinik ve radyolojik uygulamalarda lazer ablasyon ve türev teknikler, son yıllarda minimal invaziv tedavi seçenekleri arasında giderek daha fazla tercih edilen yöntemler haline gelmiştir. Özellikle benign tiroid nodüllerinin tedavisinde, lazer ablasyon, radyofrekans ablasyon (RFA) ve mikrodalga ablasyon (MWA) gibi termal ablasyon yöntemleri, cerrahiye alternatif olarak etkinlik ve güvenlik açısından güçlü verilerle desteklenmektedir.

Endokrinoloji pratiğinde yapılan çok merkezli ve retrospektif çalışmalarda, RFA ve MWA uygulanan hastalarda bir ay sonunda nodül hacminde sırasıyla ortalama %63,4 ve %65,7 oranlarında anlamlı azalma gözlenmiştir. Her iki yöntemde de semptom ve kozmetik skorlarında istatistiksel olarak anlamlı iyileşmeler sağlanmıştır (Sonmez et al., 2023). Bu uygulamalarda komplikasyon oranı düşüktür ve genellikle geçici ses değişikliği ya da hematoma gibi hafif yan etkilerle sınırlıdır.

Tiroid nodüllerinin dışında, pediatrik onkoloji gibi özel alanlarda da lazer ve mikrodalga ablasyon teknikleri uygulanmaktadır. Özellikle yüksek yoğunluklu odaklanmış ultrason (HIFU), kriyoablasyon ve elektrokemoterapi gibi görüntüleme eşliğinde yönlendirilen enerji temelli yöntemler, cerrahiye uygun olmayan veya cerrahiye tolere edemeyen hastalarda umut verici sonuçlar vermektedir. Bu teknikler, hedeflenen tümör dokusunu doğrudan ısıtma, dondurma veya elektriksel geçirgenliği artırma yoluyla hücre ölümünü sağlamaktadır (Liu et al., 2015; Tomasian, Cazzato, Sharma, Gangi, & Jennings, 2022).

Görüntüleme tabanlı yönlendirme, özellikle ultrasonografi (USG), bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi yöntemlerle yapılmakta ve ablatif işlemlerin hassasiyetini artırmaktadır. Örneğin, USG

eşliğinde yapılan MWA prosedürleri, çevre nörovasküler yapılara zarar vermeden homojen ısı dağılımı sağlamakta, tedavinin etkinliğini artırmaktadır.

Ayrıca, lazer ablasyonu sadece yapısal hastalıkların değil, bazı işlevsel endokrin bozuklukların tedavisinde de kullanılmaktadır. Nodül kaynaklı hipertiroidi vakalarında lazer ablasyonu, lokal ısı etkisiyle nodül fonksiyonunu baskılayarak tiroidektomiye gerek kalmadan normal tiroit fonksiyonlarını yeniden sağlayabilmektedir (Papini, Monpeyssen, Frasoldati, & Hegedüs, 2020).

Bu uygulamalar, klasik cerrahinin aksine daha az hastane süresi, lokal anestezi altında uygulanabilme, daha az komplikasyon riski ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir. Özellikle ileri yaş, komorbidite veya cerrahi risk taşıyan hasta gruplarında ilk tercih olarak öne çıkmaktadır.

5. ÇEVRESEL UYGULAMALAR

Günümüzde çevresel kirleticilerin etkin bir şekilde giderilmesi, gelişen nanoteknolojik yaklaşımlar sayesinde daha sürdürülebilir ve yüksek verimli hale gelmektedir. Bu bağlamda PLAL ile sentezlenen nanomalzemeler; boyar madde bozunumu, su arıtımı ve gaz sensör uygulamaları gibi kritik alanlarda dikkat çekici performans göstermektedir.

Organik boyalar, özellikle tekstil ve ilaç endüstrilerinden kaynaklanan atık suların önemli kirleticilerindendir. Geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşmak amacıyla PLAL tekniğiyle elde edilen NiO–MWCNT nanokompozitleri, metilen mavisi (MB) gibi boyaların fotokatalitik olarak giderilmesinde yüksek verim sunmuştur. Örneğin, sadece 10 dakika içinde %70,22 oranında boya bozunumu sağlanmıştır (Altowyan et al., 2022).

Ek olarak, ZnO/NiO/CNT ve Cr₂O₃/NiO-CNT gibi ikili ya da üçlü oksit yapılar da metil oranj (MO) ve Bismarck kahverengisi gibi toksik boyaların bozunmasında %90'a varan başarı göstermektedir (Alkallas et al., 2022). Bu yapılar, lazer parametrelerinin ayarlanmasıyla ışık absorpsiyon aralıkları genişletilerek UV ve görünür ışık altında yüksek fotokatalitik aktiviteye ulaşmaktadır.

PLAL ile sentezlenen nanoyapılar yalnızca fotokatalitik değil, aynı zamanda adsorptif özellikleriyle de su arıtımına katkı sunmaktadır. NiO nanoparçacıkları, karbon nanotüpler ile fonksiyonelleştirilerek yüksek yüzey alanına sahip, kimyasal katkı maddesi içermeyen ve yeniden kullanılabilir nanokompozitler haline getirilmiştir. Bu yapıların Raman, FT-IR ve XPS analizleri ile yapısal bütünlüğü ve yüzey fonksiyonelleştirmesi doğrulanmıştır (Altowyan et al., 2022).

TiO₂/Y₂O₃ nanokompozitleri de dikkat çeken bir diğer yapıdır. Lazer ablasyonu ile sentezlenen bu kompozitler, UV ve görünür ışık spektrumunda geniş absorpsiyon özelliği sergileyerek su ayırma ve güneş enerjisiyle aktifleşen fotokataliz uygulamalarında kullanılmaktadır (Manda et al., 2022).

PLAL tekniğiyle elde edilen Au:CdO nanoyapıları, gaz sensör teknolojisinde oldukça etkili olmuştur. Özellikle 800 mJ lazer enerjisi ile sentezlenen Au:CdO/PS yapı, 30 °C gibi düşük sıcaklıklarda H₂S için %93,5 ve NO₂ için %67,8'lik yüksek hassasiyet göstermiştir (Sulaiman, Nayef, & Ah Mutlak, 2022). Bu duyarlılığın kaynağı, partikül yüzeyinin gözenekliliği, artan oksijen absorpsiyonu ve yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilmiştir.

Gaz sensörlerinin tepkime süresi ve iyileşme süresi gibi parametreleri de PLAL ile optimize edilmiştir. Au:CdO/PS sensörleri, NO₂ ve H₂S gazlarına karşı saniyeler içinde cevap verebilmekte ve hızlı iyileşme sağlayarak tekrar kullanılabilirlik açısından da avantaj sunmaktadır (Sulaiman et al., 2022).

6. ENERJİ UYGULAMALARI

Enerji dönüşüm ve depolama teknolojilerinde nanomalzemelerin rolü, artan enerji talebi ve sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda kritik önem kazanmıştır. Bu bağlamda PLAL yöntemiyle üretilen nanoyapılar, saflık, yüzey reaktivitesi ve morfolojik kontrol gibi özellikleri sayesinde elektrokataliz, fotoelektrokimyasal hücreler ve enerji depolama sistemlerinde çığır açan uygulamalara sahiptir.

Su elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi, temiz enerji döngüsünün temel adımlarından biridir. PLAL ile sentezlenen CoFe tabanlı katmanlı çiftli hidroksit (LDH) nanosheetleri hem oksijen (OER) hem de hidrojen gelişim reaksiyonları (HER) için yüksek verimlilik sergilemiştir (Shankar Naik et al., 2023).

PLAL yöntemiyle üretilen bu yapılar, yüzeydeki aktif bölgelerin fazlalığı, yüksek elektrokimyasal yüzey alanı ve düşük iç direnç gibi özellikleriyle üstün performans sergilemektedir. Ayrıca, geleneksel ıslak kimya yöntemlerine kıyasla daha hızlı, daha saf ve katkı maddesi içermeyen yapılar oluşturulmasına olanak tanır.

PLAL ile sentezlenen $\text{TiO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ nanokompozitleri, geniş bant aralığı ve UV-görünür bölgeye kadar yayılan absorpsiyon özellikleri sayesinde güneş enerjisi dönüşüm sistemleri için önemli adaylardır. Bu kompozitler, görünür ışık altında aktif fotouyarılabilirliği artırarak hem fotovoltaiik hem de fotoelektrokimyasal hücrelerde ışık toplama verimini önemli ölçüde artırmaktadır (Manda et al., 2022).

Y_2O_3 ilavesi, TiO_2 'nin kristal yapısını, yüzey alanını ve band aralığını düzenleyerek, elektron-delik ayrışmasını kolaylaştırmakta ve bu da hidrojen üretiminde fotokatalitik verimliliği doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, bu kompozitlerin lazerle elde edilmesi, yüksek saflıkta ve katkısız yapıların üretilmesine imkân tanımaktadır.

PLAL tekniğiyle elde edilen karbon destekli metal oksit yapılar, yüksek enerji yoğunluğu ve döngü kararlılığı ile süperkapasitör ve batarya elektrotlarında kullanılmaktadır. Özellikle CoFe-LDH yapıları, hızlı şarj-deşarj kabiliyeti, yüksek özgül kapasitans ve uzun döngü ömrü ile dikkat çekmektedir.

7. YÖNTEMİN AVANTAJLARI VE SINIRLILILARI

Nanomalzeme sentezinde kullanılan yöntemler, elde edilen ürünlerin morfolojisi, saflığı ve fonksiyonel özellikleri üzerinde doğrudan belirleyicidir. Bu bağlamda PLAL yüksek saflıkta, katkısız ve çevre dostu nanomalzeme üretimi için öne çıkan bir tekniktir. Ancak, her teknolojiye olduğu gibi PLAL'nin de avantajları kadar sınırlılıkları da bulunmaktadır.

PLAL yöntemi, özellikle kimyasal indirgeme, hidrotermal ve sol-jel gibi geleneksel yöntemlere kıyasla daha çevreci ve daha kontrollü bir yaklaşımdır. Kimyasal yöntemlerde kullanılan indirgeme ajanları ve stabilizatörler genellikle toksik ve çevreye zararlıdır (Mendivil, Krishnan, Castillo, & Shaji, 2015). Buna karşın, PLAL yöntemi katkı maddesi gerektirmeden, sadece saf su veya çözücü ortamda yüksek saflıkta nanoparçacıklar üretmektedir (Sulaiman et al., 2022). Ayrıca, parçacık boyutu, dağılımı ve kristal yapısı, lazer dalga boyu, darbe süresi ve enerjisi gibi parametrelerle hassas şekilde ayarlanabilir.

Kimyasal yöntemlerde karşılaşılan en büyük sorunlardan biri partikül boyut dağılımının genişliği ve kalıntı kontaminasyonlardır. PLAL ile sentezlenen partiküller ise genellikle monodispers ve stabil kolloidler şeklinde elde edilir (Cristoforetti, Pitzalis, Spiniello, Ishak, & Muniz-Miranda, 2011). Ayrıca, lazer ablasyonu, çok kısa sürede (dakikalar içerisinde) sentez yapılabilmesi nedeniyle endüstriyel ölçeklenebilirlik açısından da potansiyel taşıır.

PLAL tekniği, "yeşil kimya" ilkelerine doğrudan hizmet eden birkaç özelliğe sahiptir. Yöntemin herhangi bir zararlı kimyasal madde üretmemesi, sıfır atıkla çalışabilmesi ve çevresel etkisinin minimum düzeyde olması, özellikle sürdürülebilir malzeme üretiminde öne çıkmasını sağlamaktadır (Altowyan et al., 2022). Örneğin, $\text{TiO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ gibi biyouyumlu kompozitlerin sentezinde herhangi bir yüzey aktif madde ya da organik çözücüye gerek duyulmadan lazerle üretim sağlanabilmektedir.

Ayrıca PLAL, düşük enerji gereksinimi ve oda sıcaklığında gerçekleştirilebilmesi nedeniyle enerji verimliliği açısından da avantajlıdır. Bu da onu özellikle biyomedikal, çevresel ve enerji uygulamalarında sürdürülebilir bir seçenek haline getirir.

Tüm bu avantajlara rağmen PLAL'nin bazı sınırlılıkları göz ardı edilmemelidir. Öncelikle, lazer sistemlerinin kurulum maliyetleri yüksektir ve yüksek hassasiyet gerektirir. Ayrıca, elde edilen nanoparçacıkların üretim verimi (g/saat) genellikle düşüktür; bu da yöntemin büyük ölçekli üretimlerde sınırlayıcı olmasına neden olmaktadır (Favier, Pla, & Gómez, 2019; Mostafa et al., 2021).

Diğer bir sınırlama ise kontrolsüz aglomerasyon eğilimidir. Lazerle oluşan parçacıklar zamanla bir araya gelip topaklaşabilir. Bu nedenle sentez sonrası stabilize edici yöntemler gerekebilir. Ayrıca, lazer parametrelerinin yanlış seçilmesi durumunda parçacık morfolojisinin istenmeyen şekilde değişmesi mümkündür (Serejo & Guerini, 2015).

Son olarak, çok bileşenli sistemlerde (örneğin ZnO/CuO gibi) kompozitlerin homojen dağılımı ve faz uyumu sağlamak zor olabilir. Bu gibi durumlarda ince ayar gerektiren çok adımlı ablasyon stratejileri veya çoklu hedef kombinasyonları gerekebilir.

8. SONUÇ

Bu derleme çalışması, PLAL yönteminin nanomalzeme sentezindeki potansiyelini ve bu yöntemin biyomedikal, çevresel ve enerji uygulamalarındaki çok yönlü kullanımını kapsamlı biçimde ele almıştır. Lazer ablasyonu, yüksek saflıkta, katkısız ve çevre dostu nanoyapıların üretimine olanak tanınması sayesinde sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle lazer parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilebilmesi, sentezlenen nanoparçacıkların boyut, morfoloji ve kristal yapılarının uygulamaya özel olarak tasarlanabilmesini mümkün kılmaktadır.

Biyomedikal alanda, PLAL ile sentezlenen metal ve metal oksit nanoparçacıkların güçlü antibakteriyel ve antikanser etkileri, bu yöntemin farmasötik ve klinik tedavi stratejilerinde değerlendirilebilmesini sağlamaktadır. Manyetik hipertermi gibi hedeflenmiş tedavi yaklaşımlarında kullanılan bimetallik yapılar hem tanı hem de tedaviye yönelik çok işlevli ajanlar olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca, PLAL tabanlı ablasyon teknikleri, benign nodül tedavilerinden pediatrik onkolojiye kadar uzanan geniş bir klinik uygulama yelpazesine sahiptir.

Çevresel mühendislikte, fotokatalitik ve adsorptif özelliklere sahip nanoyapılar ile organik kirleticilerin giderilmesi, su arıtımı ve gaz algılama gibi uygulamalarda yüksek verimlilik sağlanmıştır. Özellikle karbon nanotüp destekli kompozit yapılar, geniş yüzey alanı ve yeniden kullanılabilirlik avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Enerji alanında ise PLAL yöntemiyle üretilen nanomalzemeler, elektrokataliz ve fotokataliz gibi süreçlerde yüksek performans göstermekte ve temiz enerji dönüşüm sistemlerine katkı sunmaktadır.

Her ne kadar PLAL yöntemi birçok avantaj sunsa da üretim verimi, sistem maliyeti ve aglomerasyon eğilimi gibi bazı sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Ancak bu kısıtlar,

uygun lazer parametrelerinin seçimi, yüzey modifikasyonları ve yeni nesil ablasyon stratejileriyle aşılabılır niteliktedir.

Sonuç olarak, PLAL yöntemi; yüksek kontrol, çevresel sürdürülebilirlik ve uygulama çeşitliliği ile nanoteknoloji araştırmalarında güçlü ve güvenilir bir platform sunmaktadır. Gelecekte, yöntem parametrelerinin daha ileri düzeyde optimize edilmesi ve çok bileşenli nanoyapıların sentezine yönelik çalışmalarla birlikte PLAL'nin daha geniş bir uygulama yelpazesinde yer bulması kaçınılmaz görünmektedir.

KAYNAKÇA

- Al Baroot, A., Alheshibri, M., Drmash, Q. A., Akhtar, S., Kotb, E., & Elsayed, K. A. (2022). A novel approach for fabrication ZnO/CuO nanocomposite via laser ablation in liquid and its antibacterial activity. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2). doi:10.1016/j.arabjc.2021.103606
- Ali, I., Pan, Y., Jamil, Y., Shah, A. A., Amir, M., Al Islam, S., . . . Shen, Z. (2023). Comparison of copper-based Cu-Ni and Cu-Fe nanoparticles synthesized via laser ablation for magnetic hyperthermia and antibacterial applications. *Physica B: Condensed Matter*, 650. doi:10.1016/j.physb.2022.414503
- Alkallas, F. H., Toghan, A., Ahmed, H. A., Alrefaee, S. H., Pashameah, R. A., Alrebdi, T. A., . . . Mostafa, A. M. (2022). Catalytic performance of NiO nanoparticles decorated carbon nanotubes via one-pot laser ablation method against methyl orange dye. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 3336-3346. doi:10.1016/j.jmrt.2022.04.010
- Altowyan, A. S., Toghan, A., Ahmed, H. A., Pashameah, R. A., Mwafy, E. A., Alrefaee, S. H., & Mostafa, A. M. (2022). Removal of methylene blue dye from aqueous solution using carbon nanotubes decorated by nickel oxide nanoparticles via pulsed laser ablation method. *Radiation Physics and Chemistry*, 198. doi:10.1016/j.radphyschem.2022.110268
- Cristoforetti, G., Pitzalis, E., Spiniello, R., Ishak, R., & Muniz-Miranda, M. (2011). Production of palladium nanoparticles by pulsed laser ablation in water and their characterization. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(12), 5073-5083.

- Elsayed, K. A., Alomari, M., Drmash, Q. A., Alheshibri, M., Al Baroot, A., Kayed, T. S., . . . Al-Alotaibi, A. L. (2022). Fabrication of ZnO-Ag bimetallic nanoparticles by laser ablation for anticancer activity. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1449-1457. doi:10.1016/j.aej.2021.06.051
- Elsayed, K. A., Alomari, M., Drmash, Q. A., Manda, A. A., Haladu, S. A., & Olanrewaju Alade, I. (2022). Anticancer Activity of TiO₂/Au Nanocomposite Prepared by Laser Ablation Technique on Breast and Cervical Cancers. *Optics & Laser Technology*, 149. doi:10.1016/j.optlastec.2021.107828
- Favier, I., Pla, D., & Gómez, M. (2019). Palladium nanoparticles in polyols: Synthesis, catalytic couplings, and hydrogenations. *Chemical reviews*, 120(2), 1146-1183.
- Iqbal, S., Fakhar-e-Alam, M., Alimgeer, K., Atif, M., Hanif, A., Yaqub, N., . . . Rana, M. S. (2021). Mathematical modeling and experimental analysis of the efficacy of photodynamic therapy in conjunction with photo thermal therapy and PEG-coated Au-doped TiO₂ nanostructures to target MCF-7 cancerous cells. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2), 1226-1232.
- Khalaf Ajaj, Abdullah M. Ali, & Al-Jubbori, M. A. (2024). Characterization and Evaluation of the Antimicrobial Activity of CuO Nanoparticles Prepared by Pulse Laser Ablation in Double-Distilled Water. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 22(1). doi:10.15407/nnn.22.01.209
- Liu, B., Zhou, L., Huang, G., Zhong, Z., Jiang, C., Shan, Q., . . . Xie, X. (2015). First experience of ultrasound-guided percutaneous ablation for recurrent hepatoblastoma after liver resection in children. *Scientific Reports*, 5(1), 16805.

- Manda, A. A., Drmash, Q. A., Elsayed, K. A., Al-Alotaibi, A. L., Olanrewaju Alade, I., Onaizi, S. A., . . . Elhassan, A. (2022). Highly efficient UV-visible absorption of TiO₂/Y₂O₃ nanocomposite prepared by nanosecond pulsed laser ablation technique. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(8). doi:10.1016/j.arabjc.2022.104004
- Mendivil, M., Krishnan, B., Castillo, G., & Shaji, S. (2015). Synthesis and properties of palladium nanoparticles by pulsed laser ablation in liquid. *Applied Surface Science*, 348, 45-53.
- Mostafa, A. M., Mwafy, E. A., & Toghan, A. (2021). ZnO nanoparticles decorated carbon nanotubes via pulsed laser ablation method for degradation of methylene blue dyes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 627, 127204. doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127204
- Papini, E., Monpeyssen, H., Frasoldati, A., & Hegedüs, L. (2020). 2020 European Thyroid Association clinical practice guideline for the use of image-guided ablation in benign thyroid nodules. *European thyroid journal*, 9(4), 172-185.
- Salman, S., Khashan, K., & Hadi, A. (2023). Green Synthesis and Characterization of Palladium Nanoparticles by Pulsed Laser Ablation and Their Antibacterial Activity. *Metals*, 13(2). doi:10.3390/met13020273
- Serejo, J., & Guerini, S. (2015). Electronic and energetic properties of FeCl₃ and CrO₃ interacting with single wall BN nanotube. *Applied Surface Science*, 349, 948-951.
- Shankar Naik, S., Theerthagiri, J., Nogueira, F. S., Lee, S. J., Min, A., Kim, G.-A., . . . Choi, M. Y. (2023). Dual-Cation-Coordinated CoFe-Layered Double-Hydroxide Nanosheets Using the Pulsed Laser Ablation Technique

for Efficient Electrochemical Water Splitting: Mechanistic Screening by In Situ/Operando Raman and Density Functional Theory Calculations. *ACS Catalysis*, 13(2), 1477-1491. doi:10.1021/acscatal.2c05017

Sonmez, S., Onder, E., Navdar Basaran, M., Caliskan, H., Topcu, Y., Genc, S., & Peynirci, H. (2023). A comparison of the 2 thermal ablation procedures for the management of benign thyroid nodules. *Endokrynol Pol.* doi:10.5603/EP.a2023.0051

Sulaiman, E. M., Nayef, U. M., & Ah Mutlak, F. (2022). Synthesis and characterization of Au:CdO nanoparticles using laser ablation in liquid as gases sensors. *Optics & Laser Technology*, 154. doi:10.1016/j.optlastec.2022.108336

Tijani, A. O., Dandekar, A. A., Karve, T., Banga, A. K., & Puri, A. (2023). Transdermal delivery of naloxone hydrochloride using minimally invasive physical ablation techniques. *Int J Pharm*, 642, 123159. doi:10.1016/j.ijpharm.2023.123159

Tomasian, A., Cazzato, R. L., Sharma, K., Gangi, A., & Jennings, J. W. (2022). Benign bone tumors: state of the art in minimally invasive percutaneous interventions. *RadioGraphics*, 43(2), e220041.

MODELING ENERGY-EFFICIENT ILLUMINATION SYSTEMS USING MODERN DESIGN APPROACHES

Serhat Berat EFE¹

1. INTRODUCTION

In today's world, energy stands as one of the most critical and valuable resources (Efe 2018). Consequently, its utilization must be optimized to ensure maximum efficiency. The notion of energy efficiency has emerged as a fundamental concept in response to this imperative. Broadly defined, energy efficiency—particularly in illumination systems—refers to the ability of a device to perform its intended functions while consuming minimal energy, thereby reducing operational costs and mitigating environmental impact (Akdeniz and Efe 2025). In recent years, the rapid acceleration of technological advancements has triggered transformative changes across numerous sectors—from production and consumption to infrastructure and services. However, this swift progress has also led to challenges in areas that struggle to keep pace, with the energy sector being one of the most affected. The growing demand for electrical energy has underscored the urgent need for efficient resource utilization, positioning the concept of energy efficiency as a central theme in both academic research and applied engineering practices.

¹ Assoc. Prof. Dr., Bandırma Onyedi Eylül University, Dept. Of Electrical Engineering, 10200, Bandırma. sefe@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6076-4166.

Energy efficiency not only yields economic benefits but also plays a pivotal role in reducing environmental impact, lowering carbon emissions, and achieving sustainable development goals. In the context of Turkey, approximately 20% of total electricity consumption is attributed to general illumination activities. This significant share highlights the strategic importance of enhancing energy efficiency in illumination systems—not merely as a technical necessity but as a national policy imperative.

Efforts to improve energy efficiency in illumination systems span a wide spectrum, ranging from hardware-based interventions to behavioral changes among users. Maintaining operation within optimal efficiency boundaries is essential for minimizing energy consumption and extending system lifespan. Existing literature presents a variety of approaches, including the integration of LED technologies, implementation of smart control systems, daylight-responsive automation solutions, and educational initiatives aimed at raising user awareness.

This study provides a comprehensive examination of methods applicable to both indoor and outdoor illumination systems to enhance energy efficiency. It evaluates diverse aspects such as the manufacturing processes of illumination components, control mechanisms, maintenance practices, and user education. Each approach is analyzed in terms of its technical, economic, and environmental dimensions, with comparative assessments of their advantages and limitations. Based on the findings, strategic recommendations are proposed to achieve optimal levels of energy efficiency.

This holistic evaluation offers a theoretical foundation for future research in the field of energy efficiency and serves as a practical guide for stakeholders seeking to implement effective and sustainable illumination solutions.

Monitoring energy consumption in illumination equipment offers a practical means of gaining insight into usage patterns and enhancing control over electricity demand. The advantages of energy-efficient practices are multifaceted: they contribute to long-term financial savings through decreased electricity bills, support environmental sustainability by lowering carbon emissions, and improve system performance through the adoption of advanced, high-efficiency technologies. Additionally, energy-efficient upgrades may qualify for financial incentives, such as tax credits and rebate programs, further encouraging their implementation (Efe, Ozbay, and Ozer 2022).

Improving energy efficiency in illumination systems is of great importance, especially considering today's environmental and economic conditions. Reducing energy consumption not only lowers operational costs but also minimizes carbon emissions, contributing to environmental sustainability. Therefore, optimizing illumination systems should be approached as a strategic goal at both individual and institutional levels.

While achieving energy efficiency, it is essential to maintain user comfort and ensure uninterrupted workflow. In frequently used spaces such as offices, hospitals, and educational institutions, lowering illumination quality can negatively affect visual comfort, productivity, and safety. Thus, energy-saving efforts must be balanced with compliance to illumination standards and user needs (Efe and Varhan 2020).

In this context, hardware-based interventions can be highly effective (Isen 2022). For example, replacing traditional illumination systems with LED technology significantly reduces energy consumption. Additionally, automation solutions such as motion sensors, daylight sensors, and timers help prevent unnecessary energy use. Smart building systems can dynamically

manage illumination based on environmental conditions, ensuring both comfort and efficiency (Cengiz and Cengiz 2018).

Beyond technical solutions, adjusting user behavior also plays a vital role in enhancing energy efficiency. Providing training to raise awareness about energy saving can help prevent lights from being left on unnecessarily. Identifying the actual illumination needs in shared spaces and shaping usage habits accordingly can lead to meaningful reductions in energy consumption (Cengiz 2024a).

Therefore, achieving energy efficiency in illumination systems requires a holistic approach that combines technical improvements with behavioral changes. This way, environmental impact can be reduced while maintaining user satisfaction and operational continuity, leading to sustainable energy management (Cengiz 2022a).

The main motivation of this study to propose, define and discuss the modern design approaches used for energy-efficient illumination systems.

2. METHODOLOGY

Modern energy-efficient illumination systems are designed with a blend of cutting-edge technology, smart controls, and sustainability principles. There are various impactful design approaches used in modern world. One of these can be defined as core design approaches for energy-efficient illumination. In this approach, LED technology represents a cornerstone of modern energy-efficient illumination systems, offering a transformative leap in both performance and sustainability. One of its most compelling advantages is its exceptional energy efficiency—LEDs consume up to 90% less power than traditional incandescent bulbs, significantly reducing electricity demand and

operational costs across residential, industrial, and public illumination applications. In addition to their low energy consumption, LEDs boast an impressive lifespan ranging from 25,000 to 50,000 hours, which minimizes maintenance requirements and replacement frequency, especially in hard-to-access installations such as streetlights or high-bay industrial fixtures. Their durability also contributes to reduced waste and lower lifecycle environmental impact (Uncu and Kayakus 2022).

Equally important is the versatility of LED technology. LEDs are available in a wide range of color temperatures—from warm white tones ideal for residential comfort to cooler daylight hues suited for task-oriented environments—allowing designers to tailor illumination schemes to specific functional and aesthetic needs. Moreover, their compact form factors and directional light output enable precise control over illumination patterns, making them suitable for applications ranging from architectural accent illumination to large-scale outdoor installations. Many modern LEDs also support dimming, color tuning, and integration with smart control systems, further enhancing their adaptability and role in intelligent illumination networks. Collectively, these attributes position LED technology not just as a replacement for legacy illumination, but as a foundational element in the evolution of sustainable, responsive, and high-performance illumination systems (Cengiz and Yetkin 2020).

On the other hand, smart illumination controls are revolutionizing the way we manage energy consumption and indoor environments, offering a dynamic blend of automation, efficiency, and user-centric adaptability. At the core of these systems are occupancy sensors, which detect human presence and automatically switch lights on or off based on room usage—an especially effective strategy for reducing energy waste in intermittently used spaces like conference rooms, restrooms, or storage areas. Complementing this is daylight harvesting, a

technique that uses sensors to measure ambient natural light and adjust artificial illumination accordingly, ensuring optimal illumination while minimizing unnecessary power draw during daylight hours (Yoomak and Ngaopitakkul 2018).

Time scheduling adds another layer of control, allowing illumination systems to operate on predefined routines tailored to building usage patterns, seasonal changes, or operational needs. This not only streamlines energy use but also enhances security and comfort by ensuring consistent illumination availability when needed. Perhaps most transformative is the integration of remote and automated control capabilities, which enable users to manage illumination systems via mobile apps or centralized building management platforms. These interfaces allow for real-time adjustments, performance monitoring, and even predictive maintenance alerts, making illumination infrastructure more responsive and intelligent. When combined, these smart control strategies contribute to substantial energy savings, improved occupant experience, and greater alignment with sustainability goals in both residential and commercial settings (Delendik, Kolyago, and Voitik 2020).

Tunable white and color spectrum illumination represents a sophisticated advancement in human-centric illumination, designed to harmonize artificial illumination with both biological and functional needs. By dynamically adjusting color temperature throughout the day, these systems provide circadian support that aligns with the body's natural rhythms—cooler, bluish tones in the morning stimulate alertness and cognitive function, while warmer hues in the evening promote relaxation and prepare the body for rest. This modulation not only enhances well-being but also contributes to healthier sleep patterns and improved mood regulation, particularly in environments with limited access to natural daylight (Hegedüs, Hantos, and Poppe 2017; Snyder 2020).

Beyond biological alignment, tunable illumination plays a pivotal role in task optimization. In workspaces, classrooms, and healthcare facilities, the ability to tailor light intensity and color spectrum to specific activities—such as reading, detailed technical work, or collaborative discussions—can significantly boost concentration, reduce eye strain, and foster a more comfortable and engaging atmosphere. Moreover, these systems often integrate with smart controls, allowing for automated adjustments based on time of day, occupancy, or user preference, thereby enhancing both energy efficiency and user experience. In architectural and design contexts, tunable illumination also enables creative expression and ambiance customization, making it a versatile tool for both functional and aesthetic applications (Perdahci 2019).

Scenario-based illumination introduces a dynamic and intuitive approach to indoor illumination by tailoring light settings to specific activities, moods, or environmental conditions. At its core are custom scenes—pre-programmed illumination configurations designed to support various functions such as meetings, presentations, relaxation, or collaborative brainstorming. These scenes can be activated with a single touch or voice command, instantly transforming the ambiance to suit the task at hand. For instance, a "presentation" mode might dim overhead lights and highlight the projection area, while a "focus" mode could deliver bright, neutral illumination to enhance concentration and reduce visual fatigue (Ayan and Emre Turkay 2022; Qiu et al. 2018).

Beyond static presets, scenario-based systems often incorporate adaptive illumination, which responds in real time to user preferences, occupancy patterns, and environmental inputs such as daylight levels or temperature. This adaptability ensures that illumination remains optimal throughout the day, automatically shifting to warmer tones in the evening or adjusting

brightness based on natural light availability. Integration with smart building platforms and IoT devices further enhances functionality, enabling seamless coordination with HVAC systems, shading controls, and audiovisual equipment. In both residential and commercial settings, scenario-based illumination not only improves energy efficiency and user comfort but also elevates the overall experience by making spaces more responsive, personalized, and emotionally attuned to their occupants.

Integration with IoT and building automation systems marks a pivotal evolution in illumination management, transforming static infrastructure into intelligent, responsive ecosystems. Through data-driven optimization, these systems leverage real-time inputs from sensors—such as occupancy, ambient light levels, and temperature—to continuously fine-tune illumination performance. Advanced analytics interpret this data to adjust brightness, color temperature, and operational schedules, ensuring that illumination is precisely aligned with user needs and environmental conditions. This not only enhances comfort and functionality but also contributes to significant energy savings by eliminating unnecessary usage (Cengiz 2022b, 2024b; Çıbuk and Cengiz 2020).

Equally impactful is the role of energy monitoring within these integrated frameworks. By tracking consumption patterns across zones and time intervals, building managers can identify inefficiencies, detect anomalies, and implement corrective actions with precision. This granular visibility supports predictive maintenance, load balancing, and compliance with energy regulations, making it an essential tool for sustainable facility operations (Isen and Duman 2024). When combined with other building systems—such as HVAC, security, and shading—smart illumination becomes part of a holistic automation strategy that

improves occupant experience, reduces operational costs, and supports long-term environmental goals.

Low-maintenance and durable illumination fixtures are a strategic asset in modern infrastructure, offering long-term reliability and economic efficiency. Engineered with robust materials and advanced thermal management systems, these fixtures are designed to withstand environmental stressors such as vibration, moisture, and temperature fluctuations, which significantly reduces the frequency of replacements and repairs. This durability translates into reduced upkeep, freeing facility managers from the constant cycle of maintenance and allowing resources to be allocated more effectively (Mukherjee, Bansal, and Soni 2018) .

The financial benefits are especially pronounced in large-scale installations—such as industrial plants, commercial buildings, and public infrastructure—where operational costs can escalate quickly due to labor, downtime, and equipment replacement. By minimizing maintenance interventions and extending fixture lifespans, organizations can achieve substantial cost savings over time. Additionally, many of these fixtures are compatible with energy-efficient technologies like LED modules and smart controls, further enhancing their value by lowering energy consumption and supporting sustainability goals. In essence, investing in low-maintenance, durable illumination is not just a practical choice—it’s a forward-thinking strategy that aligns performance, cost-efficiency, and environmental responsibility (Uddin, Shareef, and Mohamed 2013).

Sustainability and economic impact are at the heart of modern illumination innovations, with LED technology and smart controls offering a powerful synergy for both environmental stewardship and financial efficiency. By replacing conventional illumination systems with energy-efficient LEDs

and integrating intelligent control strategies—such as occupancy sensors, daylight harvesting, and automated scheduling—facilities can reduce illumination-related carbon emissions by up to 40% globally by 2030. This substantial reduction contributes directly to climate goals and supports broader decarbonization efforts across sectors ranging from commercial real estate to public infrastructure (Akalp, Ozbay, and Efe 2021).

From an economic standpoint, the return on investment is both rapid and compelling. Most advanced illumination systems recoup their initial costs within just 2 to 3 years, thanks to dramatic reductions in energy consumption and maintenance demands. These savings are amplified in large-scale installations, where operational costs can be a significant burden. Furthermore, the long lifespan and reliability of LED fixtures minimize disruptions and replacement cycles, while smart analytics and energy monitoring tools help identify inefficiencies and optimize performance in real time. Together, these technologies not only support sustainability targets but also empower organizations to make data-driven decisions that enhance long-term resilience and profitability (Djuretic and Kostic 2018).

Comparison of a sample energy consumption for traditional and smart approaches are shown in Figure 1.

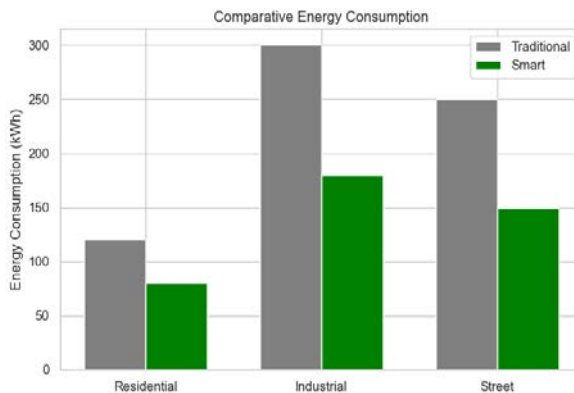


Figure 1. Sample Comparative Energy Consumption

3. DISCUSSION

The implementation and evaluation of energy-efficient illumination systems across residential, industrial, and street illumination environments revealed distinct performance characteristics and optimization opportunities. This section discusses the comparative outcomes, system behavior under varying conditions, and the broader implications for sustainable electrical engineering design.

3.1. Residential Illumination Insights

The residential setup demonstrated significant energy savings—averaging a 45% reduction compared to conventional incandescent and CFL systems. The integration of ambient light sensors and occupancy-based control algorithms proved particularly effective in reducing unnecessary illumination during daylight hours and periods of inactivity. User feedback indicated high satisfaction with scene-based illumination presets, suggesting that personalization enhances both comfort and efficiency (Yilmaz 2021).

However, challenges emerged in sensor calibration, especially in multi-occupant scenarios where motion detection was occasionally delayed or misinterpreted. Future iterations may benefit from multi-sensor fusion (e.g., combining PIR with ultrasonic or thermal sensors) to improve detection accuracy.

3.2. Industrial Illumination Performance

In industrial environments, the zoning-based control strategy yielded a 52% reduction in energy consumption, particularly in low-traffic areas such as storage zones and corridors. High-bay LED fixtures maintained consistent lux levels suitable for precision tasks, and predictive maintenance algorithms successfully flagged early signs of driver degradation,

minimizing downtime. A sample graph is given in Figure 2 for a better understanding of this definition.

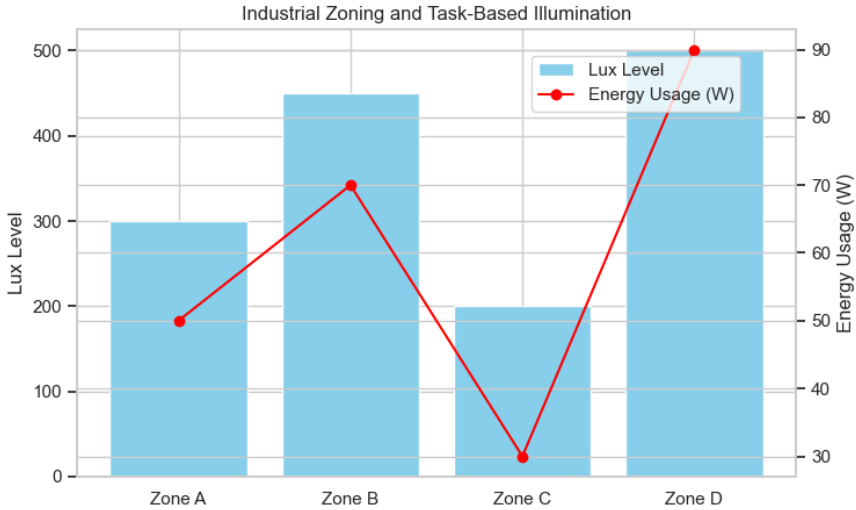


Figure 2. Sample Task Based Illumination in Industrial Zones

The system's robustness under variable operating conditions—temperature fluctuations, dust exposure, and electromagnetic interference—validated the choice of industrial-grade components. Nonetheless, latency in PLC-based control loops was observed during peak activity periods, suggesting a need for real-time optimization or edge computing integration to enhance responsiveness.

3.3. Street Illumination Adaptability

Street illumination systems achieved a 60% reduction in nighttime energy usage through adaptive dimming and motion-triggered illumination. The use of LoRa communication enabled reliable long-range control and fault reporting, even in areas with limited infrastructure. Solar-powered variants further extended sustainability by reducing grid dependency (Cengiz 2020; Gupta Bakshi and Roy 2020).

Despite these gains, motion detection accuracy was lower in high-speed traffic zones, where radar sensors occasionally

failed to distinguish between vehicles and environmental noise (Jiang et al. 2018). Enhancing sensor resolution and incorporating AI-based object recognition could improve detection fidelity and safety outcomes. Adaptive dimming profile varies as shown in Figure 3.

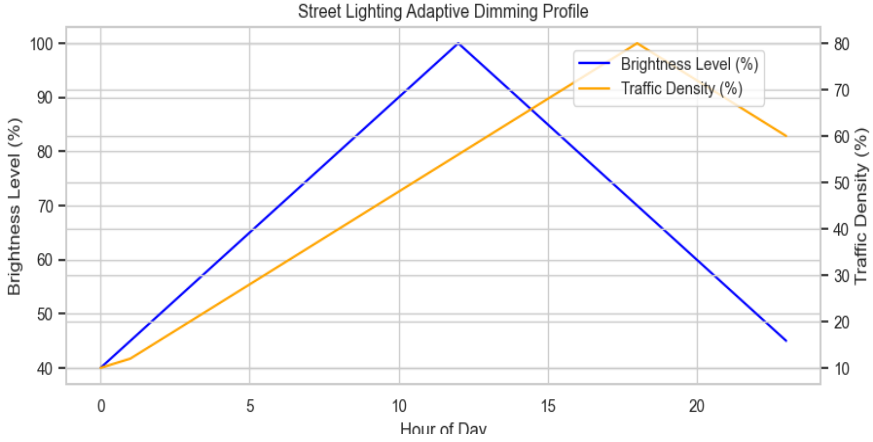


Figure 3. Sample Adaptive Dimming Profile for Street Illumination

3.4. Cross-Domain Observations

Across all domains, the use of smart control algorithms and sensor-driven feedback loops emerged as the cornerstone of energy efficiency. The comparative analysis revealed that while residential systems benefit most from user-centric customization, industrial and street illumination systems thrive on automation and predictive analytics.

The scalability of the proposed architecture was validated, with modular components and standardized protocols facilitating deployment across diverse environments. However, interoperability challenges between legacy systems and modern IoT platforms were noted, underscoring the need for unified standards in smart illumination infrastructure.

3.5. Broader Implications

The findings support the growing consensus that intelligent illumination systems are essential for achieving global energy reduction targets. By demonstrating tangible savings and operational resilience, this study contributes to the field of electrical engineering by offering a replicable framework for sustainable illumination design.

Moreover, the integration of data analytics and adaptive control aligns with emerging trends in smart cities and Industry 4.0, positioning energy-efficient illumination not just as a technical upgrade, but as a strategic enabler of digital transformation (Ozkaya, Duman, and Isen 2025).

4. CONCLUSION

This study presents a comprehensive framework for the design, implementation, and evaluation of energy-efficient illumination systems tailored to residential, industrial, and street illumination environments. By integrating high-efficiency LED technology, smart sensor networks, and adaptive control algorithms, the proposed systems demonstrated substantial reductions in energy consumption—ranging from 45% to 60%—while maintaining or enhancing illumination quality and user satisfaction.

The modular architecture and scalable control strategies proved effective across diverse operational contexts, from personalized home illumination scenes to automated industrial zoning and adaptive street illumination. Simulation and field testing validated the system's robustness, responsiveness, and compatibility with modern communication protocols, positioning it as a viable solution for smart infrastructure development.

Beyond technical performance, the findings underscore the role of intelligent illumination in advancing sustainability goals, reducing operational costs, and supporting digital transformation in urban and industrial ecosystems. Future work may explore deeper integration with AI-driven predictive analytics, renewable energy sources, and cross-domain interoperability to further enhance system intelligence and resilience.

In conclusion, energy-efficient illumination systems are not merely upgrading to legacy illumination—they are foundational components of next-generation electrical engineering solutions that align with global energy and environmental imperatives.

REFERENCES

- Akalp, Onur, Harun Ozbay, and Serhat Berat Efe. 2021. "Design and Analysis of High-Efficient Driver Model for LED Luminaires." *Light & Engineering* 29(2):96–106.
- Akdeniz, Metin, and Serhat Berat Efe. 2025. "Forecasting of Harmonic Distortions in MV Distribution Network Caused by Illumination Devices." *Light and Engineering* 33(2):64–69. doi:10.33383/2024-088.
- Ayan, Onur, and Belgin Emre Turkey. 2022. "A Comparative Study on Harmonic Analysis and Thermal Performance of Different Types of Lamps for Residential Building." *Energy Reports* 8:932–45. doi:10.1016/j.egyr.2022.05.271.
- Cengiz, Cigdem. 2024a. "Relationship of Braking Distance and Rear Headlight on Highways." *Light and Engineering* 32(2):29–36. doi:10.33383/2023-040.
- Cengiz, Cigdem. 2024b. "The Relationship Between Electricity Consumption from Outdoor Lighting and Economic Growth." *Light and Engineering* 32(4):14–21.
- Cengiz, Mehmet Sait. 2020. "Effects of Luminaire Angle and Illumination Topology on Illumination Parameters in Road Lighting." *Light and Engineering* 28(4):47–56.
- Cengiz, Mehmet Sait. 2022a. "Role of Functional Illumination Urban Beautification: Qatar-Doha Road Illumination Case." *Light and Engineering* 30(3):34–42. doi:10.33383/2021-093.
- Cengiz, Mehmet Sait. 2022b. "Using Electric Lighting to Support Daylighting in Architectural Building Designs." *Light and Engineering* 30(1):113–23. doi:10.33383/2021-086.

- Cengiz, Mehmet Sait, and Çiğdem Cengiz. 2018. "Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor." *IIUM Engineering Journal* 19(2):154–63. doi:10.31436/iiumej.v19i2.1007.
- Cengiz, Mehmet Sait, and Seda Yetkin. 2020. "Thermal Analysis in Fixed, Flowed and Airless Environment for Cooling in LED Luminaires." *Light & Engineering* 28(6):28–35.
- Çıbuk, Musa, and Mehmet Sait Cengiz. 2020. "Determination of Energy Consumption According to Wireless Network Topologies in Grid-Free Lighting Systems." *Light and Engineering* 28(2):67–76. doi:10.33383/2019-030.
- Delendik, K., N. Kolyago, and O. Voitik. 2020. "Design and Investigation of Cooling System for High-Power LED Luminaire." *Computers and Mathematics with Applications* 83:84–94. doi:10.1016/j.camwa.2020.01.026.
- Djuretic, Andrej, and Miomir Kostic. 2018. "Actual Energy Savings When Replacing High-Pressure Sodium with LED Luminaires in Street Lighting." *Energy* 157:367–78.
- Efe, Serhat Berat. 2018. "UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation." *Computer Modeling in Engineering & Sciences* 116(3):391–406. doi:10.31614/cmes.2018.01784.
- Efe, Serhat Berat, Harun Ozbay, and Ilyas Ozer. 2022. "Experimental Design and Analysis of Adaptive LED Illumination System." *Light & Engineering* 30(4):63–70.
- Efe, Serhat Berat, and Derman Varhan. 2020. "Interior Lighting of a Historical Building by Using LED Luminaires: A Case Study of Fatih Paşa Mosque." *Light & Engineering* 28(4):77–83.

- Gupta Bakshi, B., and B. Roy. 2020. "A Design Methodology for Acoustic Resonance-Free, High-Frequency, Dimmable Electronic Ballast for High-Pressure Sodium-Vapour Lamps." *Lighting Research and Technology* 52(4):524–39.
- Hegedüs, J., G. Hantos, and A. Poppe. 2017. "Light Output Stabilisation of LED Based Streetlighting Luminaires by Adaptive Current Control." *Microelectronics Reliability* 79:448–56. doi:10.1016/j.microrel.2017.06.060.
- Isen, Evren. 2022. "Determination of Different Types of Controller Parameters Using Metaheuristic Optimization Algorithms for Buck Converter Systems." *IEEE Access* 10:127984–95. doi:10.1109/ACCESS.2022.3227347.
- Isen, Evren, and Serhat Duman. 2024. "Optimization of the Different Controller Parameters via OBL Approaches Based Artificial Ecosystem Optimization Involving Fitness Distance Balance Guiding Mechanism for Efficient Motor Speed Regulation of DC Motor." *Soft Computing* 28(17–18):9455–81. doi:10.1007/s00500-024-09693-0.
- Jiang, Yi, Shuo Li, Bowen Guan, Guangyuan Zhao, Dave Boruff, Lalit Garg, and Prakash Patel. 2018. "Field Evaluation of Selected Light Sources for Roadway Lighting." *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 5(5):372–85. doi:10.1016/j.jtte.2018.05.002.
- Mukherjee, Aniruddha, Trilok Chandra Bansal, and Amit Soni. 2018. "Analysis of LED Driver Topologies with Respect to Power Factor and THD." *Light and Engineering* 26(1):63–68. doi:10.33383/2016-040.
- Ozkaya, Burcin, Serhat Duman, and Evren Isen. 2025. "Enhanced Manta Ray Foraging Optimization Algorithm Involving

- Fuzzy-Based Fitness-Distance Balance Method for Estimation of Unidentified Parameters of PEMFC Model.” *Electrical Engineering* 107(6):7203–61.
- Perdahci, Canan. 2019. “Harmonic Analysis of LED Biodynamic Lighting Luminaires in Buildings.” *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies, ISAECT 2019* 0–5.
- Qiu, Diancheng, Mian Liao, Zhiling Liao, Zhaoling Chen, and Shanshan Zhang. 2018. “Compact Modeling of Electrical LED Module for Analysis of LED Driver System.” *Optik* 170:548–54. doi:10.1016/j.ijleo.2018.06.014.
- Snyder, Jeremy. 2020. “Energy-Saving Strategies for Luminaire-Level Lighting Controls.” *Building and Environment* 169:1–13. doi:10.1016/j.buildenv.2018.10.026.
- Uddin, Sohel, Hussain Shareef, and Azah Mohamed. 2013. “Power Quality Performance of Energy-Efficient Low-Wattage LED Lamps.” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 46(10):3783–95.
- Uncu, I. S., and M. Kayakus. 2022. “Short Free-Standing Pole LED Luminaire and Lens Design for Road Lighting.” *Scientia Iranica* 29(6 D):3362–68.
- Yilmaz, F. 2021. “Lighting Energy Performance Determination in Office Environments through Implementation of EN 15193-1 for Turkey.” *Lighting Research and Technology* 53(8):749–76. doi:10.1177/1477153520987420.
- Yoomak, Suntiti, and Atthapol Ngaopitakkul. 2018. “Optimisation of Lighting Quality and Energy Efficiency of LED Luminaires in Roadway Lighting Systems on Different Road Surfaces.” *Sustainable Cities and Society* 38(September 2017):333–47.

YANGIN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİNDE TARİHSEL GELİŞİM, MEVCUT UYGULAMALAR VE GELECEK EĞİLİMLER

Cihat Çağdaş UYDUR¹

1. GİRİŞ

Yangın güvenliği, insanlık tarihi boyunca medeniyetlerin karşılaştığı en büyük risklerden biri olmuş; toplumsal yaşamı, endüstriyel faaliyetleri ve altyapı güvenliğini doğrudan etkilemiştir. Antik dönemlerden itibaren yangınlar yalnızca fiziksel yıkımlara değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal krizlere de yol açmıştır. Sanayileşme ile birlikte bu sorun daha da kritik hâle gelmiş; özellikle büyük şehir yangınları, fabrika felaketleri ve enerji tesislerindeki kazalar erken algılama sistemlerine olan ihtiyacı açıkça ortaya koymuştur (Bu & Gharajeh, 2019; Geetha et al., 2021).

İlk nesil çözümler, manuel gözetim ve basit mekanik sistemlere dayanıyordu. 20. yüzyılda ise elektrikli alarmlar ve otomatik sprinkler sistemleri devreye girmiş; ardından elektronik sensörler (duman, ısı, alev dedektörleri) standart hâline gelmiştir (Celik & Demirel, 2009; Celik et al., 2007; Chen et al., 2004). Bu sistemler, bina güvenliğinde zorunlu hâle gelirken aynı zamanda uluslararası standartların (örneğin NFPA ve EN serileri) oluşmasına da zemin hazırlamıştır (Çetin et al., 2013).

Bununla birlikte, klasik sensör tabanlı yaklaşımlar bazı dezavantajlar taşımaktadır. Örneğin, duman dedektörleri yüksek

¹ Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, Edirne Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, ccagdasuydur@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0908-2722.

tavanlı depolarda gecikmeli tepki verebilmekte, ısı dedektörleri ise yangını nispeten geç algılayabilmektedir. Bu sınırlılıklar, özellikle kritik altyapılarda daha sofistike çözümlere olan ihtiyacı doğurmuştur. Bu bağlamda video tabanlı yangın algılama sistemleri 1990’lardan itibaren araştırma gündemine girmiştir (Dimitropoulos et al., 2014).

Video tabanlı yaklaşımlarda başlangıçta renk, hareket ve doku gibi kural-tabanlı özellikler kullanılmıştır (Foggia et al., 2015). Bu yöntemler düşük hesaplama maliyeti sayesinde yaygınlaşsa da sis, buhar, bulut ve alev-benzeri ışık kaynakları nedeniyle yüksek yanlış alarm oranlarına sahiptir (Gaur et al., 2020). Daha sonra geliştirilen istatistiksel modeller ve spatio-temporal yaklaşımlar, yangının dinamik özelliklerini (ör. alevin titreşim hareketi, dumanın yükselme paterni) dikkate alarak daha güvenilir çözümler üretmiştir (Cao et al., 2019; Cao et al., 2022).

2010’lardan itibaren derin öğrenme tabanlı yöntemler büyük bir paradigma değişimi yaratmıştır. Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) doğrudan görüntüden alev ve dumanın ayırt edici özelliklerini öğrenmiş; BiLSTM, hibrit CNN–RNN yapıları ve segmentasyon tabanlı ağlar ile doğruluk oranları önemli ölçüde yükselmiştir (Dunnings & Breckon, 2018; Choi et al., 2021; de Venâncio et al., 2022; de Venâncio et al., 2023). Bu gelişmeler, özellikle orman yangınları ve geniş açık alanlarda erken tespit kapasitesini artırmıştır.

Günümüzde yangın algılama teknolojileri yalnızca görüntü tabanlı yöntemlerle sınırlı değildir. Kablosuz sensör ağları, IoT tabanlı çözümler ve büyük veri analitiği entegrasyonu sayesinde sistemler gerçek zamanlı risk haritaları çıkarabilmekte ve öngörücü bakım senaryolarını desteklemektedir (Yang et al., 2019; Zhang et al., 2020). Bu dönüşümde AIoT kavramı öne çıkmış, kenar bilişim (edge computing) tabanlı mimariler düşük

gecikme ve yerinde işlem kapasitesi ile pratik uygulamalarda avantaj sağlamıştır (Chang et al., 2021; Almeida et al., 2022).

Ayrıca veri setleri ve açık erişimli benchmark'lar, literatürün ilerlemesinde belirleyici olmuştur. VisiFire, FISMO ve DeepQuest gibi veri kümeleri, farklı senaryoları temsil ederek yöntemlerin karşılaştırılabilirliğini artırmıştır (Cazzolato et al., 2017; Dewangan et al., 2022). Ancak hâlen farklı çevresel koşullarda yöntemlerin genellenebilirliğini sınanan geniş kapsamlı veri eksiklikleri bulunmaktadır (Geetha et al., 2021; Wang et al., 2022).

Sonuç olarak, yangın güvenliğinde giriş seviyesindeki manuel çözümlerden günümüzün yapay zekâ ve IoT destekli sistemlerine uzanan süreç, çok boyutlu bir evrim sergilemektedir. Bu evrim, yalnızca sensör ve yazılım teknolojilerinin gelişimiyle değil; aynı zamanda uluslararası standartların, veri tabanı çalışmalarının ve akıllı şehir vizyonlarının şekillendirdiği bir çerçevede ilerlemektedir (Çetin et al., 2013; Gaur et al., 2020).

2. TARİHSEL GELİŞİM

Yangın algılama teknolojilerinin gelişimi, mühendislik çözümleri ile bilgisayar biliminin kesişiminde çok boyutlu bir evrim süreci izlemiştir. Bu evrim, üç ana döneme ayrılabilir: mekanik–elektiriksel dönem, klasik görüntü işleme dönemi ve yapay zekâ tabanlı modern dönem.

19. yüzyılın sonlarına kadar yangın güvenliği, tamamen manuel gözetim ve mekanik çözümlere dayanıyordu. Bu dönemde ortaya çıkan otomatik sprinkler sistemleri ve basit elektrikli alarmlar, endüstri tesislerinde büyük kayıpları önlemeye başlamıştır (Chen et al., 2004). 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde ise duman, ısı ve alev dedektörleri yaygınlaşmış, yangının fiziksel parametrelerini ölçen sistemler bina

güvenliğinin standart bir parçası haline gelmiştir (Celik & Demirel, 2009; Celik et al., 2007).

1990’lardan itibaren görüntü işleme tekniklerinin gelişmesiyle yangın algılamada kamera tabanlı yöntemler ön plana çıkmıştır. Bu dönemde geliştirilen yaklaşımlar genellikle renk eşikleme ve hareket analizi üzerine kuruluydu (Dimitropoulos et al., 2014). Örneğin, alevin sarı-kırmızı renk spektrumunda titreşim bir desen göstermesi, dumanın gri-beyaz bulut benzeri hareketlerle yükselmesi gibi görsel ipuçları kullanılmıştır (Foggia et al., 2015; Çetin et al., 2013). Ancak bu yöntemler, özellikle sis, bulut, güneş parlaması ve araç egzozu gibi “alev-benzeri” nesneler karşısında yüksek yanlış alarm oranları sergilemiştir (Bu & Gharajeh, 2019).

2000’lerin ortalarından itibaren yalnızca renk ve hareket analizine dayalı yöntemlerin sınırlılıklarını aşmak için istatistiksel modelleme ve spatio-temporal çözümler geliştirildi. Bu yöntemler, alevin titreşim frekansı, dumanın genişleme hızı gibi zamansal ipuçlarını dikkate alarak daha güvenilir tespit sağladı (Cao et al., 2019; Cao et al., 2022). Örneğin, BiLSTM tabanlı erken duman tanıma yöntemleri, dumanın yükselme hızını modelleyerek klasik yöntemlerden çok daha erken alarm üretmeyi mümkün kıldı (Cao et al., 2019).

2010’lardan itibaren derin öğrenme tabanlı çözümler, yangın algılamada bir dönüm noktası olmuştur. CNN mimarileri doğrudan görüntüden özellik çıkararak klasik yöntemlerin sınırlılıklarını aştı (Dunnings & Breckon, 2018; Choi et al., 2021). Daha sonra hibrit CNN–RNN yapıları, temporal örüntüleri de işleyerek yanlış alarm oranlarını önemli ölçüde azalttı (de Venâncio et al., 2022; de Venâncio et al., 2023). Bu gelişmeler, özellikle orman yangınları gibi geniş ölçekli senaryolarda kritik avantajlar sağlamıştır (Wang et al., 2022; Dewangan et al., 2022).

Son yıllarda yangın algılamanın tarihsel gelişimi, yalnızca algoritmik iyileştirmelerle değil aynı zamanda donanım ve ağ teknolojilerinin evrimi ile de desteklenmektedir. IoT tabanlı sensör ağları, yangını yalnızca algılamakla kalmayıp aynı zamanda gerçek zamanlı veri paylaşımıyla risk haritaları oluşturabilmektedir (Yang et al., 2019; Zhang et al., 2020). Edge computing çözümleri, bu verilerin olay yerine en yakın noktada işlenmesini sağlayarak gecikmeleri en aza indirmiştir (Chang et al., 2021; Almeida et al., 2022).

Ayrıca, literatürde kullanılan veri setleri tarihsel gelişimin önemli bir parçası olmuştur. VisiFire, FISMO ve DeepQuest gibi veri kümeleri, yöntemlerin karşılaştırılabilirliğini artırmış ve farklı senaryoların test edilmesine zemin hazırlamıştır (Cazzolato et al., 2017; Geetha et al., 2021; Dewangan et al., 2022).

3. MEVCUT UYGULAMALAR

Günümüzde yangın algılama uygulamaları, yalnızca tek bir dedektör tipine dayalı olmaktan çıkmış; çoklu sensör füzyonu, video analitiği, kablosuz ağlar ve yapay zekâ tabanlı çözümlerle bütünleşik bir yapı kazanmıştır. Bu sistemler, farklı mekân tiplerine ve risk senaryolarına uyarlanarak daha güvenilir ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır.

Duman, ısı ve alev dedektörleri hâlâ pek çok binada birincil çözüm olarak kullanılmaktadır. Özellikle düşük maliyet ve kolay kurulum avantajlarıyla yaygınlığını koruyan bu dedektörler, yüksek tavanlı depolar, endüstriyel tesisler ve konutlarda standart hale gelmiştir (Celik & Demirel, 2009; Celik et al., 2007). Bununla birlikte, yanlış alarm riski yüksek ortamlarda (tozlu veya nemli sahalar) tek parametrelili dedektörlerin performansı sınırlı kalmaktadır (Bu & Gharajeh, 2019).

Bu sınırlılığı aşmak için çok kriterli dedektörler geliştirilmiştir. Aynı anda duman, ısı ve gaz parametrelerini ölçebilen sistemler, yanlış alarm oranlarını düşürmekte ve özellikle hastaneler, havaalanları ve büyük ofis kompleksleri gibi kritik yapılarda tercih edilmektedir (Çetin et al., 2013; Geetha et al., 2021).

Video analitiği, güncel uygulamalarda yangın güvenliğinin kritik bir bileşenidir. Kameralar üzerinden çalışan sistemler, alev ve dumanın renk, hareket ve dokusal özelliklerini gerçek zamanlı analiz etmektedir (Dimitropoulos et al., 2014; Foggia et al., 2015). Bu sistemler, özellikle geniş alanlı tesislerde (rafineriler, tüneller, metro istasyonları) sahaya ek donanım yükü getirmeden güvenlik sağlar.

Son yıllarda CNN tabanlı çözümler, video tabanlı uygulamaların doğruluğunu artırmıştır. CNN-RNN hibritleri, alevin titreşim frekansını ve dumanın hareket paterni gibi zamansal özellikleri öğrenerek yanlış alarm oranını ciddi biçimde düşürmektedir (Cao et al., 2019; Dunning & Breckon, 2018; Choi et al., 2021). Bu nedenle video tabanlı sistemler, tek başına sensör çözümlerinin yetersiz kaldığı ortamlarda giderek daha fazla tercih edilmektedir (Gaur et al., 2020).

Modern uygulamalarda IoT destekli kablosuz sensör ağları öne çıkmaktadır. Bu sistemler, sensörlerden elde edilen verileri bulut veya kenar bilişim platformlarına aktararak anlık analiz ve risk değerlendirmesi yapabilmektedir (Yang et al., 2019; Zhang et al., 2020). Özellikle retrofit projelerde kablolu maliyetlerini ortadan kaldırması ve esnek kurulum imkânı sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir.

AIoT çözümleri ile entegre edilen kablosuz sistemler, yalnızca alarm üretmekle kalmayıp risk haritaları çıkarma, tahliye planlaması ve önleyici bakım gibi ileri fonksiyonlar sunmaktadır (Chang et al., 2021; Almeida et al., 2022).

Yangın algılamada kullanılan açık veri kümeleri, uygulamaların genelleştirilebilirliğini artırmak için kritik rol oynamaktadır. FISMO, DeepQuest ve SmokeyNet gibi veri kümeleri farklı çevresel koşulları temsil ederek, algoritmaların geniş sahalarda test edilmesine olanak tanımaktadır (Cazzolato et al., 2017; Dewangan et al., 2022). Bununla birlikte, hâlâ uzun menzil-düşük çözünürlük sahnelerinde ve yüksek etkinlikli (trafik, üretim hattı) ortamlarda genelleme sorunları devam etmektedir (Geetha et al., 2021; Wang et al., 2022).

Enerji tesisleri: Yüksek gerilim trafo merkezlerinde UV/IR alev dedektörleri kritik rol oynamaktadır.

Ulaşım altyapısı: Metro, tünel ve istasyonlarda video analitiği tabanlı çözümler yaygındır.

Kritik veri merkezleri: Aspirasyonlu duman dedektörleri (VESDA) ve AI destekli çok kriterli sensörler tercih edilmektedir.

Orman ve açık alanlar: Drone destekli kameralar ve CNN tabanlı video analiz sistemleri erken tespit için kullanılmaktadır (de Venâncio et al., 2022; de Venâncio et al., 2023).

4. TÜRKİYE VE DÜNYA'DA UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Türkiye'de AVM'ler, havaalanları ve metro sistemlerinde EN 54 uyumlu dedektörler ve NFPA standartlı paneller yaygın kullanılmaktadır. Avrupa'da akıllı şehir projeleri kapsamında yangın algılama sistemleri, trafik ve enerji altyapısıyla entegre edilmektedir. ABD'de ise özellikle yüksek katlı yapılar ve enerji tesislerinde NFPA 72'ye uygun ileri düzey çok kriterli dedektörler tercih edilmektedir. Günümüzde kullanılan yangın algılama teknolojileri Tablo 1'de paylaşılmıştır.

Tablo 1'de görüldüğü üzere, günümüzde kullanılan yangın algılama teknolojileri farklı algılama prensipleri,

avantajlar ve kullanım alanları açısından çeşitlilik göstermektedir.

Duman dedektörleri, yaygın kullanım ve düşük maliyet avantajıyla özellikle konutlar, ofisler ve ticari yapılarda birincil çözüm olarak öne çıkmaktadır. İyonizasyon tipi dedektörler hızlı gelişen alevli yangınlarda, fotoelektrik dedektörler ise yoğun duman üreten yavaş yangınlarda üstün performans sergilemektedir. Bu durum, algılama teknolojilerinin evriminde farklı yangın senaryolarına uyum sağlayan sistemlerin geliştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Günümüzde Kullanılan Yangın Algılama Teknolojileri

Dedektör Tipi	Algılama Prensipleri	Avantajları	Kullanım Alanları	İlgili Standart
Duman Dedektörleri	İyonizasyon (iyon akımı değişimi), Fotoelektrik (ışık saçılımı)	Erken algılama, düşük maliyet, yaygın kullanım	Konutlar, ofisler, alışveriş merkezleri	EN 54-7, NFPA 72
Isı Dedektörleri	Sıcaklık eşik değeri veya sıcaklık artış hızı ölçümü	Yüksek dayanıklılık, tozlu/yoğun dumanlı ortamlarda etkin	Depolar, endüstriyel tesisler, kazan daireleri	EN 54-5, NFPA 72
Alev Dedektörleri	UV (180–250 nm) ve/veya IR radyasyon algılama	Hızlı tepki, açık alevi doğrudan algılama	Petrol rafinerileri, gaz tesisleri, trafo merkezleri	NFPA 72, EN 54-10
Çok Kriterli Dedektörler	Duman + sıcaklık + gaz sensörlerinin birleşimi	Yanlış alarmı azaltır, yüksek güvenilirlik	Büyük ofisler, yüksek katlı binalar, havaalanları	NFPA 72, EN 54-29
Aspirasyonlu Dedektörler	Ortam havasının sürekli örneklenmesi (VESDA)	Çok yüksek hassasiyet, erken algılama	Veri merkezleri, laboratuvarlar, müzeler	NFPA 72, EN 54-20
Kablosuz (Wireless) Sistemler	Radio dalgaları üzerinden iletişim	Esnek kurulum, retrofit yapılarda kolay entegrasyon	Tarihi binalar, geçici yapılar, retrofit projeler	NFPA 72, EN 54-25
Adreslenebilir Sistemler	Her dedektörün bağımsız kimlik ile tanımlanması	Alarm noktasının kesin konum tespiti, hızlı müdahale	Büyük kampüsler, hastaneler, havaalanları	NFPA 72, EN 54-2/4

Isı dedektörleri, duman dedektörlerinin güvenilir çalışmadığı tozlu, nemli veya yüksek sıcaklık değişkenliğine sahip ortamlarda tercih edilmektedir. Bu tip dedektörler,

endüstriyel tesislerde ve depolarda kritik rol oynar. Bununla birlikte, yangını duman dedektörlerine kıyasla daha geç algılamaları, onları tamamlayıcı sistemler olarak konumlandırmaktadır.

Alev dedektörleri, UV ve IR spektrumunda ışınmı algılayarak özellikle petrokimya tesisleri, rafineriler ve yüksek gerilim trafo merkezleri gibi riskli alanlarda kullanılmaktadır. Bu dedektörler doğrudan açık alevi algılayabilmeleri sayesinde hızlı tepki süreleri ile öne çıkmaktadır. Ancak yanlış alarm olasılığını azaltmak için çoğunlukla UV/IR kombine sistemler tercih edilmektedir.

Çok kriterli (multisensor) dedektörler, birden fazla parametreyi (duman, sıcaklık, gaz konsantrasyonu) aynı anda izleyerek yanlış alarm sorununu en aza indirmekte ve yüksek güvenilirlik sunmaktadır. Özellikle büyük ölçekli yapılarda, yanlış alarmın maliyetinin çok yüksek olduğu havaalanları veya hastaneler gibi ortamlarda tercih edilmektedir.

Aspirasyonlu dedektörler (VESDA), ortam havasını sürekli örnekleyerek çok düşük konsantrasyonlu dumanı dahi algılayabilmektedir. Bu özellik, erken algılamının stratejik öneme sahip olduğu veri merkezleri, laboratuvarlar ve müzelerde bu sistemleri öne çıkarmaktadır.

Kablosuz sistemler, retrofit uygulamalarda veya tarihi yapılarda altyapı gerektirmemesi nedeniyle tercih edilmektedir. NFPA 72 ve EN 54-25 standartları, bu sistemlerin güvenli iletişim protokollerine sahip olmasını şart koşarak yaygın kullanımının önünü açmıştır.

Adreslenebilir sistemler ise modern yangın güvenliğinin en önemli bileşenlerinden biridir. Her dedektörün bağımsız adreslenmesi, alarmın noktasal konumunu tespit etmeyi sağlayarak müdahale süresini kısaltmaktadır. Özellikle büyük

kampüsler, hastaneler ve havaalanları gibi kompleks yapılarda vazgeçilmez bir çözüm haline gelmiştir.

Genel olarak tablo, yangın algılama teknolojilerinin günümüzde farklı senaryolara, mekânlara ve risk seviyelerine göre özelleştirildiğini göstermektedir. Ayrıca standartların (NFPA, EN 54) bu çeşitliliğin güvenli ve uyumlu bir şekilde uygulanmasını sağladığı açıkça görülmektedir.

5. GELECEK EĞİLİMLER

Yangın algılama teknolojilerinde geleceğin yönelimleri, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve kenar bilişim (edge computing) gibi gelişen dijital paradigmalara şekillenmektedir. Bu dönüşüm, sistemlerin yalnızca reaktif değil, aynı zamanda proaktif ve öngörücü hale gelmesini sağlayacaktır (Bu & Gharajeh, 2019; Gaur et al., 2020).

Gelecekte en belirgin eğilim, derin öğrenme tabanlı modellerin daha da yaygınlaşmasıdır. CNN, RNN ve hibrit mimariler, alev ve dumanın yalnızca görsel ipuçlarını değil, aynı zamanda zamansal örüntülerini de analiz ederek yanlış alarm oranlarını minimuma indirecek çözümler sunmaktadır (Cao et al., 2019; de Venâncio et al., 2022; de Venâncio et al., 2023). Özellikle spatio-temporal ağlar ve dikkat mekanizmaları, yangının erken evresinde güvenilir tespit olanağı sağlamaktadır (Cao et al., 2022; Choi et al., 2021).

IoT teknolojilerinin entegrasyonu ile dedektörler yalnızca alarm üretmeyecek, aynı zamanda gerçek zamanlı veri paylaşımı yaparak bina yönetim sistemleri, afet merkezleri ve akıllı şehir altyapıları ile entegre çalışacaktır (Yang et al., 2019; Zhang et al., 2020). Çok kriterli sensörlerden (duman-ısı-gaz) gelen verilerin IoT üzerinden füzyonu, yanlış alarm ihtimalini azaltacak ve

yüksek güvenilirlikli sistemler geliştirilmesine olanak sağlayacaktır (Geetha et al., 2021).

Yangın algılama sistemlerinde veri işleme kapasitesi, bulut yerine kenar cihazlara taşınmaktadır. Edge tabanlı CNN modelleri, düşük enerji tüketimli donanımlarda dahi gerçek zamanlı yangın tespiti yapabilmektedir (Almeida et al., 2022). Bu yaklaşım, özellikle gecikmenin kritik olduğu enerji tesisleri, metro sistemleri ve endüstriyel sahalarda ön plana çıkacaktır (Chang et al., 2021).

Yangın algılama sistemlerinden toplanan milyonlarca veri noktası, gelecekte büyük veri analitiği ile işlenecek ve risk haritaları oluşturulacaktır (Wang et al., 2022). Böylece itfaiye birimlerinin stratejik konumlandırılması, şehir ölçeğinde tahliye planları ve kritik bölgelerde önleyici tedbirler geliştirilebilecektir (Cazzolato et al., 2017; Dewangan et al., 2022).

Otonom sistemlerin yangın güvenliğinde rolü giderek artmaktadır. Drone'lar, geniş alanlarda erken alev/duman belirtilerini tespit ederken, robotik çözümler kapalı alanlarda sürekli gözetim sağlayacaktır (Dunnings & Breckon, 2018; Dimitropoulos et al., 2014). Bu teknolojiler, özellikle orman yangınları, depolama tesisleri ve ulaşım altyapılarında kritik katkılar sunacaktır.

Gelecekte yangın algılama sistemleri yalnızca performans açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik kriterleri ile de değerlendirilecektir. Düşük enerji tüketimli, çevre dostu malzemelerden üretilmiş ve geri dönüştürülebilir bileşenlerden oluşan sensörler, karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır (Geetha et al., 2021; Zhang et al., 2020). Yangın algılama teknolojilerinin gelecek yıllarda göstereceği eğilimler Tablo 2'de paylaşılmıştır.

Tablo 2. Yangın Algılama Teknolojilerinde Gelecek Eğilimler

Teknoloji / Yaklaşım	Temel Özellikler	Potansiyel Uygulama Alanları
Yapay Zekâ Tabanlı Sistemler	Makine öğrenmesi ile veri analizi, tahmine dayalı risk değerlendirmesi	Enerji santralleri, veri merkezleri, petrokimya tesisleri
IoT ve Sensör Füzyonu	Çoklu sensör verisinin entegrasyonu, gerçek zamanlı iletişim	Akıllı binalar, endüstriyel tesisler, konut projeleri
Büyük Veri Analitiği	Şehir ölçeğinde veri işleme, risk haritalama ve stratejik kaynak planlaması	Akıllı şehir yönetimi, afet yönetim merkezleri, belediye altyapıları
Dronlar ve Robotik Sistemler	Otonom gözetim, zor erişilen alanlarda sensör desteği	Orman yangınları, büyük depolama alanları, metro ve tünel sistemleri
Sürdürülebilir Sensörler	Düşük enerji tüketimi, çevre dostu malzemeler, geri dönüştürülebilir bileşenler	Yeşil binalar, sürdürülebilir şehir projeleri, çevre dostu endüstriler

Tablo 2’de görüldüğü üzere, yangın algılama teknolojilerinin geleceği akıllı, bütünleşik ve sürdürülebilir çözümler üzerine inşa edilmektedir. Her teknoloji, yangın güvenliğinin farklı bir boyutuna odaklanarak risklerin daha etkin yönetilmesine katkı sağlamaktadır.

Yapay zekâ tabanlı sistemler, mevcut dedektörlerin sınırlı kapasitesini aşarak tahmine dayalı güvenlik anlayışını gündeme getirmektedir. Özellikle enerji santralleri, veri merkezleri ve petrokimya tesisleri gibi kritik altyapılarda, büyük miktarda sensör verisinin analiz edilmesiyle yangın riski başlamadan önce öngörülebilecek, bu da müdahale süresini önemli ölçüde kısaltacaktır.

IoT ve sensör füzyonu, farklı tipteki dedektörlerin (duman, sıcaklık, gaz, alev) aynı ağ üzerinden birlikte çalışmasını sağlayarak yanlış alarm ihtimalini en aza indirecektir. Bu yaklaşım, akıllı binalar ve endüstriyel tesislerde entegre güvenlik yönetiminin önünü açmaktadır. Ayrıca konut projelerinde düşük maliyetli IoT cihazlarının yaygınlaşması, yangın güvenliğinin daha geniş kitlelere erişmesini mümkün kılacaktır.

Büyük veri analitiği, akıllı şehir ölçeğinde yangın güvenliği yönetimini mümkün kılmaktadır. Sensörlerden elde edilen milyonlarca verinin analiziyle risk haritaları oluşturulabilecek, yangına eğilimli bölgeler önceden tespit edilerek itfaiye teşkilatının stratejik konumlandırılması sağlanacaktır. Bu yaklaşım, özellikle yoğun nüfuslu metropollerde afet yönetimi kapasitesini ciddi biçimde artıracaktır.

Dronlar ve robotik sistemler, yangın algılamada yeni bir paradigma sunmaktadır. İnsan erişiminin zor olduğu bölgelerde otonom gözetim imkânı sağlayan bu sistemler, orman yangınlarının erken fark edilmesi veya yer altı metro/tünel sistemlerinde sürekli izleme gibi alanlarda kritik rol oynayacaktır. Ayrıca endüstriyel tesislerde robotik çözümler, sürekli gözetim sayesinde iş güvenliği risklerini azaltacaktır.

Son olarak, sürdürülebilir sensörler, geleceğin yangın güvenliği teknolojilerinde çevresel boyutu öne çıkarmaktadır. Düşük enerji tüketimli cihazlar, çevre dostu malzemeler ve geri dönüştürülebilir bileşenler sayesinde yangın güvenliği sistemleri yalnızca güvenlik açısından değil, karbon ayak izi azaltımı ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından da önem kazanacaktır.

Genel olarak tablo, yangın algılama teknolojilerinde geleceğin; proaktif, veri odaklı ve çevre dostu bir vizyon üzerine kurulduğunu açıkça göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Yangın algılama teknolojilerinin tarihsel gelişimi, manuel gözetim ve mekanik çözümlerden başlayarak elektronik sensörlere, dijitalleşmeye ve yapay zekâ destekli sistemlere uzanan çok boyutlu bir evrim süreci ortaya koymaktadır. Bu evrim, yalnızca teknolojik yeniliklerin sonucu değil, aynı

zamanda NFPA, EN 54, ATEX, IECEx gibi uluslararası standartların ve Türkiye'deki ulusal yönetmeliklerin yönlendirici etkisiyle şekillenmiştir.

Günümüzde duman, ısı ve alev dedektörleri gibi klasik çözümler hâlâ yaygın olarak kullanılmakla birlikte, adreslenebilir paneller, aspirasyonlu sistemler ve çok kriterli dedektörler modern güvenlik anlayışının temelini oluşturmaktadır. Yüksek riskli alanlarda (enerji santralleri, rafineriler, tüneller, veri merkezleri) ise özel çözümler ve standart uyumluluğu hayati önemdedir. Geleceğe bakıldığında, yangın algılama teknolojilerinde üç temel paradigma öne çıkmaktadır:

- Proaktif güvenlik: Yapay zekâ ve makine öğrenmesi sayesinde, yangın yalnızca algılanmakla kalmayacak; aynı zamanda önceden tahmin edilebilecektir.
- Entegrasyon ve veri odaklı yönetim: IoT ve büyük veri analitiği sayesinde sistemler, bina otomasyonu ve akıllı şehir altyapılarıyla entegre çalışarak bütüncül risk yönetimi sağlayacaktır.
- Sürdürülebilirlik: Çevre dostu malzemeler, düşük enerji tüketimli sensörler ve geri dönüştürülebilir bileşenler, yangın güvenliğini aynı zamanda yeşil bir teknoloji alanına dönüştüreceklerdir.

Sonuç olarak, yangın algılama teknolojilerinin evrimi, yalnızca can ve mal güvenliği için değil; aynı zamanda enerji güvenliği, şehir planlaması, sürdürülebilirlik ve akıllı şehir vizyonu açısından stratejik bir öneme sahiptir. Gelecek yıllarda bu teknolojilerin daha akıllı, öngörücü ve entegre hale gelmesi, yangın güvenliği alanında yeni bir çağın kapılarını aralayacaktır.

KAYNAKÇA

- Almeida, J. S., Huang, C., Nogueira, F. G., Bhatia, S., & de Albuquerque, V. H. C. (2022). EdgeFireSmoke: A lightweight CNN for real-time fire–smoke detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(11), 7889–7898.
- Bu, F., & Gharajeh, M. S. (2019). Intelligent and vision-based fire detection systems: A survey. *Image and Vision Computing*, 91, 103803.
- Cao, Y., Tang, Q., Xu, S., Li, F., & Lu, X. (2022). QuasiVSD: Efficient dual-frame smoke detection. *Neural Computing and Applications*, 34(11), 8539–8550.
- Cao, Y., Yang, F., Tang, Q., & Lu, X. (2019). Attention-enhanced BiLSTM for early forest fire smoke recognition. *IEEE Access*, 7, 154732–154742.
- Celik, T., & Demirel, H. (2009). Fire detection in video using a generic color model. *Fire Safety Journal*, 44(2), 147–158.
- Celik, T., Demirel, H., Ozkaramanli, H., & Uyguroglu, M. (2007). Fire detection via statistical color model. *J. Visual Communication and Image Representation*, 18(2), 176–185.
- Chen, T.-H., Wu, P.-H., & Chiou, Y.-C. (2004). An early fire-detection method based on image processing. In *ICIP* (Vol. 3, pp. 1707–1710).
- Chang, Z., Liu, S., Xiong, X., Cai, Z., & Tu, G. (2021). AIoT at the edge: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18), 13849–13875.
- Çetin, A. E., Dimitropoulos, K., et al. (2013). Video fire detection—Review. *Digital Signal Processing*, 23(6), 1827–1843.

- de Venâncio, P. V. A., Lisboa, A. C., & Barbosa, A. V. (2022). CNN-based fire detection for low-power devices. *Neural Computing and Applications*, 34(18), 15349–15368.
- de Venâncio, P. V. A., Campos, R. J., Rezende, T. M., Lisboa, A. C., & Barbosa, A. V. (2023). Hybrid fire detection with spatial–temporal patterns. *Neural Computing and Applications*, 35(13), 9349–9361.
- Dimitropoulos, K., Barmpoutis, P., & Grammalidis, N. (2014). Spatio-temporal flame modeling for video-based fire detection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 25(2), 339–351.
- Dunnings, A., & Breckon, T. (2018). CNN variants for real-time fire detection. In *ICIP* (pp. 1558–1562).
- Dewangan, A., Pande, Y., et al. (2022). FIgLib & SmokeyNet: Real-time wildland smoke detection. *Remote Sensing*, 14(4), 1007.
- Foggia, P., Saggese, A., & Vento, M. (2015). Real-time fire detection via experts on color/shape/motion. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 25(9), 1545–1556.
- Gaur, A., Singh, A., Kumar, A., Kumar, A., & Kapoor, K. (2020). Video flame/smoke fire detection: Review. *Fire Technology*, 56(5), 1943–1980.
- Geetha, S., Abhishek, C., & Akshayanat, C. (2021). Machine-vision-based fire detection: Survey. *Fire Technology*, 57(2), 591–623.
- Ko, B. C., & Cheong, K. H. (2018). Fire detection based on vision sensor and convolutional neural networks. *Fire Safety Journal*, 93, 41–47.

- Wang, J., Xu, X., & Chen, X. (2022). Emerging trends in fire safety: Applications of AI and IoT technologies. *Journal of Building Engineering*, 56, 104682.
- Yang, J., Liu, Z., & Li, J. (2019). Development of a wireless sensor network for fire detection in large buildings. *Automation in Construction*, 103, 1–12.
- Zhang, Y., Liu, J., & Wang, H. (2020). Internet of Things based intelligent fire monitoring and early warning system. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(11), 4705–4715.

ENDÜSTRİYEL İŞLETMELERDE ELEKTRİKLİ ŞARJ İSTASYONLARININ ETKİ ANALİZİ: ŞEBEKE, EKONOMİ VE OPTİMİZASYON PERSPEKTİFLERİ

Cihat Çağdaş UYDUR¹

1. GİRİŞ

Elektrikli araçların (EV) hızla artan penetrasyonu, endüstriyel tesislerde kurulu şarj altyapılarının şebeke-topoloji, güç kalitesi ve maliyet yapıları üzerindeki etkilerini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle hızlı şarj profilinin yarattığı ani yüklenmeler; transformatör sıcaklık artışı, yerel gerilim saptmaları ve tıkanıklık risklerini büyütürken, düşük gerilimli dağıtım sistemlerinin barındırma kapasitesine ilişkin kısıtları görünür kılmaktadır (Shariff et al., 2022; Rahman et al., 2022; Kaushik et al., 2022; Dik et al., 2022). Bu etkiler, üretim hatları ve yardımcı tesis yükleriyle eşzamanlı yürüyen şarj operasyonlarında pik talep ve reaktif/aktif güç akışlarının birlikte yönetilmesini gerektirir. Dolayısıyla endüstriyel işletmelerde şarj istasyonlarının planlanması, yalnız teknik uygunluk değil; talep yanıtı, yatırım geri dönüşü ve süreç sürekliliği açısından da çok ölçütlü bir optimizasyon problemidir.

Bu resimde çift yönlü enerji alışverişi (V2G) ve akıllı şarj yaklaşımları, hem şebeke esnekliğini artırma hem de enerji maliyetlerini düşürme potansiyeliyle öne çıkmaktadır. V2G'nin teknik/ekonomik çerçevesi kadar, kullanıcı davranışı, iş modelleri, kabul ve adalet gibi sosyal boyutları da başarının

¹ Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, Edirne Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, ccagdasuydur@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0908-2722.

belirleyicileridir (Sovacool et al., 2018; Sovacool et al., 2020; Noel et al., 2019; Sassi et al., 2019; Vadi et al., 2019). Standartlar ve iletişim topolojileri (V2G/V2H) ile kablosuz şarj seçenekleri; uygulamada güvenilirlik, siber güvenlik ve birlikte çalışabilirlik gereksinimlerini artırmaktadır (Sassi et al., 2019; Vadi et al., 2019).

Dinamik fiyatlandırma ve akıllı şarj stratejileri endüstriyel kullanıcıların pik talep ücretlerini ve enerji birim maliyetini azaltmada etkili araçlardır. Literatürde; zaman-of-kullanım (ToU), gerçek zamanlı fiyatlar (RTP), hatta oyun kuramı tabanlı farklılaştırılmış fiyatlandırma ve açık artırma mekanizmaları ile EV kullanıcı davranışının modele dahil edildiği çalışmalar mevcuttur (Amin et al., 2020; Sadeghian et al., 2022; Nerkar et al., 2022). Bu yaklaşımların endüstriyel kurguya uyarlanmasında, üretim planları ve vardiya çizelgeleriyle eşgüdümlü şarj politikaları kritik rol oynar.

Son dönemde, dağıtım seviyesinde konumsal marjinal fiyatlandırma (DLMP) kavramı; EV şarj istasyonlarının (EVCS) işletmesini, şebeke kısıtlarıyla pazar sinyallerini birleştirerek optimize etmek için güçlü bir çerçeve sunmaktadır. P2P/P2G işlem platformları, üç seviyeli (tri-level) modeller, Lagrange ayrıştırma, ikinci merteye konik programlama veya çok bloklu ADMM gibi çözüm yöntemleri DLMP'nin pratikleştirilmesinde kullanılmıştır (Ullah & Park, 2022; Wang et al., 2021; Hu et al., 2022; Jangid et al., 2022; Patnam & Pindoriya, 2021; Kol & Poyrazoglu, 2024; He et al., 2021). Bu literatür; gerilim/genel güç denge eşitlikleri, hat/trafo kapasiteleri, SoC dinamikleri ve EV varış/ayrılış belirsizliklerini birlikte ele alır; böylece endüstriyel kampüslerde trafik-güç birleşik optimizasyonu mümkün hâle gelir. Fiyatlandırma modelleri Tablo 1'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Fiyatlandırma Modelleri Karşılaştırması

Fiyatlandırma Modeli	Temel Özellik	Avantaj	Dezavantaj	Endüstriyel Uygulama Potansiyeli
Düz Tarife	Tüm zamanlarda sabit fiyat	Basitlik, anlaşılır yapı	Talep dalgalanmalarını yansıtmaz, esneklik sağlamaz	Düşük; endüstriyel yükler için maliyet avantajı yaratmaz
ToU (Zaman-Of-Kullanım)	Günün belirli saatlerine farklı tarifeler	Pik talep azaltımı için yönlendirici	Sabit dilimler gerçek zamanlı durumu yansıtmaz	Orta; vardiya düzeni olan işletmelerde uygulanabilir
RTP (Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma)	Fiyatlar saatlik/günlük piyasa koşullarına göre değişir	Esnek, arz-talep dengesine duyarlı	Yüksek belirsizlik, kullanıcı memnuniyetinde düşüş	Orta-Yüksek; enerji maliyetlerini optimize etmek isteyen işletmeler için
Oyun Kuramı Tabanlı	Aktörler arası stratejik etkileşime göre fiyat	Adalet, kullanıcı davranışını modelleme	Hesaplama karmaşıklığı, uygulanabilirlik sorunu	Orta; çok sayıda istasyona sahip OSB'lerde

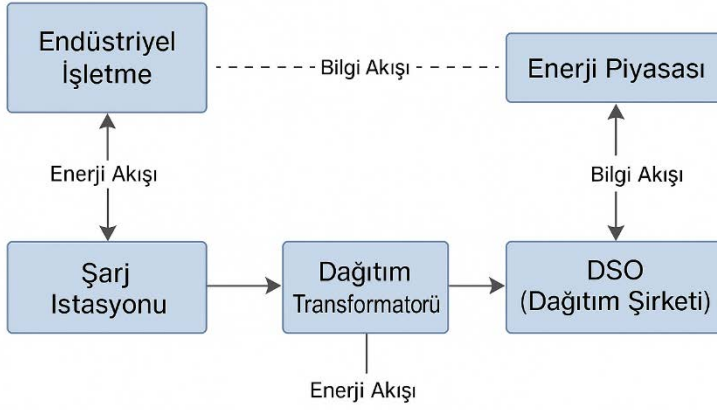
Tablo 1’den görüldüğü üzere, düz ve ToU tarifeler basitlik sağlarken endüstriyel bağlamda sınırlı fayda sunmaktadır. Buna karşılık DLMP, şebeke kısıtlarını fiyatlara doğrudan yansıtması sayesinde uzun vadede en uygulanabilir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Bununla bağlantılı olarak agregatör temelli işletme kurguları, DSO ile koordinasyonu güçlendirir; gün-öncesi planlama, ikincil/yedek piyasaları ve esneklik hizmetleriyle entegre modeller, hem işletme kârını hem de şebeke güvenilirliğini artırır (Nasiri et al., 2024; Cha et al., 2023; Suryakiran et al., 2023; Jangid et al., 2023). Endüstriyel kampüslerde –özellikle OSB ve fabrika kümelerinde– akıllı istasyonlar, PV-ESS varlıklarıyla birlikte santral benzeri yönetilebilen birimlere dönüşür; bu da gelir çeşitlendirmesi (arz-tarafı katılım) ve maliyet azaltımı (talep-tarafı katılım) için ortak bir zemindir (Li et al., 2023; Zhang et al., 2023; Moghadam & Javidi, 2022).

Operasyonel tarafta, hiyerarşik/çok katmanlı planlama, oyun kuramı (Stackelberg, Nash-Harsanyi vb.), derin takviyeli öğrenme ve kümelenmiş ayrıştırma gibi yöntemler; endüstriyel ölçekli şarj ağlarında ölçeklenebilirlik ve mahremiyet avantajları sağlar. Dağıtık/dezentrale çizelgeleme, bilevel/tri-level amaç fonksiyonları ve konveks relaksasyonlar (SOCP vb.) ile gerçek zamanlıya yakın uygulanabilirlik artar (Ye et al., 2023; Meng et al., 2024). Buna paralel olarak, dinamik fiyatlandırma tarafında gelir eniyilemesi ve tıkanıklık dağıtımı için farklılaştırılmış tarife çalışmaları, endüstriyel istasyonların kapasite kullanımını dengelemeyi hedefler (Kazemtarghi et al., 2024).

Öte yandan, kamusal ve konut+endüstriyel karışık bölgelerde akıllı şarjın depo kullanımı ve şebeke stabilitesi üzerindeki etkileri de nicel olarak incelenmiş; lineer programlama tabanlı modellerin depolama kapasitesi ile şarj talebi arasındaki yük dengelemesi ve gerilim/akım kısıtlarını nasıl iyileştirdiği gösterilmiştir (Khalid et al., 2024). Bu bulgular, endüstriyel tesislerin enerji yönetim sistemleri (EMS) içine şarj istasyonlarını birincil sınırlayıcı olarak değil, esneklik sağlayıcı olarak konumlandırmanın önemini teyit etmektedir.

Toparlarsak: Endüstriyel işletmelerde EV şarj istasyonları; (i) şebeke kısıtlarını gözeterek DLMP ve pazar-tabanlı düzenlemelerle, (ii) V2G/akıllı şarj sayesinde esneklik ve maliyet azaltımı amaçlarıyla, (iii) oyun kuramı ve öğrenme tabanlı gerçek zamanlı politikalarla bütünleştiğinde, hem enerji verimliliği hem de sürdürülebilirlik açısından anlamlı bir net fayda sunmaktadır (Ullah & Park, 2022; Wang et al., 2021; Sovacool et al., 2020; Ye et al., 2023; Kazemtarghi et al., 2024). Türkiye’de OSB’ler gibi yoğun sanayi kümeleri için, bu literatür; trafik-güç eşbütünleşmesi, agregatör-DSO etkileşimi ve endüstriyel süreçlerle eşgüdümlü şarj ilkelerini, sahaya uygulanabilir yol haritalarına dönüştürmek üzere güçlü bir zemin sunuyor.



Şekil 1. Endüstriyel işletme, elektrikli araç şarj istasyonu, dağıtım transformatörü, dağıtım şirketi (DSO) ve enerji piyasası arasındaki enerji ve bilgi akışlarını gösteren şematik diyagram

Şekil 1, endüstriyel tesislerde şarj istasyonlarının yalnızca işletme içinde değil, aynı zamanda dağıtım transformatörü, DSO ve enerji piyasası ile çok katmanlı bir etkileşim içinde olduğunu göstermektedir. Bu yapı, şarj istasyonlarının şebeke esnekliğinde bir yük veya kaynak olabilmesini, DSO ile çift yönlü iletişim ve piyasa sinyalleri aracılığıyla fiyatlandırmaya katılmasını mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla endüstriyel şarj operasyonları, yalnız teknik bir konu değil aynı zamanda piyasa entegrasyonu ve enerji yönetim sistemleriyle bütünleşik bir süreçtir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, endüstriyel işletmelerde elektrikli araç (EV) şarj istasyonlarının etkisini, güncel literatürün içerik ve yöntem çeşitliliğini dikkate alarak yürütülen anlatımsal ve tematik bir literatür incelemesi ile ele almaktadır. Önce, EV şarj operasyonunu doğrudan etkileyen dört eksen tanımlandı: (i) fiyatlandırma ve piyasa dinamikleri (düz tarife, zaman-of-kullanım, gerçek zamanlı ve oyun kuramı tabanlı/düzenli fiyatlandırma ile dağıtım düzeyi konumsal marjinal fiyatlandırma

– DLMP), (ii) akıllı şarj ve çift yönlü enerji alışverişi (Vehicle-to-Grid, V2G), (iii) şebeke işletimi/kalitesi (gerilim profilleri, trafo ve hat yüklenmesi, harmonikler) ve (iv) optimizasyon teknikleri (Model Predictive Control – MPC, Takviyeli Öğrenme – RL, stokastik ve dağıtık/mahremiyet korumalı yöntemler). Bu eksenler, referans alınan kapsamlı derlemenin (Ghanbari Motlagh, Oladigbolu ve Li, 2025) içerik mimarisinden ve makaledeki boşluk/katkı analizinden türetilmiştir; ilgili derleme, MPC ve RL gibi gerçek-zamanlı yöntemlerin literatürde eksik işlendiğini vurgulayarak bütünsel bir sınıflandırma çerçevesi önermekte, DLMP ve oyun-temelli fiyatlamanın pratikteki karşılığını ve düzenlemeye uzanan yol haritasını özetlemektedir (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Kaynak taraması 2020 sonrasına ağırlık verecek şekilde yapılandırıldı; teknik (şebeke etkileri/kalite), ekonomik (tarife ve gelir-maliyet optimizasyonu), işletmesel (agregatör ve istasyon işletimi) ve yöntemsel (MPC, RL, dağıtık çözüm) alt başlıklar altında sınıflandırma yapıldı. Fiyatlandırma alt başlığında statik (düz), önceden belirlenmiş dinamik (ör. ToU, talep ücretleri), öngörüye dayalı gerçek zamanlı (ör. RL ile) ve oyun kuramı/bileviyeli yaklaşımlar ile DLMP ayrı kümeler olarak incelendi (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

İnceleme, yalnız tekniği değil aynı zamanda ekonomi, belirsizlikler ve kullanıcı davranışı boyutlarını birlikte ele alan çalışmalara öncelik verdi; zira derleme, EV-şebeke etkileşiminin salt planlamadan ziyade işletme optimizasyonu ve gerçek zamanlı karar penceresinde değerlendirilmesini önermektedir (MPC/RL ve dağıtık yöntemler) (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Son aşamada, bulgular Türkiye’deki OSB/kampüs tipi endüstriyel bağlam düşünülerek yorumlandı; burada amaç, literatürdeki yöntem ve sonuçların uygulanabilir politika ve işletme çözümlerine nasıl çevrilebileceğini berraklaştırmaktı.

3. BULGULAR

Literatür, endüstriyel işletmelerde şarj istasyonlarının etkisini çok boyutlu ve birbirine bağlı bir yapı olarak resmetmektedir. Şebeke etkileri tarafında, eşzamanlı ve hızlı şarjın yarattığı ani talep sıçramaları; gerilim dalgalanmaları/kararsızlıkları, frekans sapmaları ve trafo aşırı yüklenmesi gibi sorunları tetikleyebilir. Güç elektroniği ağırlıklı şarj altyapısı, harmonik bozulma ve düşük güç faktörü gibi kalite sorunlarını da gündeme getirir; bu ise kompanzasyon ve yerel güç kalitesi iyileştirmelerini zorunlu kılar. Büyük ölçekli kümelenmelerde yerel tıkanıklık ve hat yüklenmesi riski belirginleşir; artan dijitalleşme de siber riskleri büyütür (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Bu tablo, plansız şarjın sistem maliyetlerini yükselttiğini ve ileri düzey çizelgeleme ile akıllı yönetim ihtiyacını ortaya koyar.

Fiyatlandırma ve piyasa dinamikleri alanında, literatür beş ana şemayı ayırt eder: düz tarife, önceden belirlenmiş dinamik (ör. ToU, talep ücretleri), öngörüye dayalı gerçek zamanlı (ör. RL tabanlı), oyun kuramı/bileviyeli (Stackelberg, Nash, müzayedeye vb.) ve DLMP. Düz tarife basit ama etkisizdir; ToU gibi önceden belirlenmiş programlar öngörülebilirlik sağlar; öngörüye dayalı gerçek zamanlı yaklaşımlar, operatör tercih ve verilerine yaslandığından kullanıcı takip edilebilirliğini zorlaştırabilir; oyun-temelli modeller çok-aktör etkileşimlerini ve adalet boyutunu daha iyi yakalarken piyasada güç yoğunlaşması riski taşır; DLMP ise şebeke kısıtlarını fiyatlara yerel ve zaman-duyarlı biçimde yansıtarak arz-talep dengesini sistem öncelikleriyle hizalar (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Tablo özetleri, oyun-temelli çalışmalarda hiyerarşik karar ve adil tahsis amaçlarının; DLMP çalışmalarında ise gerilim sınırları, hat/trafo kapasiteleri, aktif-reaktif denge ve SoC

dinamikleri gibi güvenli işletme kısıtlarının merkeze alındığını göstermektedir (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Gelir-maliyet optimizasyonu açısından, V2G senaryolarında elde edilen gelir ile batarya yaşlanma maliyeti arasındaki denge kilitlidir. Literatür, gelir terimleriyle birlikte hem takvimsel hem çevrimsel yaşlanma bileşenlerinin modellendiğini; ayrıntılı yaşlanma fonksiyonlarının doğrusal olmayan yapısı nedeniyle pratikte parçalı doğrusal yaklaşımların kullanıldığını vurgular. Böylece hesaplanabilirlik korunurken makul doğruluk yakalanır (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Ayrıca enerji tedarik maliyetinin ToU/DR programlarıyla düşürülebileceği; fiyat, EV yükü ve yenilenebilir üretim belirsizliklerinin yönetiminin sonuçları belirgin etkilediği; akıllı çizelgeleme ile bakım ve kayıp maliyetlerinin azaltılabildiği ortaya konur (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Akıllı şarj ve V2G çözümleri, endüstriyel bağlamda yenilenebilir entegrasyonunu kolaylaştırırken kullanıcı davranışı ve tesis kısıtlarıyla gerçek zamanlı uyum gerektirir. Çalışmalar, RL ve kümelenmiş/dağıtık yöntemler gibi öğrenme tabanlı tekniklerin, kullanıcı memnuniyetini ve ölçeklenebilirliği korurken yönetim kalitesini artırdığını; DRO/ADMM/SOCP gibi araçların ise belirsizlik ve mahremiyet gereksinimlerini karşılamaya yardımcı olduğunu göstermektedir (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Şarj çözümleri Tablo 2’de incelenmiştir.



Şekil 2. V2G (Vehicle-to-Grid) senaryosunda elektrikli aracın, şarj istasyonu aracılığıyla şebekeye pik saatlerde enerji sağlaması ve gece saatlerinde şebekeden enerji alarak şarj olması sürecini gösteren akış diyagramı

Şekil 2’de görüldüğü üzere, V2G yaklaşımı elektrikli araçların yalnızca tüketici değil aynı zamanda enerji sağlayıcı olarak da işlev görmesini mümkün kılmaktadır. Endüstriyel işletmelerde bu strateji, pik saatlerde şebeke üzerindeki yükü azaltmak için araç bataryalarının devreye girmesini; düşük talep saatlerinde ise daha ucuz tarifelerle bataryaların yeniden şarj edilmesini sağlar. Böylece hem işletme maliyetleri optimize edilir hem de şebeke esnekliği artırılır. Ancak batarya yaşlanma maliyetleri ve kullanıcı kabulü bu sürecin kritik sınırlayıcılarıdır.

Tablo 2. V2G ve Akıllı Şarj Çözümleri Karşılaştırması

Yöntem	Kullanım Alanı	Sağladığı Faydalar	Karşılaşılan Kısıtlar
V2G (Araçtan-Şebekeye)	Endüstriyel tesisler, kampüsler	Pik yük azaltımı, ek gelir yaratımı	Batarya ömrü maliyeti, kullanıcı kabulü
Akıllı Şarj (Merkezi Kontrol)	OSB’ler, fabrikalar	Talep yönetimi, maliyet düşüşü, şebeke dostu yük profili	Haberleşme altyapısı ihtiyacı, koordinasyon zorluğu
RL (Takviyeli Öğrenme)	Büyük ölçekli istasyon ağları	Belirsizliklere karşı adaptif çözümler, gerçek zamanlı optimizasyon	Eğitim verisi ihtiyacı, hesaplama karmaşıklığı
MPC (Model Predictive Control)	Kritik yük barındıran tesisler	Kısıtları gözeterek güvenli işletim, öngörülebilir kontrol	Kısa öngörü ufkı, hesaplama yükü
Dağıtık Optimizasyon	Çoklu işletme/istasyon ağı	Mahremiyet, ölçeklenebilirlik, düşük haberleşme yükü	Küresel optimuma ulaşmada zorluk

Tablo 2’de özetlenen karşılaştırma, endüstriyel işletmelerde farklı optimizasyon yöntemlerinin tamamlayıcı olduğunu göstermektedir. RL belirsizliklere karşı güçlü iken MPC kısıtlarla güvenli işletim sunmaktadır; dağıtık yöntemler ise OSB ölçeğinde mahremiyet ve ölçeklenebilirlik avantajı sağlamaktadır.

Öte yandan oyun-temelli/DLMP tabanlı fiyatlamının saha uygulamaları hâlâ sınırlıdır; gerçek zamanlı, yüksek çözünürlüklü veri ve piyasa/uzlaştırma altyapısı ihtiyacı, hesaplama karmaşıklığı ve düzenleyici çerçeve eksikleri önemli uygulama engelleridir (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Optimizasyon teknikleri tarafında, derleme MPC’nin öngörü ufkı ve kısıtlarla güvenli işletim yeteneğini; RL’nin model-bilmez (model-free) doğasıyla gerçek zamanda belirsizlikleri yönetme becerisini vurgular. Çok yollu (multi-level) ve dağıtık bileşenler, mahremiyet ve haberleşme yükünü azaltırken ölçeklenebilir çözümler sunar. Bu bakımdan, endüstriyel kampüslerde üretim planlarıyla eşgüdümlü akıllı şarj,

şebeke kısıtlarını ihlal etmeden maliyetleri düşürmenin anahtarı olarak öne çıkar (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

TBulgular, endüstriyel tesislerde EV şarj istasyonlarının etkisini teknik–ekonomik–işletmesel bir üçgende ele almak gerektiğini göstermektedir. Teknik açıdan, şebeke güvenliği (gerilim sınırları, hat/trafo kapasiteleri ve güç kalitesi) kırmızı çizgidir; bu nedenle tarife sinyali ile şebeke kısıtlarını aynı modelde birleştiren DLMP yaklaşımı, kampüs/OSB türü yoğunlaşmalarda etkili bir araçtır. Ekonomik açıdan, ToU/DR gibi öngörülebilir programlar kısa vadede işletmelerin maliyet görünürliğini artırırken, öngörüye dayalı gerçek zamanlı ve oyun-temelli kurgular daha karmaşık ama potansiyel olarak daha verimli çözümler sunar; burada piyasa gücü, adalet ve kullanıcı memnuniyeti gibi hususlar dikkatle yönetilmelidir (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

V2G, endüstriyel işletmelerde pik talep azaltımı ve gelir çeşitlendirmesi için cezbedici bir opsiyondur; ancak batarya yaşlanma maliyetleri hesaba katılmadıkça beklenen faydalar eksik tahmin edilir. Literatürde bu maliyetlerin takvimsel ve çevrimsel bileşenlerle modellendiği ve çoğu senaryoda parçalı doğrusal yaklaşımların tercih edildiği görülür; bu, hem hesaplanabilirliği hem de yaklaşım doğruluğunu dengeleyen pratik bir çözümdür (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Endüstriyel bağlamda V2G'nin EMS ile entegrasyonu, deşarj derinliği ve çevrim sayısını sınırlayan politika kuralları ve öğrenme tabanlı optimizasyonla desteklenmelidir.

Yöntemsel olarak, MPC ve RL birlikte düşünüldüğünde güçlü bir ikilidir: MPC, kısıtlı bir ufukta güvenli işletimi garanti ederken RL, kullanıcı davranışı/yenilenebilir üretim/ fiyat belirsizliklerine karşı uyarlanabilir politika üretir.

Dağıtık/ADMM türü yaklaşımlar, çok sayıda istasyon ve kullanıcıyı içeren endüstriyel ağlarda mahremiyet ve hesaplanabilirlik arasında iyi bir denge kurar (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Bu da Türkiye’de akıllı OSB vizyonu için uygulanabilir bir rota çizer.

Bununla birlikte, uygulama engelleri göz ardı edilmemelidir. DLMP/oyun-temelli şemaların gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlüklü veri ihtiyacı, hesaplama karmaşıklığı ve uzlaştırma süreçlerine entegrasyon gereksinimi büyüktür; düzenleyici çerçeve, şeffaflık ve tüketici korunması koşullarının netleşmesi gerekir. Ayrıca katılımcı tepkilerinin belirsizliği ve güven sorunları yaygınlaşmanın önündeki diğer engellerdir (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Bu sebeple tartışmanın somut çıktısı, endüstriyel işletmeler için aşamalı bir yol haritasıdır: (i) kısa vadede ToU/DR ile akıllı şarj ve güç kalitesi iyileştirmeleri; (ii) orta vadede RL/MPC destekli gerçek-zamanlı çizelgeleme ve agregatör-DSO eşgüdümü; (iii) uzun vadede DLMP tabanlı fiyatlandırma ve V2G’nin yaygınlaştırılması. Bu yolun her aşamasında siber güvenlik, veri mahremiyeti ve çok enerjili (elektrik-ısı-hidrojen) eşleştirme gibi yükselen başlıklara özel dikkat gerekir (Ghanbari Motlagh vd., 2025).

Tablo 3. Endüstriyel İşletmelerde EV Şarj İstasyonlarının Etkileri

Boyut	Ortaya Çıkan Sorunlar	Literatürde Önerilen Çözümler	Örnek Kaynaklar
Şebeke	Gerilim dalgalanmaları, trafo aşırı yüklenmesi, harmonikler	Akıllı şarj stratejileri, DLMP, güç kalitesi iyileştirmeleri	Shariff et al. (2022), Rahman et al. (2022)
Ekonomi	Yüksek enerji maliyeti, adaletsiz fiyat dağılımı	ToU, RTP, DLMP tabanlı fiyatlandırma	Amin et al. (2020), Ullah & Park (2022)
İşletme	Pik yükler, üretim sürekliliği riski	V2G, EMS entegrasyonu, RL tabanlı kontrol	Sovacool et al. (2020), Meng et al. (2024)
Sosyal	Kullanıcı kabulü, güven eksikliği	Oyun kuramı, şeffaf tarife mekanizmaları, sosyal farkındalık	Noel et al. (2019), Sovacool et al. (2018)

Tablo 3, endüstriyel şarj istasyonlarının çok boyutlu etkilerini bütüncül olarak ortaya koymaktadır. Görüldüğü üzere, şebeke etkileri teknik çözümlerle hafifletilebilirken, sosyal kabul ve kullanıcı davranışı boyutunda daha kapsamlı stratejilere ihtiyaç vardır.

Sonuç olarak, endüstriyel işletmelerde EV şarj istasyonlarının etkisi, doğru fiyat sinyalleri ve akıllı operasyon ile bir risk olmaktan çıkıp esneklik ve değer yaratma aracına dönüşebilir. Literatür, bunun mümkün olduğunu ama düzenleme, veri ve hesaplama üçgeninde iyileştirme gerektiğini açık biçimde göstermektedir (Ghanbari Motlagh vd., 2025). Gelecek çalışmalar için öncelik; Türkiye’de pilot uygulamalar ile DIgSILENT/Matlab destekli senaryo bazlı doğrulama ve regülasyon-tasarım etkileşiminin birlikte ele alındığı saha geçerliliği adımları olmalıdır.

KAYNAKÇA

- Amin, A., Tareen, W. U. K., Usman, M., Ali, H., Bari, I., Horan, B., et al. (2020). A review of optimal charging strategy for electric vehicles under dynamic pricing schemes in the distribution charging network. *Sustainability*, 12, 10160. <https://doi.org/10.3390/su122310160>
- Cha, H., Chae, M., Zamee, M. A., & Won, D. (2023). Operation strategy of EV aggregators considering EV driving model and distribution system operation in integrated power and transportation systems. *IEEE Access*, 11, 25386–25400. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251356>
- Dik, A., Omer, S., & Boukhanouf, R. (2022). Electric vehicles: V2G for rapid, safe, and green EV penetration. *Energies*, 15, 803. <https://doi.org/10.3390/en15030803>
- He, Y., Chen, Q., Yang, J., Cai, Y., & Wang, X. (2021). A multi-block ADMM based approach for distribution market clearing with distribution locational marginal price. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 128, 106635. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106635>
- Hu, Y., Wu, X., Cao, J., Wang, P., Wu, Y., & Zhou, X. (2022). Distributed optimal scheduling for aggregated electric vehicles and photovoltaic considering dynamic distribution locational marginal price. In *Proceedings of the 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 2100–2105). <https://doi.org/10.1109/EI256261.2022.10116635>
- Jangid, B., Mathuria, P., & Gupta, V. (2022). Reactive DLMP for hierarchical energy management and optimal reactive power response from EVs. In *Proceedings of the 22nd National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 278–

283).

<https://doi.org/10.1109/NPSC57038.2022.10069172>

- Jangid, B., Mathuria, P., & Gupta, V. (2023). A hierarchical scheduling framework for DSO and shiftable load aggregator. *Electric Power Systems Research*, 225, 109861. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109861>
- Kaushik, E., Prakash, V., Mahela, O. P., Khan, B., El-Shahat, A., & Abdelaziz, A. Y. (2022). Comprehensive overview of power system flexibility during the scenario of high penetration of renewable energy in utility grid. *Energies*, 15, 516. <https://doi.org/10.3390/en15020516>
- Kazemtarghi, A., Mallik, A., & Chen, Y. (2024). Dynamic pricing strategy for electric vehicle charging stations to distribute the congestion and maximize the revenue. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 158, 109946. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109946>
- Khalid, M., Thakur, J., Bhagavathy, S. M., & Topel, M. (2024). Impact of public and residential smart EV charging on distribution power grid equipped with storage. *Sustainable Cities and Society*, 104, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105272>
- Kol, S., & Poyrazoglu, G. (2024). Electric vehicle charging implications on distribution locational marginal prices. In *Proceedings of the 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/EEM60825.2024.10608919>
- Li, G., Yang, J., Hu, Z., Zhu, X., Xu, J., Sun, Y., et al. (2023). A novel price-driven energy sharing mechanism for charging station operators. *Energy Economics*, 118, 106518. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106518>

- Meng, W., Song, D., Huang, L., Chen, X., Yang, J., Dong, M., et al. (2024). Distributed energy management of electric vehicle charging stations based on hierarchical pricing mechanism and aggregate feasible regions. *Energy*, 291, 130332. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130332>
- Moghadam, A. Z., & Javidi, M. H. (2022). Designing a two-stage transactive energy system for future distribution networks in the presence of prosumers' P2P transactions. *Electric Power Systems Research*, 211, 108202. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108202>
- Nasiri, N., Zeynali, S., Ravadanegh, S. N., & Kubler, S. (2024). Moment-based distributionally robust peer-to-peer transactive energy trading framework between networked microgrids, smart parking lots and electricity distribution network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15, 1965–1977. <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3296917>
- Nerkar, M., Mukherjee, A., & Soni, B. P. (2022). A review on optimization scheduling methods of charging and discharging of EV. In *International Conference on Smart Grid and Electric Vehicle (ICSGEV 2021)* (p. 040002). <https://doi.org/10.1063/5.0114625>
- Noel, L., de Rubens, G. Z., Kester, J., & Sovacool, B. K. (2019). The technical challenges to V2G. In *Vehicle-to-Grid* (pp. 65–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04864-8_3
- Patnam, B. S. K., & Pindoriya, N. M. (2021). DLMP calculation and congestion minimization with EV aggregator loading in a distribution network using bilevel program. *IEEE Systems Journal*, 15, 1835–1846. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2997189>

- Rahman, S., Khan, I. A., Khan, A. A., Mallik, A., & Nadeem, M. F. (2022). Comprehensive review and impact analysis of integrating projected electric vehicle charging load to the existing low voltage distribution system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111756>
- Sadeghian, O., Oshnoei, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Vahidinasab, V., & Anvari-Moghaddam, A. (2022). A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 54, 105241. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105241>
- Sassi, H. B., Errahimi, F., Essbai, N., & Alaoui, C. (2019). V2G and wireless V2G concepts: State of the art and current challenges. In *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723851>
- Shariff, S. M., Alam, M. S., Hameed, S., Khalid, M. R., Ahmad, A., Al-Ammar, E. A., et al. (2022). A state-of-the-art review on the impact of fast EV charging on the utility sector. *Energy Storage*, 4. <https://doi.org/10.1002/est2.300>
- Sovacool, B. K., Kester, J., Noel, L., & de Rubens, G. Z. (2020). Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109963>
- Sovacool, B. K., Noel, L., Axsen, J., & Kempton, W. (2018). The neglected social dimensions to a vehicle-to-grid (V2G) transition: A critical and systematic review. *Environmental Research Letters*, 13, 013001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c6d>

- Suryakiran, B., Nizami, S., Verma, A., Saha, T. K., & Mishra, S. (2023). A DSO-based day-ahead market mechanism for optimal operational planning of active distribution network. *Energy*, 282, 128902. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128902>
- Ullah, M. H., & Park, J.-D. (2022). DLMP integrated P2P2G energy trading in distribution-level grid-interactive transactive energy systems. *Applied Energy*, 312, 118592. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118592>
- Vadi, S., Bayindir, R., Colak, A. M., & Hossain, E. (2019). A review on communication standards and charging topologies of V2G and V2H operation strategies. *Energies*, 12, 3748. <https://doi.org/10.3390/en12193748>
- Wang, X., Li, F., Dong, J., Olama, M. M., Zhang, Q., Shi, Q., et al. (2021). Tri-level scheduling model considering residential demand flexibility of aggregated HVACs and EVs under distribution LMP. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12, 3990–4002. <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3075386>
- Ye, Y., Wang, H., Cui, T., Yang, X., Yang, S., & Zhang, M.-L. (2023). Identifying generalizable equilibrium pricing strategies for charging service providers in coupled power and transportation networks. *Advanced Applied Energy*, 12, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100151>
- Zhang, C., Peng, K., Guo, L., Xiao, C., Zhang, X., & Zhao, Z. (2023). An EVs charging guiding strategy for the coupling system of road network and distribution network based on the PT3. *Electric Power Systems Research*, 214, 108839. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108839>

APPLICATIONS OF CONVOLUTION NEURAL NETWORKS IN MEDICINE: AN ENGINEERING PERSPECTIVE

Hidir Selcuk NOGAY¹

1. INTRODUCTION

Medical imaging plays a vital role in modern healthcare, offering non-invasive insights into anatomical and physiological processes. Modalities such as magnetic resonance imaging (MRI), computed tomography (CT), ultrasound (US), positron emission tomography (PET), and X-ray generate vast amounts of data daily. However, analyzing these high-dimensional and complex datasets is challenging, time-consuming, and often subject to inter-observer variability among clinicians (Alabduljabbar et al., 2024).

Recent advances in artificial intelligence (AI), particularly deep learning (DL), have transformed the ability to automatically extract meaningful information from medical images (Giger 2018). Among deep learning architectures, Convolutional Neural Networks (CNNs) have shown remarkable success in tasks such as image classification, segmentation, detection, and prognostic prediction. Originally designed for computer vision tasks, CNNs are now widely adapted for medical applications due to their ability to capture spatial hierarchies of features, handle large-scale image data, and achieve state-of-the-art accuracy (Latif et al., 2024; Gao 2019).

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

The integration of CNNs into medicine provides new opportunities for early disease diagnosis, treatment planning, prognosis estimation, and personalized healthcare. Nevertheless, challenges remain regarding interpretability, ethical considerations, data imbalance, and reproducibility.

This chapter provides a comprehensive overview of CNN applications in medicine, focusing on both general principles and real-world implementations. Special emphasis is given to practical applications derived from recent studies conducted by the author, which demonstrate the transformative role of CNNs in detecting and classifying a wide range of diseases, from neurological disorders to cancer and metabolic conditions.

2. OVERVIEW OF MEDICAL IMAGING AND DATA CHARACTERISTICS

Medical images are inherently diverse, varying by modality, acquisition parameters, and diagnostic purpose (Litjens et al., 2017; Savadjiev et al., 2019). Unlike natural images, medical datasets often suffer from limited sample sizes, imbalanced class distributions, and the necessity of expert annotation. These factors make the use of robust algorithms and careful data preparation essential.

- **MRI:** Provides detailed soft tissue contrast, widely used for brain, spine, and musculoskeletal imaging.
- **CT:** Offers rapid acquisition of cross-sectional images, useful in oncology and trauma cases.
- **X-ray:** Common for bone, lung, and cardiovascular diagnosis.
- **Ultrasound:** Real-time imaging for obstetrics, cardiology, and abdominal organs.

- **Histopathology/Dermatology Images:** High-resolution images for cancer detection (skin, breast, etc.).

Key challenges in medical imaging include large data volumes, privacy concerns, and heterogeneity across centers. CNN-based models must be designed to handle these issues while ensuring clinical reliability.

3. FUNDAMENTALS OF CNNs FOR MEDICAL APPLICATIONS

CNNs are designed to process grid-structured data such as images, leveraging local connectivity and weight sharing (LeCun et al., 1998; Goodfellow et al., 2016). Their architecture leverages local connectivity, weight sharing, and hierarchical feature extraction, making them particularly well suited for medical imaging tasks where both low-level and high-level patterns are critical for diagnosis (Singh et al., 2022). The general architecture of a CNN typically includes convolution, pooling, activation, fully connected, and output layers (Goodfellow et al., 2016). This architecture is illustrated in Figure 1.

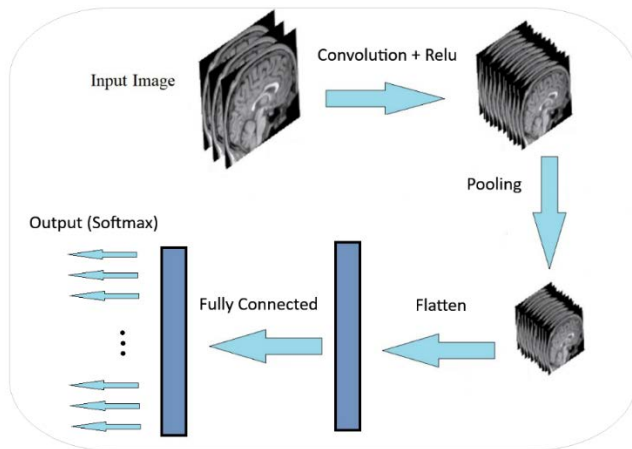


Figure 1. General architecture of a Convolutional Neural Network (CNN)

3.1. CNN Architecture

A typical CNN architecture consists of the following layers:

- **Convolutional Layers:** These layers apply convolutional filters (kernels) across the input image to extract local patterns such as edges, textures, and shapes. In medical imaging, these features correspond to anatomical boundaries, tissue textures, or pathological structures.
- **Pooling Layers:** Pooling operations (e.g., max pooling, average pooling) reduce spatial dimensions, control overfitting, and allow translation invariance. For MRI and CT images, pooling ensures that diagnostic features are preserved while reducing computational cost.
- **Activation Functions:** Non-linear activation functions such as ReLU, Sigmoid, and Tanh introduce non-linearity, enabling CNNs to model complex relationships. ReLU is the most common due to its efficiency and ability to mitigate vanishing gradient problems.
- **Fully Connected Layers:** These layers combine the extracted features to perform classification or regression. For example, distinguishing between benign and malignant lesions is typically performed at this stage.
- **Output Layer:** The final layer often uses a Softmax or Sigmoid function to generate class probabilities.

3.2. 2D, 2.5D, and 3D CNNs

- **2D CNNs:** Operate on single slices (e.g., X-ray, individual MRI slices). They are computationally efficient but may fail to capture inter-slice information in volumetric data.

- **2.5D CNNs:** Use multiple adjacent slices as input channels. This approach balances efficiency with some degree of volumetric context.
- **3D CNNs:** Apply 3D kernels to volumetric data such as CT or MRI scans. While powerful for capturing spatial dependencies, they require larger datasets and higher computational resources.

3.3. Transfer Learning in Medicine

Medical datasets are often small due to privacy restrictions and annotation costs. **Transfer learning** addresses this by reusing pre-trained models (e.g., ResNet, AlexNet, VGG, Inception) trained on large natural image datasets (ImageNet). Two main strategies are applied:

- **Feature Extraction:** The CNN is used as a fixed feature extractor, with only the final classifier retrained on medical data.
- **Fine-Tuning:** Pre-trained weights are partially or fully adjusted to the medical dataset, improving adaptability to domain-specific features.

Transfer learning has shown excellent performance in tasks such as brain tumor classification, lung cancer detection, and skin lesion analysis.

3.4. Regularization and Optimization

To improve generalization and prevent overfitting, several techniques are commonly employed:

- **Dropout:** Randomly deactivates neurons during training, forcing the network to learn more robust features.
- **Batch Normalization:** Normalizes activations between layers, accelerating convergence and stabilizing training.

- **Early Stopping:** Training is halted when validation accuracy plateaus, preventing overfitting.
- **Learning Rate Scheduling:** Dynamically adjusts learning rates for better convergence.

3.5. Challenges Specific to Medical Applications

Despite their advantages, CNNs in medicine face unique challenges:

- **Class Imbalance:** Many datasets contain disproportionately fewer positive cases (e.g., rare cancers). Solutions include weighted loss functions, oversampling, and synthetic data generation.
- **Interpretability:** CNNs are often criticized as “black-box” models. For clinical acceptance, interpretability tools such as Grad-CAM and saliency maps are essential.
- **Data Privacy:** Medical data must comply with regulations (GDPR, HIPAA). Approaches such as federated learning allow training without centralizing sensitive data.
- **Computational Complexity:** 3D CNNs for volumetric imaging require high memory and GPU resources, limiting their widespread clinical deployment.

4. DATA PREPARATION FOR MEDICAL CNNs

Robust data preparation is crucial for reliable CNN performance.

- **Preprocessing:** Noise reduction, normalization, resizing, augmentation (rotation, scaling, flipping).

- **Segmentation preprocessing:** Extracting regions of interest (ROIs) from MRI or CT scans (Hassannataj Joloudari et al., 2019).
- **Data partitioning:** Ensuring patient-based splitting (training, validation, test) to prevent data leakage.
- **Data augmentation:** Expands dataset diversity and mitigates overfitting.
- **Privacy and anonymization:** Removal of sensitive patient information from DICOM headers and images.

The overall workflow of CNN-based medical image analysis, from data acquisition to clinical deployment, is presented in Figure 2

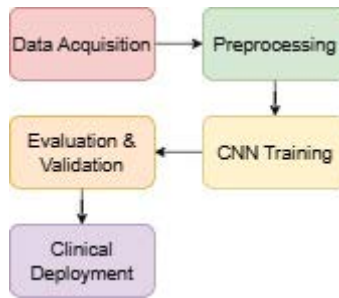


Figure 2. Workflow of CNN-based Medical Image Analysis

5. PERFORMANCE METRICS

Evaluating the performance of CNN models in medical applications requires a comprehensive set of metrics. Unlike general computer vision tasks, medical imaging often involves highly imbalanced datasets and critical decision-making scenarios where false negatives or false positives may have significant consequences. Therefore, multiple evaluation criteria are essential to measure accuracy, robustness, and clinical utility. Performance metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-

score are widely used to evaluate classification models (Sokolova & Lapalme, 2009). ROC curves and the area under the ROC curve (AUC-ROC) are standard measures for binary classification evaluation (Fawcett 2006).

5.1. Accuracy

Accuracy represents the overall proportion of correctly classified instances:

$$\text{Accuracy} = \frac{(\text{TP}+\text{TN})}{(\text{TP}+\text{TN}+\text{FP}+\text{FN})} \quad (1)$$

where TP = True Positives, TN = True Negatives, FP = False Positives, and FN = False Negatives. Although widely used, accuracy can be misleading in imbalanced datasets (e.g., rare cancers).

5.2. Precision and Recall

- Precision (Positive Predictive Value) measures how many predicted positives are actually correct:

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{(\text{TP}+\text{FP})} \quad (2)$$

- Recall (Sensitivity) measures the proportion of actual positives correctly identified:

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{(\text{TP}+\text{FN})} \quad (3)$$

In medicine, recall is especially critical (e.g., not missing a cancer case). However, high recall may come at the expense of lower precision.

5.3. F1-Score

The F1-score is the harmonic mean of precision and recall, balancing their trade-off:

$$\text{F1 Score} = 2 * \frac{(\text{Precision} * \text{Recall})}{(\text{Precision} + \text{Recall})} \quad (4)$$

It is particularly useful in imbalanced medical datasets where both false negatives and false positives must be minimized.

5.4. Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC-ROC)

AUC-ROC evaluates a model's ability to distinguish between classes across all threshold values.

- ROC curve plots True Positive Rate (TPR = Recall) vs. False Positive Rate (FPR = FP/(FP+TN)).
- AUC values close to 1 indicate excellent separability; values near 0.5 imply random performance.

AUC is commonly used in medical studies for binary classification tasks such as cancer detection.

5.5. Precision-Recall Curve and AUC-PR

In highly imbalanced datasets, AUC-PR is often more informative than AUC-ROC because it focuses on the performance of the positive class. It is especially relevant when the disease prevalence is low.

5.6. Dice Coefficient and Intersection over Union (IoU)

For segmentation tasks, overlap-based metrics are critical:

- Dice Coefficient (F1 for segmentation):

$$\begin{aligned} & \text{Dice} \\ &= \frac{2 \cdot |\text{Prediction} \cap \text{GroundTruth}|}{|\text{Prediction}| + |\text{GroundTruth}|} \end{aligned} \quad (5)$$

- Intersection over Union (IoU, Jaccard Index):

$$\begin{aligned} & \text{IoU} \\ &= \frac{|\text{Prediction} \cap \text{GroundTruth}|}{|\text{Prediction} \cup \text{GroundTruth}|} \end{aligned} \quad (6)$$

Dice is more sensitive to small structures (e.g., tumors), while IoU provides a stricter measure of spatial overlap.

5.7. Confusion Matrix

The confusion matrix summarizes classification outcomes in a tabular form, as shown in Table 1

Table 1. Confusion Matrix

	Predicted Positive	Predicted Negative
Actual Positive	True Positive (TP)	False Negative (FN)
Actual Negative	False Positive (FP)	True Negative (TN)

This matrix provides a detailed breakdown of model performance and allows calculation of all the above metrics.

5.8. Calibration and Reliability Metrics

Beyond classification accuracy, medical models should provide reliable probability estimates:

- Brier Score: Measures the mean squared error of predicted probabilities.
- Expected Calibration Error (ECE): Evaluates the alignment between predicted probabilities and actual outcomes.

Proper calibration is essential when CNN predictions are used in risk stratification or treatment planning.

5.9. Choosing the Right Metric in Medicine

- Imbalanced datasets: Prefer Recall, F1, and AUC-PR over raw Accuracy.
- High-risk diseases (e.g., cancer, epilepsy): Prioritize Recall to minimize false negatives.
- Segmentation tasks: Use Dice and IoU.
- Clinical decision support: Include calibration metrics to ensure trustworthiness of probability outputs.

In addition to traditional metrics, recent studies have emphasized the importance of more robust measures such as the Matthews Correlation Coefficient (MCC), which can provide more reliable evaluation in the presence of class imbalance (Chicco & Jurman, 2020).

6. APPLICATIONS OF CNNs IN MEDICINE

6.1. Neurological Disorders

Autism Spectrum Disorder (ASD):

- *Diagnostic of ASD based on structural brain MRI using CNN and grid search optimization* (Nogay & Adeli, 2020; Nogay, & Adeli 2023; Heinsfeld et al., 2018).
- *Multiple classification of brain MRI ASD by age and gender* (Nogay & Adeli, 2024). CNNs achieved reliable classification performance, demonstrating the potential of deep learning in early autism diagnosis and subgroup differentiation.

Epilepsy:

- *Detection of Epileptic Seizures Using Pre-trained CNN and Transfer Learning* (Nogay & Adeli, 2021; Acharya et al., 2018). CNNs successfully identified abnormal brain signals, outperforming traditional EEG feature-based approaches.

6.2. Oncology

Brain Tumors:

- *Brain Tumor Classification Using Deep Learning* (Nogay 2023).

CNNs effectively distinguished tumor types with high accuracy, supporting radiologists in complex cases.

Breast Cancer:

- *Comparative experimental study of five pre-trained CNNs for breast cancer diagnosis* (Altaf et al., 2021; Nogay et al., 2021; Nogay 2023; Cireşan et al., 2013).

ResNet, VGG, and Inception networks demonstrated superior classification results.

Lung Cancer:

- *CNN application for lung cancer type classification, staging, and carcinoma localization.* (Nogay et al., 2018; Nogay and Akinci 2018; Shen et al., 2015)
- *Deep CNNs for lung cancer stage detection* (Nogay 2017).

These studies highlight CNNs' ability to improve precision in oncology and treatment planning.

Skin Cancer:

- *Efficient skin cancer diagnosis via CNN-based binary classification of dermatological images* (Nogay 2024 ; Esteva et al., 2017).

CNNs achieved strong performance in differentiating malignant from benign lesions.

Head & Neck Cancers:

- *Prediction of post-treatment survival expectancy in head & neck cancers using ML methods* (Nogay 2020).
- *Estimation of head & neck cancer stage with CNNs.* CNN-based prognosis models have potential to support personalized treatment (Nogay et al., 2018).

6.3. Orthopedics and Metabolic Disorders

Bone Fractures:

- *Classification of bone fractures into three main classes using CNNs* (Nogay 2024; Lindsey et al., 2018). Automated systems may aid emergency departments in rapid fracture triage.

Metabolic Disorders:

- *Detection of hyperglycemia and hypoglycemia using facial images generated by AI* (Nogay et al., 2026). This pioneering study demonstrated how CNNs can predict metabolic conditions non-invasively, opening new avenues in personalized medicine.

7. CHALLENGES AND ETHICAL CONSIDERATIONS

Although CNNs have demonstrated great potential in medicine, several critical challenges must be addressed before their large-scale clinical adoption. These challenges are not only technical but also ethical, legal, and societal, reflecting the unique sensitivity of medical data and healthcare decision-making.

7.1. Data Scarcity and Imbalance

Medical datasets are often limited due to privacy concerns, ethical approval requirements, and the cost of expert annotations. Additionally, many diseases are rare, leading to highly imbalanced datasets where positive cases are underrepresented. This imbalance can bias CNN models toward the majority class, reducing sensitivity for rare but clinically important conditions.

Possible solutions: data augmentation, synthetic data generation (GANs), transfer learning, and class-weighted loss functions.

7.2. Generalizability and Domain Shift

Models trained on a single-center dataset may fail when applied to data from different hospitals, imaging devices, or patient populations. This phenomenon, known as domain shift, reduces clinical reliability.

Possible solutions: multi-center collaborations, domain adaptation methods, federated learning, and external validation on independent datasets.

7.3. Interpretability and Explainability

CNNs are often considered “black-box” models, which hinders clinical trust and regulatory approval. Clinicians need to understand why a model produced a certain prediction. Explainable AI (XAI) techniques, such as Grad-CAM, segmentation map, saliency maps, and attention mechanisms, provide visual or numerical explanations for predictions, enhancing interpretability.

Importance: In safety-critical settings such as cancer detection or surgical planning, interpretability is essential for clinical adoption.

An example of a brain MRI with its corresponding segmentation is shown in Figure 3 (Frazier et al., 2008)

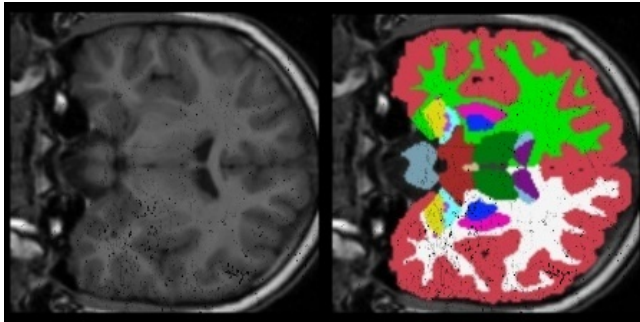


Figure 3. Brain MRI with segmentation map

7.4. Privacy and Security

Medical imaging data is highly sensitive and subject to strict privacy regulations (e.g., GDPR in Europe, HIPAA in the U.S.). Risks include data leakage, re-identification of anonymized data, and cyberattacks targeting healthcare institutions.

Possible solutions: anonymization of DICOM metadata, secure encryption, privacy-preserving training (e.g., federated learning, differential privacy).

7.5. Computational and Resource Constraints

3D CNNs for volumetric imaging and multi-modal learning demand significant computational resources, including GPUs or TPUs with large memory. This creates barriers for smaller hospitals or research institutions.

Possible solutions: lightweight architectures, model compression (quantization, pruning), cloud-based deployment, and hardware acceleration.

7.6. Regulatory and Legal Issues

Before clinical deployment, CNN-based systems must undergo rigorous validation and obtain certification as medical devices. Regulatory bodies (FDA, EMA, MDR) require transparency, reproducibility, and proven safety. Lack of standardized evaluation protocols remains a barrier.

Future outlook: Development of AI-specific medical guidelines and collaboration between engineers, clinicians, and policymakers is essential.

7.7. Ethical and Societal Implications

Beyond technical issues, ethical concerns include:

Bias and Fairness: Models may underperform for underrepresented populations (e.g., ethnic minorities, pediatric cases).

Accountability: Defining responsibility when AI-driven decisions lead to medical errors.

Equity of Access: Ensuring that advanced AI tools benefit not only high-resource hospitals but also low- and middle-income regions.

8. CONCLUSION AND FUTURE DIRECTIONS

Convolutional Neural Networks have revolutionized the analysis of medical images, enabling breakthroughs in disease detection, classification, and prognosis. The author's studies demonstrate CNNs' wide applicability across neurology, oncology, orthopedics, and metabolic disorders.

Future directions include:

- **Multi-modal learning:** Integrating imaging with clinical and genomic data.
- **Explainable AI:** Enhancing trust and transparency in clinical decisions.
- **Federated learning:** Collaborative model training without data sharing.
- **Edge AI:** Deploying CNNs in real-time on medical devices for rapid decision-making.

In summary, CNNs are shaping the future of medicine by providing accurate, efficient, and scalable solutions. While

challenges remain, ongoing research promises to bring AI-assisted diagnosis and treatment closer to routine clinical practice.

REFERENCES

- Acharya, U. R., Oh, S. L., Hagiwara, Y., Tan, J. H., & Adeli, H. (2018). Deep convolutional neural network for the automated detection and diagnosis of seizure using EEG signals. *Computers in Biology and Medicine*, 100, 270–278.
- Alabduljabbar, A., Khan, S. U., Alsuhaibani, A., Almarshad, F., & Altherwy, Y. N. (2024). Medical imaging datasets, preparation, and availability for artificial intelligence in medical imaging. *Journal of Alzheimer's Disease Reports*, 8(1), 1471–1483. <https://doi.org/10.3233/ADR-240129>
- Altaf, M. M., et al. (2021). A hybrid deep learning model for breast cancer diagnosis based on transfer learning and pulse-coupled neural networks. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 18(5), 7025–7045. <https://doi.org/10.3934/mbe.2021355>
- Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics*, 21(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>
- Cireşan, D. C., Giusti, A., Gambardella, L. M., & Schmidhuber, J. (2013). Mitosis detection in breast cancer histology images with deep neural networks. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2013*, 411–418.
- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115–118.

- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Frazier, J. A., Hodge, S. M., Breeze, J. L., Giuliano, A. J., Terry, J. E., Moore, C. M., Kennedy, D. N., Lopez-Larson, M. P., Caviness, V. S., Seidman, L. J., Zablotsky, B., & Makris, N. (2008). Diagnostic and sex effects on limbic volumes in early-onset bipolar disorder and schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, 34(1), 37–46. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbm120>
- Gao, J. (2019). Convolutional neural networks for computer-aided detection or diagnosis in medical image analysis: An overview. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 16(6), 6536–6561. <https://doi.org/10.3934/mbe.2019326>
- Giger, M. L. (2018). Machine learning in medical imaging. *Journal of the American College of Radiology*, 15(3), 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2017.12.010>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- Hassannataj Joloudari, J., et al. (2023). Developing a deep neural network model for COVID-19 diagnosis based on CT scan images. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 20(5), 8434–8453. <https://doi.org/10.3934/mbe.2023384>
- Heinsfeld, A. S., Franco, A. R., Craddock, R. C., Buchweitz, A., & Meneguzzi, F. (2018). Identification of autism spectrum disorder using deep learning and the ABIDE dataset. *NeuroImage: Clinical*, 17, 16–23.
- Latif, G., Alghazo, J., Khan, M. A., Ben Brahim, G., Fawagreh, K., & Mohammad, N. (2024). Deep convolutional neural network (CNN) model optimization techniques—Review

- for medical imaging. *AIMS Mathematics*, 9(8), 20539–20571. <https://doi.org/10.3934/math.2024998>
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324. <https://doi.org/10.1109/5.726791>
- Lindsey, R., Daluiski, A., Chopra, S., Lachapelle, A., Mozer, M., Sicular, S., ... & Hinton, G. (2018). Deep neural network improves fracture detection by clinicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(45), 11591–11596.
- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & van der Laak, J. A. (2017). A survey of deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60–88. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
- Nogay, H.S., Nogay, N.H., & Adeli, H. (2026). Detection of hyperglycemia and hypoglycemia using deep learning from facial images obtained with an AI image generator. *Biomed. Signal Process. Control.*, 111, 108351.
- Nogay, H.S., & Adeli, H. (2024). Multiple Classification of Brain MRI Autism Spectrum Disorder by Age and Gender Using Deep Learning. *Journal of Medical Systems*, 48.
- Nogay, H.S., & Adeli, H. (2023). Diagnostic of autism spectrum disorder based on structural brain MRI images using, grid search optimization, and convolutional neural networks. *Biomed. Signal Process. Control.*, 79, 104234.
- Nogay, H.S., & Adeli, H. (2021). Detection of Epileptic Seizure Using Pretrained Deep Convolutional Neural Network

- and Transfer Learning. *European Neurology*, 83, 602 - 614.
- Nogay, H.S., & Adeli, H. (2020). Machine learning (ML) for the diagnosis of autism spectrum disorder (ASD) using brain imaging. *Reviews in the Neurosciences*, 31, 825 - 841.
- Nogay, H.S., Akinci, T.C., & Yilmaz, M. (2021). Comparative Experimental Investigation and Application of Five Classic Pre-Trained Deep Convolutional Neural Networks via Transfer Learning for Diagnosis of Breast Cancer. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15, 1-8.
- Nogay, H. S., (2020). Prediction of Post-Treatment Survival Expectancy in Head & Neck Cancers by Machine Learning Methods. *The Journal of Cognitive Systems* , vol.5, no.1, 23-32.
- Nogay, H. S., Akıncı, T. Ç., & Erdemir, G., (2018). A Convolutional Neural Network Application For The Classification Of Lung Cancer Types. *Academic Journal Industrial Technologies*, vol.5, no.1, 7-12.
- Nogay, H. S., Akıncı, T. Ç., & Erdemir, G., (2018). Estimation Of Head & Neck Cancer Stage By Using Deep Convolutional Neural Networks. *Academic Journal Industrial Technologies* , vol.5, no.1, 13-19.
- Nogay, H. S., & Akıncı, T. Ç., (2018). A Convolutional Neural Network Application For Predicting The Locating Of Squamous Cell Carcinoma In The Lung. *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, vol.6, no.3, 207-210.
- Nogay, H. S., (2017). Deep Convolutional Neural Networks To Detect Lung Cancer Stage. *The Journal of Cognitive Systems* , vol.2, no.2, 33-36.

- Nogay, H. S., (2024). Classification of Bone Fractures into Three Main Classes Using Convolutional Neural Networks. 3rd International Congress on Engineering and Sciences (pp.89-96). İstanbul, Türkiye.
- Nogay, H. S., (2024). Efficient Skin Cancer Diagnosis via CN Based Binary Classification of Dermatological Images. 7th International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches (pp.227-235). İstanbul, Türkiye
- Nogay, H. S., (2023). Breast Cancer Diagnosis by Using Deep Learning. 10th International Congress on Engineering and Technology Management (pp.231-237). İstanbul, Türkiye
- Nogay, H. S., (2023). Brain Tumor Classification by Using Deep Learning. 10th International Congress on Engineering and Technology Management, İstanbul, Türkiye
- Savadjiev, P., Chong, J., Dohan, A., et al. (2019). Demystification of AI-driven medical image interpretation: Past, present and future. *European Radiology*, 29(3), 1616–1624. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5674-x>
- Shen, W., Zhou, M., Yang, F., Yang, C., & Tian, J. (2015). Multi-scale convolutional neural networks for lung nodule classification. *Information Processing in Medical Imaging*, 24, 588–599.
- Singh, A., et al. (2022). CNGOD—An improved convolution neural network with grasshopper optimization for detection of COVID-19. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 19(5), 5000–5020. <https://doi.org/10.3934/mbe.2022258>
- Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks.

Information Processing & Management, 45(4), 427–437.
<https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002>

FOTOVOLTAİK ENERJİ VE HÜCRE MODELLEMESİ

Evren İŞEN¹

Burçin ÖZKAYA²

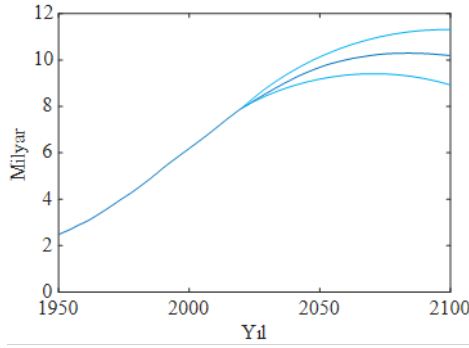
1. GİRİŞ

Küresel ölçekte hızla artan nüfus enerji talebinde sürekli bir artışı beraberinde getirmektedir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere 1950’de yaklaşık 2,5 milyar olan dünya nüfusunun 2050’de 9,7 milyara çıkmasının öngörülmektedir (United Nations, 2024). Şekilde açık mavi eğriler tahmin aralığını temsil etmektedir. Bu artış, sanayileşme, kentleşme ve yaşam standartlarındaki yükselme ile birleşerek enerji tüketiminde daha önce görülmemiş seviyelere ulaşılmasına neden olmaktadır. Bu enerji artışı beraberinde enerji sisteminde çeşitli gerilim bozulmalarına neden olup farklı gerilim regülasyon yöntemleri kullanımı ihtiyacı doğurmaktadır (Efe, 2018). Enerji kalitesindeki bozulmaların önceden tespiti için yapay zekâ kullanımı da tercih edilmektedir (Özer, Efe ve Özbay, 2021a). Yine talep artışı kaynaklı sistemde problemlerin ortaya çıkmaması için yapay zekâ kullanılan kısa süreli yük tahmini çalışmaları da gerçekleştirilmektedir (Özer, Efe ve Özbay, 2021b). Fosil yakıtların yoğun kullanımı sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğini hızlandırmakta ve ekosistem dengelerini bozmaktadır. Aynı zamanda hava, su ve

¹ Doç. Dr., Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, eisen@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3107-9255.

² Doç. Dr., Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, bozkaya@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9858-3982.

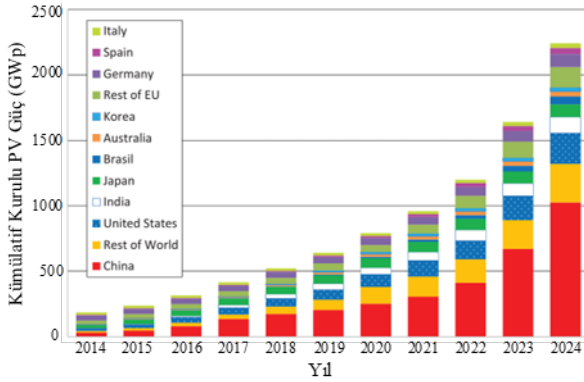
toprak kirliliğinde de artışa neden olmaktadır (International Energy Agency [IEA], 2024). Bu durum hem sürdürülebilir kalkınma hedefleri hem de enerji arz güvenliği açısından yeni ve temiz enerji kaynaklarına yönelme ihtiyacını doğurmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal kaynaklar, karbon emisyonlarını azaltma potansiyelleri ve uzun vadede ekonomik faydaları nedeniyle ön plana çıkmaktadır (REN21, 2024). Dolayısıyla, küresel enerji politikalarının odak noktası, fosil yakıt bağımlılığını azaltacak, enerji verimliliğini artıracak ve çevresel etkileri en aza indirecek dönüşümler üzerine yoğunlaşmaktadır.



Şekil 1.1. Yıllara göre dünya nüfusunun değişimi.

Bu noktada fotovoltaik (PV) sistemler, fosil yakıtların çevresel etkileri, enerji arz güvenliği endişeleri ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacın artmasıyla birlikte ortaya çıkmıştır (Kalogirou, 2020). PV sistemlerin enerji kaynağı olan güneşin dünyaya vermiş olduğu yıllık enerji toplamı $1,5 \times 10^{15}$ MW/h seviyesindedir (Kılıç, 2015). Bu yüksek potansiyel, PV teknolojilerinin gelişmesi ve maliyetlerin düşmesiyle birlikte daha etkin şekilde değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu durum, PV sistemlerin sadece iklim değişikliğiyle mücadelede değil aynı zamanda enerji çeşitliliğinin artırılması ve enerji ithalat bağımlılığının azaltılması açısından da stratejik bir rol

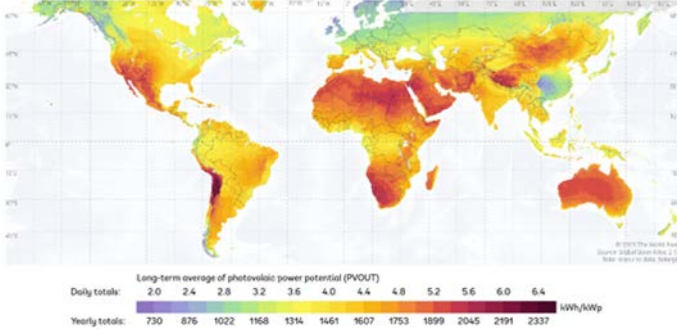
üstlendiğini göstermektedir. 2024 yılı sonunda, küresel fotovoltaik kurulu gücü 2,2 TW sınırını aşmış olup; bu kapasite 2023 yılında yaklaşık 1,6 TW düzeyinde olup kayda değer bir artışı sergilemiştir (IEA, 2025). Sadece 2024 yılı içinde devreye alınan yeni PV kapasite miktarı ise yaklaşık 554–602 GW arasında değişerek, sektörün tarihsel olarak en yüksek yıllık artışlarından biri gerçekleşmiştir. 2014-2024 yılları arasındaki kümülatif kurulu PV sistem güçlerinin verildiği Şekil 1.2’de bu artış miktarı ve kurulu gücün ülkelere göre dağılımı görülmektedir. Ülke bazında bakıldığında en yüksek kurulu gücün Çin’de ve ikinci olarak liste dışındaki toplam ülkelerde ve üçüncü olarak Amerika Birleşik Devletleri’nde olduğu anlaşılmaktadır (Jager-Waldau, 2025).



Şekil 1.2. 2014-2024 yılları arası kümülatif kurulu PV güç değerleri (Jager-Waldau, 2025).

Fotovoltaik sistemlerin enerji kaynağı güneştir. Bu nedenle sistem kurulumunun yapılacağı noktanın yıllık güneşlenme ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak gerekli hesaplamaların yapılması ve yıllık enerji üretim miktarının kurulum öncesi tespit edilmesi gerekmektedir. Şekil 1.3’te güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretim potansiyeli haritası görülmektedir (Ding, Zhou ve Deng, 2025). Koyu kırmızı renkte görülen bölgeler enerji üretimi bakımından en yüksek potansiyele, sarı tonlarda bölgeler orta potansiyele ve mavi renkli

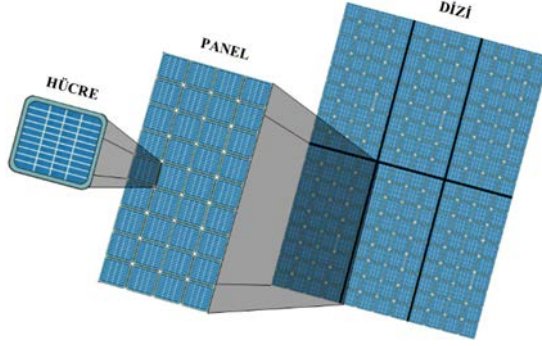
bölgeler düşük enerji potansiyeline sahiptir. Görüldüğü üzere Türkiye ortalama seviyelerde yer almaktadır.



Şekil 1.3. Dünya fotovoltaik elektrik enerjisi potansiyel haritası (Ding, Zhou ve Deng, 2025).

2. FOTOVOLTAİK HÜCRE

Fotovoltaik sistemlerde güneş enerjisi fotovoltaik paneller ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu paneller çok sayıda fotovoltaik hücrenin birleştirilmesinden meydana gelmektedir. Son kullanıcı tarafından kullanılan ürünün PV panel olmasından dolayı PV paneller yaygın olarak bilinmekle birlikte güneşten enerji üretimi yapan en küçük birim aslında PV hücrelerdir. Şekil 2.1’te görüldüğü gibi çok sayıda hücrenin seri bağlanması ile gerilim seviyesi yükseltilerek PV paneller elde edilir ve bu panellerde kurulacak sisteme göre seri ve paralel bağlanarak yüksek güçlü bir PV panel dizisi oluşturulur (Cangi, Adak ve Yılmaz, 2021). Böylece istenen yüksek akım ve gerilim değerlerine sahip yüksek güçlü bir PV sistem kurulabilmektedir.

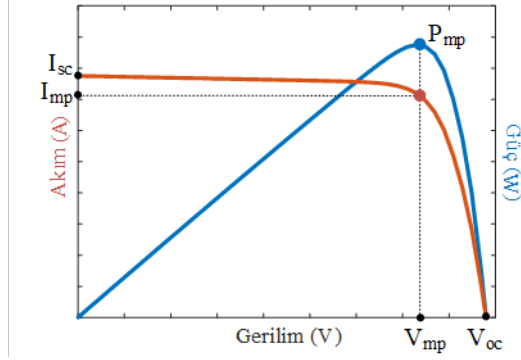


Şekil 2.1. PV hücre, panel ve dizi.

PV hücreler yarı iletken malzemeden meydana gelirler. Yarı iletken malzeme güneş ışığına maruz kaldığında elektrik enerjisi üretmeye başlar. Günümüzde yaygın olarak kristal silikon tip hücreler kullanılmaktadır. Bu hücre tipi pazarın yaklaşık olarak %85'ini oluşturmaktadır. Bu hücre tipi monokristal ve polikristal olarak ikiye ayrılmaktadır. Monokristal hücreler renkli ve silindirik bir yapıya sahiptir. Yaklaşık %20-%24 arasında bir verimlilik seviyesine sahiptirler (Dobrzański, Drygała, Giedroć ve Macek, 2012). Verim açısından avantajlı olduğundan dolayı diğer hücre tiplerine göre daha az yer kaplamaktadırlar. Yaklaşık 20 yıl ve üzeri bir ömre sahiptirler ve düşük güneş ışığında daha yüksek performans göstermektedirler. Bu nedenle bulutlu ortamlarda kullanıma daha uygundurlar. Ancak bu hücreler fiyat olarak daha pahalıdır. Sıcaklık artışı ile birlikte enerji üretimi azalmaktadır ve üretiminde %40-%50 oranında atık malzeme ortaya çıkmaktadır (Bayod-Rújula, 2019). Diğer kristal güneş hücresi tipi olan polikristal hücreler üretim süreci olarak monokristal hücrelere göre daha kolay üretilirler. Monokristale göre daha ucuz bir malzemedir ve silikon malzeme atığı oluşmaz. Böylece üretimi ucuz gerçekleşir. Verim bakımından %13-%16 seviyelerindedir. Bu da aynı gücü elde edebilmek için monokristal tipe göre daha fazla alan kullanımını gerektirmektedir (Sugianto, 2020). İnce film hücreler de çeşitli uygulama alanlarında tercih edilen hücre tipidir. Esnek ve hafif

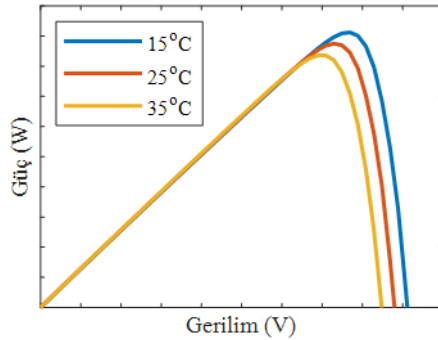
bir yapıya sahip olduklarından taşınabilir uygulamalarda, bina uygulamalarında, teknelerde, vb. gibi farklı hafiflik, taşınabilirlik ve görsellik gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Diğer hücre tiplerine göre kullanılan yarı iletken malzeme miktarı daha az olduğundan üretim maliyeti düşmektedir. Farklı yapılarda üretilen hücrelerden oluşturulan modüller monokristal ve polikristal tiplere göre yaklaşık %4-%10 daha düşük verime sahiptir. Ancak bina tipi uygulamalarda yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedir (Tripathy, Sadhu ve Panda, 2016).

PV hücrelerin çıkış gerilimine bağlı olarak çıkış akımları da değişim göstermektedir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi hücre düşük gerilimlerde yüksek akım üretebilirken gerilim yükseldikçe akım seviyesi düşmektedir. Gerilimin sıfır olduğu andaki akım seviyesi kısa devre akımı (I_{sc}) olarak adlandırılırken akımın sıfır olduğu andaki gerilim seviyesi de açık devre gerilimi (V_{oc}) olarak adlandırılır. Şekil incelendiğinde panelin gerilime bağlı çıkış gücünün ilk olarak yükseliş gösterdiği daha sonra maksimum noktaya ulaştığı ve daha sonra da hızla düştüğü görülmektedir. Gücün maksimum olduğu andaki nokta maksimum güç noktası olarak ifade edilir. Bu noktadaki güç değeri maksimum güç (P_{mp}), gerilim değeri maksimum güç noktası gerilimi (V_{mp}) ve akım değeri ise maksimum güç noktası akımı (I_{mp}) olarak adlandırılır. Hücreden en yüksek gücü elde etmek için hücrenin maksimum güç noktası değerlerinde çalıştırılması gerekmektedir (Isen ve Sengul, 2020).



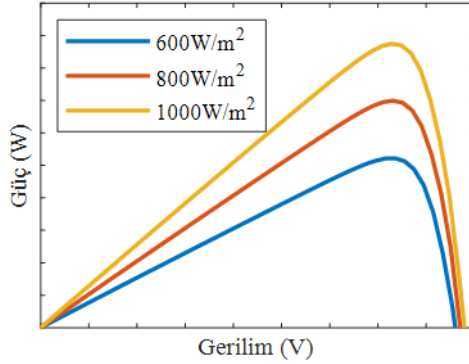
Şekil 2.2. PV hücre akım, gerilim ve güç değişimi.

PV hücrenin elektriksel çıkış büyüklükleri ortam şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Anlık olarak ışıınım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak PV hücrenin çıkış akım ve gerilimi ve bunlara bağlı olarak ta gücü değişmektedir. Şekil 2.3'te 1000 W/m² ışıınımda farklı sıcaklık değerleri için gerilime bağlı güç değişimi verilmiştir. Hücrenin sıcaklığı arttıkça üretebildiği maksimum güç değeri düşüş göstermektedir. Şekilde en yüksek maksimum güç 15°C sıcaklıkta elde edilirken en düşük maksimum güç ise 35°C sıcaklıkta üretilmiştir. Buradan hücrenin üretebildiği güç değerinin sıcaklıkla ters orantılı olduğu görülebilmektedir. Grafikte sıcaklık değişiminin gerilime etkisi incelendiğinde açık devre geriliminin sıcaklıkla ters orantılı olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıktaki açık devre gerilimi düşük sıcaklığa göre daha düşük olmaktadır.



Şekil 2.3. Farklı sıcaklıklarda gerilime bağlı güç değişimi.

Şekil 2.4'te sabit 25°C sıcaklıkta farklı ışıınım değerleri için hücre gücünün gerilime bağlı değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en yüksek maksimum güç değeri 1000W/m² ışıınımda elde edilirken en düşük maksimum güç değeri 600W/m² ışıınımda elde edilmektedir. Bu sonuç, ışıınımdaki artışın fotovoltaiik hücrenin güç üretimine doğrusal olarak etki ettiğini göstermektedir. Şekil 2.3'teki sıcaklık artışındaki güç azalmasına ters olarak sabit sıcaklıkta ışıınımdaki artış güçte artış sağlamaktadır. Bu nedenle sistem tasarımı yaparken ışıınım verisi yanında sıcaklık değişim verisine de bakmak gerekmektedir. Sistemin enerji potansiyelinin önceden daha doğru belirlenmesinde ve çalışma sırasında yüksek verim elde edilmesinde bu husus önem arz etmektedir. Ayrıca ışıınım değişiminin açık devre geriliminde etkisinin yok denecek kadar az olduğu da görülmektedir.



Şekil 2.4. Farklı ışıınım değerlerinde gerilime bağlı güç değişimi.

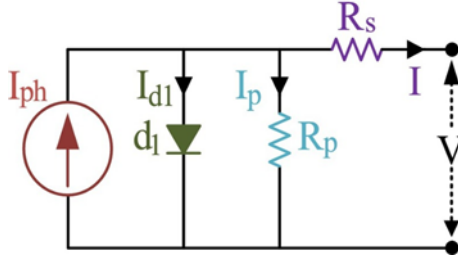
3. PV HÜCRENİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

PV sistemlerin temel taşı olan fotovoltaiik hücrenin üzerine araştırmaların yapıpı gelişmelerin sağlanması için bu hücrelerin matematiksel olarak tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca sistem kurulmadan önce yapılan modelleme ile sistemin

performansı hakkında ön bilgi elde edilebilmektedir (Mourtada, 2021). Bu nedenle literatüre çeşitli hücre modelleri sunulmaktadır. Tek diyotlu, iki diyotlu ve üç diyotlu hücre modelleri çalışmalarda sıklıkla kullanılan modellerdir (Isen ve Duman, 2024).

3.1. Tek Diyotlu PV Hücre Modeli

Bir fotovoltaik hücrenin tek diyotlu modeli Şekil 3.1’de görülmektedir. İsminden de anlaşılacağı gibi modelde bir adet d_1 olarak adlandırılan diyot bulunmaktadır. Bu model en temel hücre modelidir. Basit yapıları olduğundan denklem çözümü daha kolaydır ancak doğruluk bakımından diğer modellere göre daha az başarılıdır. Modelde I_{ph} foton akım kaynağını, R_p paralel çıkış direncini, R_s ise seri çıkış direncini temsil etmektedir. Görüldüğü üzere güneş hücresi dört elemandan oluşan basit bir elektrik devresine dönüşmektedir. Böylece hücrenin akım ve gerilim değerleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.1. Tek diyotlu hücre modeli.

Bir PV hücrede çıkış akımı Şekil 3.1’den de görüldüğü üzere foton akım kaynağı ile diyot akımı ve paralel direnç akımının farkından meydana gelmektedir (3.1).

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_p \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte sırasıyla I_p ve I_{d1} ile temsil edilen paralel çıkış direnci akımı ve diyot akımı (3.2) ve (3.3) ile hesaplanmaktadır.

$$I_{d1} = I_{sat1} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{n_1 V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.2)'de yer alan I_{sat1} diyotun ters doyum akımını, n_1 diyot idealite faktörünü temsil ederken V_{th} termal gerilimi (3.4) ile ifade edilmektedir.

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte $k=1,380650.10^{-23}$ J/K değeriyle Boltzmann sabitini, $q=1,602.10^{-19}$ C şarj yükünü ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir (Xu, Liu, Zhu, Chen ve Zhang, 2025).

Modelde yer alan I_{ph} akım kaynağı ışıınım ve sıcaklık değerine bağlı olarak (3.5) ile hesaplanmaktadır (Nafack vd., 2025).

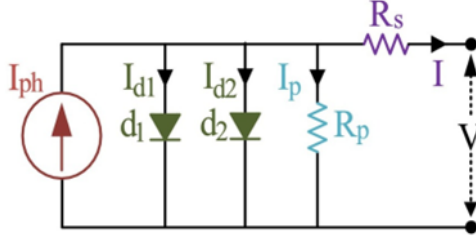
$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left[I_{ph,ref} + \mu_{sc} \cdot (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte G ışıınımı, G_{ref} , $I_{ph,ref}$ ve $T_{c,ref}$ sırasıyla standart test koşullarındaki ışıınım değerini (1000W/m^2), foton akımı yoğunluğunu ve 298°K değeri ile hücre sıcaklığını, μ_{sc} kısa devre akımındaki sıcaklık katsayısını ve T_c anlık hücre sıcaklığını ifade etmektedir. μ_{sc} ifade üretici tarafından ürün kataloğunda verilmektedir.

3.2. İki Diyotlu PV Hücre Modeli

Bu modelde Şekil 3.2'de görüldüğü gibi tek diyotlu modelden farklı olarak 2 diyot kullanılmaktadır. Bu modelde denklemlerin çözümü tek diyotlu modele göre daha zor olmakla birlikte elde edilen sonuç daha başarılı olmaktadır. Gerçek

sonuçlara daha fazla yaklaşılmaktadır. Ancak hesaplama süresi artış göstermektedir.



Şekil 3.2. İki diyotlu hücre modeli.

Şekil 3.2’de görülen hücre modelinde çıkış akımı (3.6) ile hesaplanmaktadır. Görüldüğü gibi (3.1) eşitliğinden farklı olarak ikinci diyot akımı denkleme eklenmiştir.

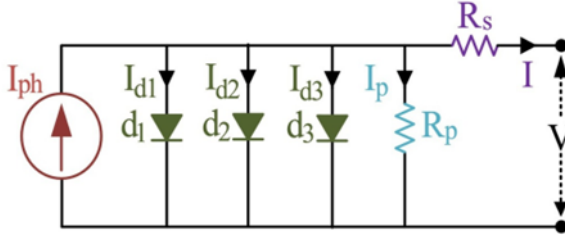
$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (3.6)$$

Modele eklenen ikinci diyotun akımı da (3.2) eşitliğine benzer olarak (3.7) ile hesaplanabilmektedir (Maric, Marasović, Kuzmanić Skelin ve Bevanda, 2025). I_{d1} , I_p ve I_{ph} bileşenlerinin hesaplamaları tek diyotlu model ile aynıdır.

$$I_{d2} = I_{sat2} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{n_2 V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (3.7)$$

3.3. Üç Diyotlu PV Hücre Modeli

Bu modellemede de adından anlaşıldığı üzere 3 adet diyot bulunmaktadır. Diğer iki modele göre karmaşık ve dolayısıyla zor bir çözüme sahiptir ancak gerçeğe daha yakın sonuç vermektedir (Kullampalayam Murugaiyan, Chandrasekaran, Devapitcheai ve Senjyu, 2024).



Şekil 3.3. Üç diyotlu hücre modeli.

Üç diyotlu PV hücre devre modelinde düğüm gerilimi yöntemi ile diğer iki modele benzer şekilde devre denklemi yazıldığında

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_p \quad (3.8)$$

eşitliği elde edilmektedir. Bu eşitlikte I_{d3} akımı diğer iki modele ilave olarak eklenen diyotun akımını ifade etmektedir. Böylece model daha detaylandırılmakta ve sonuçlar gerçeğe daha da yaklaşmaktadır. Bu akım diğer diyot akımlarına benzer şekilde (3.9) ile hesaplanmaktadır.

$$I_{d3} = I_{sat3} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{n_3 V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

4. SONUÇ

Temiz enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle de PV panel kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Panelin ürettiği elektrik enerjisinin ısıtım, sıcaklık gibi çevresel parametrelere bağlı olması nedeniyle bunların modellenmesi önem arz etmektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı model ele alındığında bu modellerin birbirlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır. PV hücre modellemede kullanılan üç farklı yöntemin genelleştirilmiş karşılaştırması Tablo 4.1’de verilmiştir. Modellemelerdeki parametre sayısı dikkate

alındığında en az parametre sayısı 5 ile tek diyotta bulunurken en fazla parametre 9 ile üç diyotlu modelde bulunmaktadır. Parametre sayısının artışı hesaplamada zorluğa neden olduğundan üç diyotlu modelde hesaplama uzun sürmektedir. İki diyotlu modelde daha kısa sürede hesaplama yapılabilirken tek diyotlu modelde ise en hızlı hesaplama yapılabilir. Bu açıdan bakıldığında tek diyotlu modelde hızlı hesaplama yapıldığından avantajlı hale gelmektedir. Ancak doğruluk seviyesi incelendiğinde uzun sürede hesaplama yapılan üç diyotlu modelde en yüksek doğruluk elde edilmektedir. Bunun nedeni hesaplama süresinde uzunluğa neden olan parametre sayısının artışıdır. Fazla sayıda parametre kullanımı PV hücre eğrisinin daha doğru elde edilmesini sağlamaktadır. Bu tablodan anlaşılabileceği üzere modelleme amacıyla bağlı olarak uygun model kullanılmalıdır. Yüksek doğruluk istenen uygulamalarda üç diyotlu model kullanılırken genel bir analiz yapılmak istendiğinde ise tek diyotlu model kullanılabilir. Hız ve yüksek doğruluk istenen durumlarda ise iki diyotlu model tercih edilebilir. Ayrıca son yıllarda literatüre dört diyotlu modelleme üzerine de çalışılmaktadır. Bu modelleme bu çalışmadaki modellemelere göre daha kompleks yapıda olup daha yüksek doğruluğa sahip olsa da üç diyotlu model sonuçları tatmin edici olduğundan çözümü daha kompleks hale getirip çözüm süresini uzatmak böyle bir problemin çözümü için cazip bir çözüm değildir.

Tablo 4.1. Genel karşılaştırma.

Model	Parametre Sayısı	Hesaplama Süresi	Doğruluk Seviyesi	Kullanım Alanı
Tek diyot	5	Kısa	Orta	Temel analizler
İki Diyot	7	Orta	Yüksek	Gerçekçi analizler
Üç Diyot	9	Uzun	En Yüksek	Yüksek doğruluklu sonuç ihtiyacı

KAYNAKÇA

- Bayod-Rújula, A. A. (2019). Solar photovoltaics (PV). In Solar hydrogen production. *Processes, systems and technologies* içinde (ss. 237–295). Academic Press.
- Cangi, H., Adak, S., ve Yılmaz, A. S. (2021). Fotovoltaik hücre I-V ve P-V eğrileri üzerine sıcaklığın etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(4), 2682–2694.
- Ding, Y., Zhou, S., ve Deng, W. (2025). Sustainable PV power forecasting via MPA-VMD optimized BiGRU with attention mechanism. *Mathematics*, 13, 1531.
- Dobrzański, L. A., Drygała, A., Giedroć, M., ve Macek, M. (2012). Monocrystalline silicon solar cells applied in photovoltaic system. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 53(1), 7–14.
- Efe, S. B. (2018). UPFC based real-time optimization of power systems for dynamic voltage regulation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 116, 391–406.
- International Energy Agency (IEA). (2025). Snapshot of Global PV Markets 2025.
- International Energy Agency (IEA). (2024). World Energy Outlook 2024.
- Isen, E., ve Sengul, A. (2020). Comparison of maximum power point tracking techniques on photovoltaic panels. *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences*, 6, 14–29.
- Isen, E., ve Duman, S. (2024). Improved stochastic fractal search algorithm involving design operators for solving parameter extraction problems in real-world engineering optimization problems. *Applied Energy*, 365, 123297.

- Jäger-Waldau, A. (2025). Snapshot of photovoltaics – March 2025. *EPJ Photovoltaics*, 16.
- Kalogirou, S. A. (2020). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems (2nd ed.)*. Academic Press.
- Kılıç, F. Ç. (2015). Güneş enerjisi, Türkiye’deki son durumu ve üretim teknolojileri. *EMO Bilimsel Dergi*, 56, 28-40.
- Kullampalayam Murugaiyan, N., Chandrasekaran, K., Devapitchai, M. M., ve Senjyu, T. (2024). Parameter estimation of three-diode photovoltaic model using reinforced learning-based parrot optimizer with an adaptive secant method. *Sustainability*, 16, 10603.
- Maric, P., Marasović, I., Kuzmanic Skelin, A., ve Bevanda, I. (2025). Adaptive double-diode modeling for comparative analysis of healthy and microcracked PV modules. *Electronics*, 14, 1559.
- Mourtada Elseman, A. (Ed.). (2021). *Solar Cells - Theory, Materials and Recent Advances*. IntechOpen.
- Nafack Nihako, J., Simo, E., Abada Essouma, D.D., Nanmegne Leutchouang, M., Atteutsia Tsakem, C.R., Tchienou Tchienou, C.Y., ... Marae Djouda, J. (2025), Realistic Modeling of Photovoltaic Solar Cell: A Simple and Accurate Two-Diode Model. *Applied Research*, 4, e70010.
- Özer, İ., Efe, S. B., ve Özbay, H. (2021a). CNN/Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 15, 3401–3413.
- Özer, İ., Efe, S. B., ve Özbay, H. (2021b). A combined deep learning application for short term load forecasting. *Alexandria Engineering Journal*, 60, 3807–3818.

- REN21. (2024). Renewables 2024 Global Status Report-Global Overview.
- Sugianto. (2020). Comparative analysis of solar cell efficiency between monocrystalline and polycrystalline. *INTEK Jurnal Penelitian*, 7, 92–100.
- Tripathy, M., Sadhu, P. K., ve Panda, S. K. (2016). A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 451–465.
- United Nations (2024), Department of Economic and Social Affairs Population Division, World Population Prospects 2024.
- Xu, J., Liu, J., Zhu, C., Chen, Q., ve Zhang, Y. (2025). Parameter estimation of photovoltaic single-diode model using an integral form and hybrid objective function. *Solar Energy*, 300, 113820.

AN IMPROVED STARFISH OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON DYNAMIC FITNESS- DISTANCE BALANCE METHOD FOR GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEMS

Burçin ÖZKAYA¹

Evren İŞEN²

1. INTRODUCTION

Optimization is a fundamental aspect of modern science and engineering, facilitating the systematic search for optimal or near-optimal decisions under challenging objectives and constraints (Salgotra and Mirjalili, 2024). In engineering design, operations research, energy systems, and machine learning, real-world problems are often not smooth, not convex, have more than one mode, and have more than one dimension. Classical gradient-based and second-order methods do not always work well in these situations. They assume the function is differentiable, are sensitive to how they start, and tend to get stuck in local optima. Additionally, handling constraints and costly black-box evaluations increase computational costs, rendering exhaustive search impractical (Hu, Song, and Abdel-salam, 2025). These problems have led to the widespread use of meta-heuristic search (MHS) algorithms, which do not make strict regularity assumptions and instead use population-based, random methods

¹ Assoc. Prof. Dr., Bandırma Onyedi Eylül University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Electrical Engineering, bozkaya@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9858-3982.

² Assoc. Prof. Dr., Bandırma Onyedi Eylül University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Electrical Engineering, eisen@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3107-9255.

to efficiently navigate complex landscapes (Salgotra and Mirjalili, 2024; Hu, Song, and Abdel-salam, 2025).

MHS algorithms have several advantages, such as not requiring derivatives, being easy to develop, having inherent flexibility, and being adaptable to other domains (Salgotra and Mirjalili, 2024). Despite their variety, most rely on three core processes: exploration of the search space, exploitation of promising neighborhoods, and selection to guide survival across iterations (Kahraman, Aras, and Gedikli, 2020; Aras, Gedikli, and Kahraman, 2021). Achieving balance between exploration and exploitation is vital, as imbalance may lead to premature convergence or excessive wandering. These challenges intensify in high-dimensional or constrained problems, highlighting the need for well-designed guidance strategies (Salgotra and Mirjalili, 2024).

In this context, the Fitness-Distance Balance (FDB) method offers a straightforward yet effective selection-guidance mechanism that concurrently evaluates a candidate's fitness and distance value relative to the current optimal solution (Kahraman, Aras, and Gedikli). The FDB enhances the algorithm's guidance mechanism, sustains an efficient exploration-exploitation equilibrium throughout iterations, prevents premature convergence, and improves convergence reliability in challenging high-dimensional or constrained problems with negligible overhead. There are also different versions of the FDB method based on how the weight parameter is set: dynamic FDB (DFDB) (Kahraman et al. 2022), adaptive FDB (Duman, Kahraman, and Kati, 2023), and fuzzy-based FDB (Ozkaya, Duman, and Isen, 2025). In the literature, the FDB method has been preferred by researchers to improve many MHS algorithms such as FDB based wind driven optimization (Tang et al., 2022), FDB based teaching-learning-based artificial bee colony algorithm (Duman et al., 2022), chaotic map-based supply-demand optimization

(SDO) algorithm including the FDB (Duman et al., 2023), FDB based beluga whale optimization (Ebeed et al., 2024), DFDB based manta ray foraging optimization (Kahraman et al. 2022), DFDB based growth optimizer (Ozkaya, 2024), etc.

This study assessed the starfish optimization algorithm (SFOA), which is based on the biology of starfish (Zhong et al., 2025). The SFOA has the same structure as other well-known metaheuristic algorithms. It has an exploration phase that is chosen at random to learn how starfish explore, and an exploitation phase that is based on preying and regeneration. The No-Free-Lunch theorem (Wolpert and Macready, 2002) shows that no one method works best for all optimization problems. This is why we need to improve the SFOA algorithm so that it can find better solutions to many optimization problems. The objective of the study was to improve the SFOA's capacity to imitate natural phenomena and, as a result, to develop one of the effective MHS algorithms reported in the literature. The CEC 2020 (Yue et al., 2019) and CEC 2022 (Kumar, PV, Mohamed, Hadi, & Suganthan, 2021) were used to look at how well the SFOA worked. The results indicated that the SFOA struggled with balancing exploration and exploitation, and the algorithm lacked adequate exploitation capabilities. So, the DFDB method was used to choose the guide solution candidates during the algorithm's exploitation process.

In order to compare the performance of the proposed DFDB based SFOA (DFDBSFOA), five up-to-date MHS algorithm including the SFOA, artificial lemming algorithm (ALA) (Xiao, Cui, Khurma, and Castillo, 2025), aquila optimizer (AO) (Abualigah et al., 2021), pelican optimization algorithm (Trojovský and Dehghani, 2022), and tangent search algorithm (Layeb, 2022) were selected and applied on solving the CEC2020 and CEC2022 benchmark problem suites. The results obtained from all algorithms were evaluated using well-known non-

parametric statistical analysis methods, Friedman and Wilcoxon. Moreover, the convergence and box-plot analysis of the algorithms were analyzed. All analysis results prove that the proposed DFDBSFOA is superior to both the base SFOA and other competing algorithms.

2. PROPOSED METHOD

The dynamic fitness-distance balance method-based starfish optimization algorithm (DFDBSFOA) is introduced in this section. To make it easier to understand, the proposed method is divided down into three parts. The first section gives a general idea of what the SFOA algorithm is. The next subsection examines the dynamic fitness-distance balance method. The last subsection gives a full explanation of the proposed DFDBSFOA algorithm.

2.1. Overview of the Starfish Optimization Algorithm

The Starfish Optimization Algorithm is a bio-based MHS algorithm that takes inspiration from how starfish behave. The starfish's morphology and physiology are closely related to how they explore, prey, and regenerate. The SFOA, like other well-known MHS algorithms, has two phases: exploration and exploitation. The exploration phase is based on how starfish explore, and the exploitation phase is based on how they prey and regenerate (Zhong et al., 2025). The following is how the information about the SFOA's mathematical models is shown:

Initialization: In accordance with other MHS methods, the positions of individuals are randomly generated within the constraints of design variables utilizing Eq. (1). When the initial positions of individuals have been generated, the fitness values of each individual can be computed based on the objective function (Zhong et al., 2025).

$$x_{jk} = lb_k + rand(ub_k - lb_k), j = 1, 2, \dots, N_p \text{ and } k = 1, 2, \dots, D \quad (1)$$

Exploration stage: It uses a hybrid, dimension-conscious search approach like a starfish's five arms. When the problem dimension is high ($D > 5$), the positions of the individuals are updated as follows (Zhong et al., 2025):

$$\begin{aligned} y_{j,p}^t &= x_{j,p}^t - y(x_{best,p}^t - x_{j,p}^t) \sin \theta, r > 0.5 \\ y_{j,p}^t &= x_{j,p}^t + y(x_{best,p}^t - x_{j,p}^t) \cos \theta, r \leq 0.5 \end{aligned} \quad (2)$$

where p denotes the five randomly selected dimensions among D dimensions, $x_{best,p}^t$ is the p -dimension of the current best position, $x_{j,p}^t$ and $y_{j,p}^t$ are the current and generated position of j^{th} individual, respectively.

In Eq. (2), y and θ are calculated as follows:

$$\theta = \frac{t}{t_{\max}} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

$$y = \pi(2 * rand - 1) \quad (4)$$

where t and $t_{\max}$ are the current and maximum number of iteration, and $rand$ is the randomly generated number between 0 and 1.

When the problem dimension is low ($D \leq 5$), the SFOA adopts a one-dimensional exploration rule. Here, the position of the individuals is updated as (Zhong et al., 2025):

$$y_{j,q}^t = x_{j,p}^t \left[\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}} \cos \theta \right] + f_1(x_{n_1,p}^t - x_{j,p}^t) + f_2(x_{n_2,p}^t - x_{j,p}^t) \quad (5)$$

where $x_{n_1,p}^t$ and $x_{n_2,p}^t$ are the two randomly selected individual, f_1 and f_2 are the two randomly generated number between -1 and 1.

Exploitation stage: The SFOA uses hunting and regeneration operators to identify promising areas during exploitation. The preying operator performs a parallel two-directional search: compute five distance vectors from the population's best position to five randomly chosen individuals, then randomly select two of these vectors and update the individual along those directions, exploiting peer and current best information. Distances are calculated as (Zhong et al., 2025):

$$d_s = x_{best}^t - x_{n_p}^t, n = 1, \dots, 5 \quad (6)$$

where d_s is the five distances between the global best individual and others, and n_p is the five randomly chosen individual. In the preying behavior, the position of the individuals is updated using Eq. (7). Here, d_{s1} and d_{s2} are the randomly chosen from d_s , and h_1 and h_2 are the randomly generated number from (0, 1).

$$y_j^t = h_1 d_{s1} + h_2 d_{s2} + x_j^t \quad (7)$$

Moreover, the starfish exhibit susceptibility to other predators due to their sluggish movement. When a predator captures a starfish, the starfish may sever and discard an arm to escape. Thus, the SFOA regeneration occurs only in the last starfish. In the regeneration phase, the position of the individuals is updated using Eq. (8).

$$y_j^t = \exp\left(-t \times \frac{N_p}{t_{max}}\right) x_j^t \quad (8)$$

To more detailed information about the SFOA, you can review the (Zhong et al., 2025).

2.2. Overview of the Dynamic Fitness-Distance Balance Method

The Fitness-Distance Balance (FDB) introduced by Kahraman et al. is a selection strategy implemented within metaheuristic search algorithms. In addition to evaluating candidates based solely on their objective scores, the FDB assesses the distance of each candidate to the current best solution. The system subsequently integrates the fitness and distance values into a unified score and makes selections based on that score (Kahraman et al., 2020). In the calculation of the FDB score, the fitness and distance values of the individuals must be calculated. Accordingly, the fitness vector of the individuals is denoted as (Kahraman et al., 2020):

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{N_p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

On the other hand, the distance value of the each individual is computed as (Kahraman et al., 2020):

$$D_j = \sqrt{(x_j^1 - x_{best}^1)^2 + \dots + (x_j^D - x_{best}^D)^2}, j = 1, \dots, N_p \quad (10)$$

Before the score calculation, the fitness and distance vectors are normalized to prevent them from gaining dominance over each other. The FDB score calculation is based on the normalized values of the fitness and the distance vectors using Eq. (11) (Kahraman et al., 2020).

$$S_j = w_{FDB} \cdot \text{norm}F_j + (1 - w_{FDB}) \cdot \text{norm}D_j \quad (11)$$

In Eq. (11), w_{FDB} is a weight factor taken value between 0 and 1. The weight w_{FDB} scales the $\text{norm}F_j$: increasing w_{FDB} makes fitness dominate the score, pushing selection toward exploitation and fine-tuning near the current best; decreasing w_{FDB} shifts

influence to the $\text{norm}D_j$ term, favoring more distant candidates and thus promoting exploration. In the classic FDB method, w_{FDB} is assumed to be 0.5 (Kahraman et al., 2020).

The dynamic FDB (DFDB) method is an enhanced version of the classic FDB method. The difference between the two methods is that in the classical FDB method, the weight parameter is taken as a fixed number, while in the DFDB method it changes dynamically (Kahraman et al., 2022). In the DFDB method, the weight parameter (w_{DFDB}) is changed over the iteration calculated using Eq. (10). Here, the lb parameter takes values between 0 and 0.5. h and $\text{max}FEs$ represent the current iteration number and a maximum number of fitness function evaluations, respectively (Ozkaya, 2024).

$$w_{DFDB} = (1 - lb) \times \frac{h}{\text{max}FEs} + lb \quad (12)$$

2.3. Improved Starfish Optimization Algorithm (ISFOA)

In this subsection, the application of the dynamic fitness-distance balance method on the SFOA algorithm is presented. When the mathematical equations of the SFOA algorithm, presented in Section 2.1, are examined, it is observed that individuals are consistently randomly selected during position updates in both the exploration and exploitation processes. While random selection increases diversity, too much diversity causes the algorithm to encounter premature convergence. Due to the premature convergence problem in the SFOA algorithm, problems have been observed in the balance between exploitation and exploration. Therefore, different variations were created in which individuals were randomly selected using the DFDB method in the exploration and exploitation processes. These variations were tested in solving the CEC2020 and CEC2022 benchmark problems, and the best variation was found to be the

one that used the DFDB method in the exploitation process. Accordingly, the five individuals in Eq. (6) used to calculate distance in the base SFOA algorithm were selected using the DFDB method instead of random selection. Thus, in the proposed DFDBSFOA algorithm, the distance is calculated using Eq. (13).

$$\begin{cases} d_{s1} = x_{best}^t - x_{DFDB1}^t \\ d_{s2} = x_{best}^t - x_{DFDB2}^t \\ d_{s3} = x_{best}^t - x_{DFDB3}^t \\ d_{s4} = x_{best}^t - x_{DFDB4}^t \\ d_{s5} = x_{best}^t - x_{DFDB5}^t \end{cases} \quad (13)$$

The pseudocode of the proposed DFDBSFOA algorithm is given in Algorithm-1. Algorithm-1, the DFDB method is applied in lines 20 and 21. In line 20, the five individuals are determined using the DFDB method. In line 21, new distance equation is computed.

Algorithm-1: Pseudocode of the proposed DFDBSFOA algorithm.	
Inputs: $N_p, G, t_{max}, maxFEs, t = 0, FE=0$	
Output: Best solution	
1.	Initialize the population using Eq. (1).
2.	Compute the fitness function of all individuals.
3.	while $FE < maxFEs$
	//Exploration stage//
4.	if $rand > G$
5.	Compute θ using Eq. (3).
6.	for $i = 1: N_p$
7.	if $D > 5$
8.	Generate five dimensions randomly.
9.	for $j = 1:5$
10.	Compute y using Eq. (4).
11.	The dimension of the positions are updated using Eq. (2).
12.	end for
13.	else // Dimension is lower than 5//
14.	Generate f_1 and f_2 using in Eq. (5).
15.	Choose a dimension randomly.
16.	The dimension of the positions are updated using Eq. (5).
17.	end if
18.	end for
	//Exploitation stage//

```
19. else
20.     Five individuals are determined using DFDB method.
21.     Generate distances using Eq. (13).
22.     for  $i = 1: N_p$ 
23.         The position of the individuals is updated using Eq. (7).
24.         if  $i = N_p$ 
25.             The position of the individuals is updated using Eq. (8).
26.         end if
27.     end for
28. end if
29.     Compute the fitness function of all individuals.
30.     Obtain the global best solution.
31.      $t = t + 1$  and  $FE = FE + 1$ ;
32. end while
```

3. SIMULATION SETTINGS AND ENVIRONMENT

This section explains the requirements for executing simulation studies and the parameter configurations of the algorithms. The settings employed in the simulation studies conducted to validate the DFDBSFOA algorithm are detailed below.

- The competition settings established by CEC2020 and CEC2022 served as references for the simulation studies. The CEC2020 benchmark suites were examined in 30-, 50-, and 100-dimensional search spaces, while the CEC2020 benchmark suites were also assessed in 10- and 20-dimensional search spaces.
- To ensure a fair evaluation of the algorithms, the maximum number of fitness evaluations ($maxFEs$) was established as the termination criterion, set at 10000 multiplied by the dimension.
- Each algorithm was executed 51 times for every benchmark problem.

Five contemporary and robust MHS algorithms were employed to evaluate the performance of the proposed DFDBSFOA. The parameter configurations of these algorithms are given in Table 1. Furthermore, the parameters of the DFDBSFOA were identical to those of the standard SFOA.

Table 1. Parameter settings of the algorithms.

Algorithm	Parameters
DFDBSFOA	<i>population size</i> = 50
SFOA	<i>population size</i> = 30
ALA	<i>Population size</i> = 30
AO	<i>population size</i> = 30, $\delta = 0.1$, $\alpha = 0.1$, $u = 0.00565$, $w = 0.005$, $r_1 = 10$
POA	<i>population size</i> = 30
TSA	<i>population size</i> = 20, $p_{switch} = 0.3$, $p_{esc} = 0.8$

4. SIMULATION RESULTS

In this section, the simulation results for the proposed DFDBSFOA and its competitors were presented. To compare the algorithms' performance, the results were examined and analyzed using statistical analysis methods, convergence analysis, and boxplot analysis.

4.1. Statistical Analysis

The Friedman and Wilcoxon tests are frequently employed in the literature to assess statistically the performance of algorithms. Table 2 presents the Friedman scores of the six algorithms: DFDBSFOA, SFOA, ALA, AO, POA, and TSA, assessed on the CEC2020 benchmark set for 30, 50, and 100 dimensions, as well as on the CEC2022 benchmark set for 10 and 20 dimensions. The mean rank values from all tests are presented, offering a comprehensive comparison of algorithmic performance. Within the framework of the Friedman test, lower scores signify superior relative performance.

The DFDBSFOA had the lowest Friedman scores (1.9843–2.2451) across all benchmark dimensions. The overall mean rank of **2.1339** was the best among all methods, exhibiting robustness and remarkable performance across benchmark suites and problem dimensions. The SFOA was the second-best performer with a mean score of 2.8470, doing well in CEC2022 (2.0801 at D=20) but poorly in CEC2020 at higher dimensions. The ALA and TSA had intermediate mean ranks of 3.0857 and 3.1392. Both methods performed well in lower dimensions but struggled in higher dimensions or CEC2022. The AO and POA scored highest with Friedman ratings of 4.6407 and 5.1536. These methods performed poorly in both CEC2020 and CEC2022. The Friedman test results showed that the DFDBSFOA was the most successful and robust algorithm on various benchmarks and dimensions, while the SFOA was second but less consistent.

Table 2. Friedman scores of proposed DFDBSFOA and its rivals.

Method	CEC2020			CEC2022		Mean Rank
	D=30	D=50	D=100	D=10	D=20	
DFDBSFOA	2.2382	2.2451	1.9843	2.1985	2.0033	2.1339
SFOA	3.4578	3.7353	2.7549	2.2067	2.0801	2.8470
ALA	3.1696	2.9275	2.6157	3.1944	3.5212	3.0857
AO	4.5784	4.4843	4.1275	5.4297	4.5833	4.6407
POA	5.1245	5.2157	5.3608	4.7761	5.2908	5.1536
TSA	2.4314	2.3922	4.1569	3.1944	3.5212	3.1392

Table 3 presents the results of the Wilcoxon signed-rank test, offering a pairwise comparison of the DFDBSFOA against its rivals across the CEC2020 benchmark set (30, 50, and 100 dimensions) and the CEC2022 benchmark set (10 and 20 dimensions). The results are presented as +/-/-, where “+” signifies the instances in which the DFDBSFOA surpasses the comparison method, “=” represents ties, and “-” indicates instances of underperformance by the DFDBSFOA.

In the CEC2020 benchmark suite, DFDBSFOA surpassed most competitors. It dominated the SFOA at D=30 (7/3/0) and D=50 (9/1/0), with just limited competition at D=100 (6/2/2). The

DFDBSFOA surpassed the AO and POA in all dimensions and the ALA in most cases (6/2/2 at D=30 and 6/1/3 at D=100). The performance difference gets smaller more than the TSA at D=30 and D=50 (4/2/4 and 4/3/3, respectively), but at D=100, the DFDBSFOA regained its lead (8/2/0). On the other hand, the CEC2022 benchmark suite favored the DFDBSFOA much more. The two methods fared similarly against the SFOA (4/5/3 and 4/4/4). It outperformed the ALA, AO, and POA in most comparisons, proving its robustness. In most functions, the DFDBSFOA outperformed the TSA statistically. To sum up, the Wilcoxon test results showed that the DFDBSFOA outperformed most competing algorithms on both CEC2020 and CEC2022.

Table 3. Wilcoxon test results between the DFDBSFOA algorithm and its rivals.

DFDBSFOA vs. + / = / -	CEC2020			CEC2022	
	D=30	D=50	D=100	D=10	D=20
SFOA	7/3/0	9/1/0	6/2/2	4/5/3	4/4/4
ALA	6/2/2	6/3/1	6/1/3	9/2/1	9/2/1
AO	9/1/0	8/2/0	9/1/0	12/0/0	11/1/0
POA	9/1/0	9/1/0	9/1/0	11/1/0	11/1/0
TSA	4/2/4	4/3/3	8/2/0	9/2/1	9/2/1

4.2. Convergence and Box-Plot Analysis

Convergence graphs track the enhancement of algorithms across iterations, generally by plotting error levels in relation to function evaluations. This study compared the DFDBSFOA with five rivals across four problem types (F1-unimodal, F3-multimodal, F7-hybrid, and F10-composition) selected from the CEC2020 benchmark suite at 100 dimensions. The convergence graphs of them are presented in Fig. 1. The DFDBSFOA typically converged more rapidly and achieved lower error value than its rivals. For the F1 and F7, it surpassed the ALA initially, although the SFOA and TSA exhibited slower improvements, and the AO and POA remained weak. For the F3, it outperformed the ALA in the later stages, resulting in minimal advancements for the SFOA,

TSA, AO, and POA. For the F10, it achieved the minimal error values, whereas the ALA, TSA, and SFOA exhibited similar final performance. Overall, the results obtained from the CEC2020 benchmark suites for 100 dimensional search space confirmed that the DFDBSFOA outperformed its rivals regarding resilience and precision.

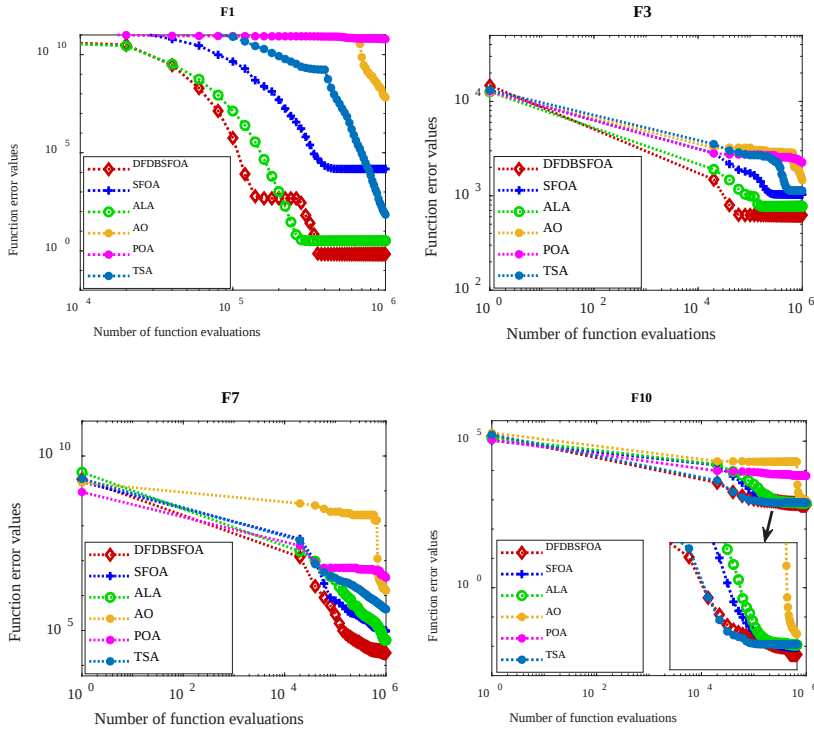


Fig. 1. Convergence graphs of the selected functions from CEC2020 benchmark suite for 100 dimension.

Box plots represent the distribution of error values throughout numerous iterations, emphasizing consistency via medians, variance, and outliers. Four different types of problems (F1-unimodal, F4-multimodal, F6-hybrid, and F12-composition type) were selected from CEC2022 benchmark suites. The box-plots were drawn for them based on the function error values in

10 dimension, presented in Fig. 2. The DFDBSFOA consistently achieved the lowest mean errors with stable distributions. For the F1, the DFDBSFOA had a low error value when matching the SFOA, ALA, and TSA; nevertheless, the POA had substantial errors, and the AO was unstable. Its stability and mean error were the best for the F4, with the SFOA's slightly higher values placing it in a close second. It surpassed all competitors for the F6 by achieving near-zero errors with tight variance. The F12 demonstrated superior search performance compared to all other algorithms. The DFDBSFOA demonstrated superior robustness and accuracy compared to its competitors in the CEC2022 benchmark suite.

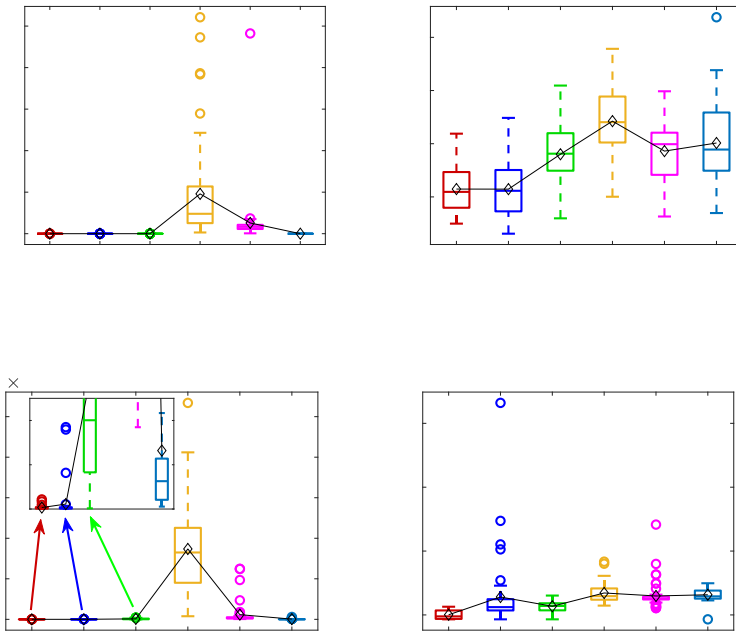


Fig. 2. Box plots of the selected functions from CEC2022 benchmark suite for 10 dimension.

5. CONCLUSION

This study proposed a dynamic fitness-distance balance method based starfish optimization algorithm (DFDBSFOA) to solve the real-world engineering problems. The SFOA had a balancing issue between exploration and exploitation, and the algorithm lacked exploitation skills. Therefore, the DFDB method was employed to choose guide solution candidates during exploitation phase. To show the effectiveness of the proposed algorithm, five MHS algorithms including the SFOA, ALA, AO, POA, and TSA were used as competitor. The CEC2020 and CEC2022 benchmark problem suites were used to assess the performance of the proposed DFDBSFOA and its rivals. In order to evaluate the results of the algorithms, the Friedman and Wilcoxon tests were applied. Moreover, the convergence and box-plot analysis were examined. All analysis results show that the proposed DFDBSFOA outperformed the base SFOA and other algorithms. Thus, a powerful MHS algorithm was proposed to the literature. In future works, the proposed DFDBSFOA algorithm will be used to solve power system planning and operation problems (Ozkaya et al., 2025), dynamic voltage regulation problem (Efe, 2018), power quality problem (Özer, Efe, and Özbay, 2021), and harmonic distortion problems (Akdeniz and Efe, 2025).

REFERENCES

- Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A. A., Al-Qaness, M. A., & Gandomi, A. H. (2021). Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107250.
- Akdeniz, M., & Efe, S. B. (2025). Forecasting of harmonic distortions in mv distribution network caused by illumination devices. *Light & Engineering*, 33(2).
- Aras, S., Gedikli, E., & Kahraman, H. T. (2021). A novel stochastic fractal search algorithm with fitness-distance balance for global numerical optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 61, 100821.
- Duman, S., Kahraman, H. T., Sonmez, Y., Guvenc, U., Kati, M., & Aras, S. (2022). A powerful meta-heuristic search algorithm for solving global optimization and real-world solar photovoltaic parameter estimation problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111, 104763.
- Duman, S., Kahraman, H. T., & Kati, M. (2023). Economical operation of modern power grids incorporating uncertainties of renewable energy sources and load demand using the adaptive fitness-distance balance-based stochastic fractal search algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105501.
- Duman, S., Ozbay, H., Celik, E., Efe, S. B., Isen, E., & Duman, B. (2023). Improvement of the Fitness-Distance Balance-Based Supply-Demand Optimization Algorithm for Solving the Combined Heat and Power Economic Dispatch Problem. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 47(2), 513-548.

- Ebeed, M., Ali, S., Kassem, A. M., Hashem, M., Kamel, S., Hussien, A. G., ... & Mohamed, E. A. (2024). Solving stochastic optimal reactive power dispatch using an Adaptive Beluga Whale optimization considering uncertainties of renewable energy resources and the load growth. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(7), 102762.
- Efe, S. B. (2018). Upfc based real-time optimization of power systems for dynamic voltage regulation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 116(3), 391-406.
- Hu, G., Song, K., & Abdel-salam, M. (2025). Sub-population evolutionary particle swarm optimization with dynamic fitness-distance balance and elite reverse learning for engineering design problems. *Advances in Engineering Software*, 202, 103866.
- Kahraman, H. T., Aras, S., & Gedikli, E. (2020). Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105169.
- Kahraman, H. T., Bakir, H., Duman, S., Katı, M., Aras, S., & Guvenc, U. (2022). Dynamic FDB selection method and its application: modeling and optimizing of directional overcurrent relays coordination. *Applied Intelligence*, 52(5), 4873-4908.
- Layeb, A. (2022). Tangent search algorithm for solving optimization problems. *Neural Computing and Applications*, 34(11), 8853-8884.
- Ozkaya, B. (2024). Enhanced growth optimizer algorithm with dynamic fitness-distance balance method for solution of security-constrained optimal power flow problem in the presence of stochastic wind and solar energy. *Applied Energy*, 368, 123499.

- Özer, İ., Efe, S. B., & Özbay, H. (2021). CNN/Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(12), e13204.
- Salgotra, R., & Mirjalili, S. (2024). Multi-algorithm based evolutionary strategy with adaptive mutation mechanism for constraint engineering design problems. *Expert Systems with Applications*, 258, 125055.
- Tang, Z., Tao, S., Wang, K., Lu, B., Todo, Y., & Gao, S. (2022). Chaotic wind driven optimization with fitness distance balance strategy. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 15(1), 46.
- Trojovský, P., & Dehghani, M. (2022). Pelican optimization algorithm: A novel nature-inspired algorithm for engineering applications. *Sensors*, 22(3), 855.
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (2002). No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1(1), 67-82.
- Xiao, Y., Cui, H., Khurma, R. A., & Castillo, P. A. (2025). Artificial lemming algorithm: a novel bionic meta-heuristic technique for solving real-world engineering optimization problems. *Artificial Intelligence Review*, 58(3), 84.
- Yue C. T. , Price K. V., Suganthan P. N., Liang J. J., Ali M. Z., Qu B. Y., , Biswas P. P. (2019) Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2020 special session and competition on single objective bound constrained numerical optimization. *Comput. Intell. Lab., Zhengzhou Univ., Zhengzhou, China, Tech. Rep 201911*.

Zhong, C., Li, G., Meng, Z., Li, H., Yildiz, A. R., & Mirjalili, S. (2025). Starfish optimization algorithm (SFOA): a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization compared with 100 optimizers. *Neural Computing and Applications*, 37(5), 3641-3683.

A SIMSCAPE-BASED MODELING APPROACH FOR THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A PNEUMATIC ACTUATOR SYSTEM

Batın DEMİRCAN¹

Tuğçe YAREN²

1. INTRODUCTION

In studies focusing on the analytical modeling of pneumatic systems and control theory-based solutions, the engineering fundamentals of system dynamics have been extensively examined (Dorri, Pocari, Londo, & Alimhillaj, 2023). Research comparing different valve types has reported that high-speed switching valves are suitable for industrial applications due to their low power consumption and rapid response characteristics (Gaheen, Benini, Khalifa, & Aziz, 2022). In investigations addressing the control of nonlinear dynamics, it has been demonstrated that, in addition to classical PID structures, sliding mode control (SMC) and adaptive control approaches enhance tracking accuracy and provide more stable results under system uncertainties (Tran, Nguyen, Vu, & Bui, 2024). Experimentally validated studies on PWM-based control architectures have shown that the use of accumulators and the mitigation of dead-zone effects significantly improve overall system performance (Mabrouk, Youssry, & Elmayyah, 2020).

¹ Lect., Balıkesir University, Balıkesir Vocational School, Dept. of Electronic and Automation, Türkiye, batin.demircan@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0765-458X.

² Asst.Prof.Dr., Balıkesir University, Faculty of Engineering, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Türkiye, tugce.yaren@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9937-3111

From an energy efficiency perspective, analyses have revealed that air leakage in directional control valves substantially degrades system performance, while PLC-based leakage detection methods can effectively minimize these losses (Azraai et al., 2025). Research aimed at improving modeling accuracy emphasizes the necessity of incorporating friction, temperature variations, and thermodynamic effects into the model (Zhou & Shen, 2024). Furthermore, studies combining PID and SMC controllers with discrete directional valves have reported enhanced position-tracking precision against external load variations (Szakács & Khalifa, 2024). These findings collectively indicate that, due to the inherently nonlinear characteristics of pneumatic systems, the implementation of advanced control algorithms is essential, and MATLAB/Simulink–Simscape-based simulation environments have become standard tools for modeling and analysis in this field.

In this study, a numerical model of a system in which a double-acting pneumatic cylinder (pneumatic actuator) is controlled through a proportional directional control valve has been developed. The modeling process has been conducted using the Simulink and Simscape environments included in MATLAB R2024b (The MathWorks, 2025). The objective of this system is to develop a physical model that realistically represents the behavior of a pneumatic actuator and to observe the dynamic response of the actuator position under a user-defined input signal. The model has been designed to investigate the behavior of real industrial pneumatic systems at a laboratory scale and to provide a foundation for the design of control algorithms.

2. HYDRAULIC SYSTEM CONFIGURATION

The system consists of a pressure source, a proportional directional control valve, a double-acting pneumatic cylinder,

pressure and position sensors, and an atmospheric reference line. These components are physically interconnected within the Simscape environment, and the time-dependent dynamic response of the system has been analyzed through Simulink. The proportional directional control valve regulates the pressure and flow balance by changing the spool position according to the electrical input signal, and the resulting pressure difference generates the reciprocating motion of the piston. The piston motion is measured in the mechanical translational domain and converted to millimeters through the position sensor. All components have been selected from the Simscape library of MATLAB/Simulink. In this configuration, a sinusoidally varying input signal is used to analyze the proportional valve response and the corresponding change in cylinder position. The obtained results provide insights into the time-dependent dynamic characteristics of pressure distribution, actuator velocity, and position response in the pneumatic system. In this study, a double-acting pneumatic actuator is employed as the main motion element of the pneumatic system. This component enables the piston to move in both forward and backward directions through the pressure difference between its two chambers. The general appearance of the actuator used in the model is shown in Figure 1.

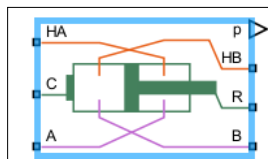


Figure 1. Double-Acting Actuator (G)

The pneumatic cylinder is connected to the valve outlets through ports A and B, where the air pressure within each chamber varies dynamically. The piston motion is transmitted to the external environment through the mechanical translational domain, and this motion is modeled as the position variable

representing the system. The A chamber of the cylinder has a cross-sectional area of $8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, while the B chamber has an area of $6.91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. This difference arises from the presence of the rod cross-section on one side of the piston. The total stroke length of the cylinder is defined as 0.1 m (100 mm). The dead volume of each chamber is set to $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. The port areas for A and B are equal and selected as $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. The ambient condition is adjusted according to atmospheric pressure, which is assumed to be 0.101325 MPa. To prevent physical damage when the piston reaches the mechanical end limits under the boundary conditions of the system, a hard-stop model is implemented. In this model, the stiffness coefficient is defined as $5 \times 10^7 \text{ N/m}$, and the damping coefficient is $300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$. The transition region is set to 0.2 mm, ensuring a smooth increase in force as the piston approaches the end position.

Under the initial conditions, the gas pressure in both chambers is set to 0.101325 MPa, and the gas temperature is defined as 293.15 K (20 °C). The initial piston position is assigned as 0 m, indicating that the piston is located at the starting point of the stroke. These parameters have been optimized to represent the physical behavior of the system at a laboratory scale. Thus, a symmetric pneumatic actuator structure capable of motion in both forward and backward directions has been achieved. To obtain the piston position information of the pneumatic actuator, the Ideal Translational Motion Sensor block has been employed. This component is used to measure the mechanical translational motion of the actuator. The general appearance of the sensor is shown in Figure 2.

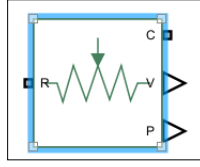


Figure 2. Ideal Translational Motion Sensor

In the model, the measurement reference of the sensor is defined as Difference, allowing the piston motion to be measured based on the displacement between two reference points. In the parameter settings, only the position and velocity measurements are enabled, while the acceleration measurement is deactivated. The initial position is defined as 0 m, indicating that the piston is located at the reference point of the stroke at the beginning of the simulation. The obtained position data are then converted into millimeters and transferred to the Simulink environment under the name “Actuator Position.” To represent the inertial effects of the moving mechanical components in the pneumatic system, a Mass block has been utilized. This block models the total mass of the actuator piston and the attached load. The general appearance of the mass block used in the model is shown in Figure 3.

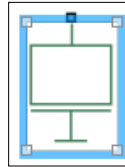


Figure 3. Mass

According to the model parameters, the mass value of this block is defined as 2 kg. This value is selected to represent the combined effect of the pneumatic cylinder piston and the associated moving components. The number of graphical connection points is defined as one. This mass value directly affects the natural frequency and dynamic response of the system. To establish the fixed reference point of the mechanical system in the model, a *Mechanical Translational Reference* block has been

utilized. This block defines the local reference for the mechanical translational connections between the pneumatic cylinder and the mass components, ensuring that the system's motion equations are accurately solved. The appearance of the block is shown in Figure 4.

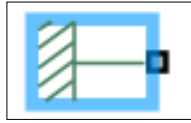


Figure 4. Mechanical Translational Reference

In pneumatic systems, a fixed reference point is required to model the dynamic behavior of the moving piston or mechanical components. This block represents the zero-displacement (displacement = 0) point of the system, allowing the piston motion to be calculated relative to this reference rather than in absolute terms. This component is essential for maintaining energy conservation and accurately defining the force–displacement relationships. In the model, a *Translational Damper* block is employed to reduce vibrations that may occur in the mechanical part of the pneumatic system and to enhance the dynamic stability of the system. This component suppresses mechanical oscillations caused by sudden velocity changes of the moving piston, enabling the system to exhibit a more stable position response. The general appearance of the block is shown in Figure 5.

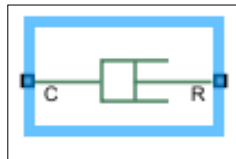


Figure 5. Translational Damper

The Translational Damper block defined in the Simscape environment employs a damping model based on the force–velocity relationship. In this model, a resistive force proportional

to the piston velocity is generated, representing the mechanical energy dissipation of the system. The damping coefficient is defined as 200 N·s/m in the model parameters. This value is selected to allow the system to reach its equilibrium position stably without excessive oscillations. To model the airflow direction and pressure losses in the pneumatic system, a Pipe block has been utilized. This component represents the connection line between the valve outlet and the cylinder chambers. The block enables a more accurate simulation of the real system behavior by accounting for factors such as fluid friction, heat transfer, and pressure drop in the pneumatic flow. The general appearance of the block is shown in Figure 6.



Figure 6. Pipe

The pipe defined in the model has a length of 1.5 m, a cross-sectional area of $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, and a hydraulic diameter of 0.02 m. These values represent typical pneumatic connection lines used at a laboratory scale. The inner surface roughness is defined as $15 \times 10^{-6} \text{ m}$, while the laminar flow limit and the turbulence transition are set to Reynolds numbers of 2000 and 4000, respectively. In the laminar region, the Darcy friction factor is taken as 64, and the Nusselt number is defined as 3.66. The total equivalent length of local resistances is 0.1 m, representing the overall loss effects of the connection fittings. Additionally, to limit heat transfer within the pneumatic system, a *Perfect Insulator* block has been employed. This block represents an ideal insulation condition in which heat transfer is completely prevented within certain components. The general appearance of the block is shown in Figure 7.



Figure 7. Perfect Insulator

The Perfect Insulator block is used to model this condition by assuming zero heat flow between the two connected thermal nodes. Thus, the temperature variation of the fluid depends solely on pressure and volume changes, while environmental heat losses are not included in the model. To control the flow direction and pressure distribution within the pneumatic system, a 4-Way 3-Position Directional Valve block has been employed. This component operates based on the principle of proportional control and adjusts the flow area by changing the spool position according to the input signal. The general appearance of the valve is shown in Figure 8.

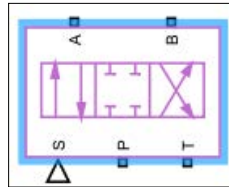


Figure 8. Directional Valve (G)

The directional control valve used in the model has a structure consisting of four ports (P, T, A, and B) and three operating positions. The P port is connected to the pressure supply line, the T port to the exhaust line, and the A and B ports to the two chambers of the pneumatic cylinder. This configuration enables the valve to direct the fluid toward either the A or B line depending on the spool position, while completely blocking the flow in the center position. In the Simscape environment, the valve parameterization is performed using the orifice area method, and the opening characteristic is defined as linear. The

maximum orifice area is set to $3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, the discharge coefficient to 0.7, the leakage flow rate ratio to 1×10^{-4} , the flow smoothing factor to 0.05, and the laminar flow pressure ratio to 0.99. All port cross-sectional areas are defined as $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. By setting the valve position offsets to zero, a center-closed configuration is achieved. These parameters ensure a balance between precise control at low flow rates and stable operation under high pressure.

The amplitude and frequency of the input signal determine the valve opening ratio, which in turn modifies the pressure difference between the A and B chambers, causing the piston to move in the forward or backward direction. To represent the energy source of the pneumatic system, a Pressure Source (Reservoir) block has been employed. This component provides a constant supply of pressurized air to the system, generating the fluid energy required for the operation of the pneumatic line. The general appearance of the block is shown in Figure 9.

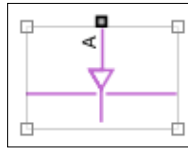


Figure 9. Pressure Source

In the model, the pressure source is defined using the Specified Pressure option, with a reservoir pressure of 0.6 MPa, a temperature of 293.15 K (20 °C), and a port cross-sectional area of $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. These values represent the commonly used 6-bar pressure level in laboratory-scale pneumatic systems. The Pressure Source (Reservoir) block provides the main air supply of the system, serving as the source of the fluid directed by the valve to both chambers of the cylinder. It also defines the reference pressure level for the initial conditions of other pneumatic components in the model.

A stable pressure source is preferred in the model since it ensures continuity and accuracy during dynamic analyses. The reservoir temperature is kept constant, and the effect of thermal variations on pressure is neglected. In addition, to define the atmospheric reference conditions in the exhaust line, an Atmosphere (Reservoir) block has been employed. This block represents the exhaust line of the pneumatic system, ensuring that the pressure returns to atmospheric level. The general appearance of the block is shown in Figure 10.

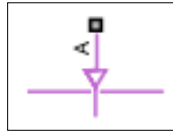


Figure 10. Atmosphere

In the model, the atmospheric pressure is taken as the reference value, and under this condition, the fluid exiting the system is assumed to be freely discharged into the environment. This configuration is typically connected to the T port of the valve in pneumatic circuits, establishing a fixed zero-pressure point to maintain system pressure balance. In the Simscape environment, the block parameters are defined using the Atmospheric pressure option. The reservoir temperature is maintained at 293.15 K (20 °C), and the port cross-sectional area is set to $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. This value represents free-flow conditions in the exhaust line and realistically reflects the gas discharge dynamics within the model. The atmosphere block defines the boundary condition in the energy equations of the pneumatic system, ensuring that pressure variations between the valve and the cylinder are accurately computed. Consequently, as the compressed air returns to the atmosphere after completing its operation, the overall pressure equilibrium of the system is preserved.

To define the thermodynamic properties of the working fluid used in the pneumatic system, a Gas Properties (G) block

has been employed. This component ensures that all pneumatic elements in the system (valve, cylinder, pipeline, reservoir, etc.) operate under consistent gas properties, thereby enabling the energy equations of the model to be solved coherently. The general appearance of the block is shown in Figure 11.

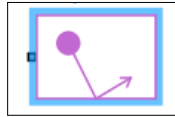


Figure 11. Gas Properties (G)

The gas used in the model is defined as a Perfect Gas (ideal gas). Under this definition, the gas compressibility is assumed to be 1. The specific gas constant is set to 0.287 kJ/(kg·K), the reference temperature to 293.15 K (20 °C), and the specific heat capacity at constant pressure to 1.005 kJ/(kg·K). In addition, the reference enthalpy is defined as 420 kJ/kg, the dynamic viscosity as 18.27 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, and the thermal conductivity as 26.2 mW/(K·m).

The valid operating range of the model is defined by a minimum temperature of 0.1 K, a maximum temperature of 600 K, a minimum pressure of 1×10^4 Pa, and a maximum pressure of 1.5 MPa. The atmospheric pressure is kept constant at 0.101325 MPa. These parameters represent the typical industrial operating conditions of pneumatic systems within the 0–6 bar range. This block determines the physical properties of the gas used throughout the system, ensuring accurate computation of flow, pressure, temperature, and energy transfer equations. Therefore, the Gas Properties component serves as a fundamental reference in the thermodynamic modeling of the pneumatic system.

To monitor the pressure variations between the chambers in the pneumatic system, a Pressure & Temperature Sensor block has been used. This sensor is a versatile measurement component in the Simscape environment capable of measuring both pressure

and temperature. In the model, only pressure measurement is enabled, while temperature measurement is deactivated. The general appearance of the block is shown in Figure 12.

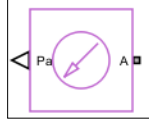


Figure 12. Pressure & Temperature Sensor (G)

In the model, Simulink-PS Converter and PS-Simulink Converter blocks have been used to enable data exchange between the Simscape physical domain and the Simulink signal environment. These blocks serve as an interface between the physical modeling of the system and the numerical processing of control signals. The general appearance of both blocks is shown in Figure 13.

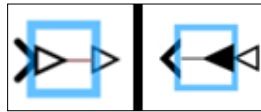


Figure 13. Converter Blocks

To define the numerical solution process of the model and ensure the accurate computation of the physical equations established in the Simscape environment, a Solver Configuration block has been employed. This component contains the fundamental solver setup that computes the mathematical model of the system as a function of time. The general appearance of the block is shown in Figure 14.

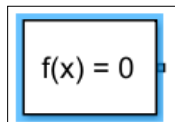


Figure 14. Solver Configuration

In the model, the equations are solved based on the time formulation approach. To enhance the stability of the differential equations, the Derivative replacement method is selected as the index reduction method. This technique stabilizes higher-order differential equations and prevents numerical degradation during the solution process. For consistency verification, the Model AbsTol and RelTol option is used, with the tolerance factor set to 0.001. In the Simscape environment, this block establishes a common solution node among all physical domains in the system. In other words, the energy variations within the pneumatic, mechanical, and thermodynamic subsystems are computed consistently within the same time step.

The control signal applied to the proportional directional control valve in the pneumatic system is generated using a Sine Wave block. This block produces a sinusoidal waveform as a function of time, providing a periodic reference input for analyzing the dynamic response of the system. The general appearance of the block is shown in Figure 15



Figure 15. Sine Wave Block

In the model, the sine wave is generated in a time-based configuration, where the simulation time is used as the time variable. The signal parameters are defined as an amplitude of 1, an offset of 0, a frequency of 3.1416 rad/s, a phase angle of 0 rad, and a sampling time of 0.001 s. These parameters ensure that the sinusoidal input applied to the valve control signal is low-frequency and stable. The generated signal is directly transferred to the Simscape environment through the *Simulink-PS Converter* block and applied to the input port of the proportional directional control valve. Thus, the system operates under a time-varying

input signal at a specific frequency, allowing the time-dependent response of the cylinder position to be observed.

In the visualization of the simulation results, *Scope* blocks are employed. Additionally, a *Gain* block with a factor of 1000 is used to convert the pneumatic actuator position data into millimeters (“mm”). Finally, the connection structures of all components are shown in Figure 16.

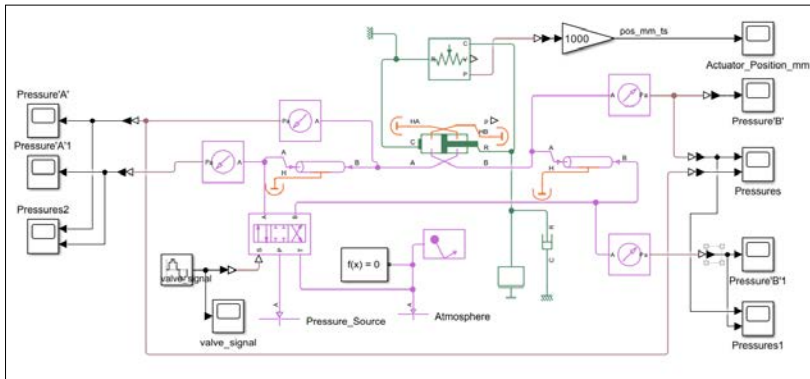


Figure 16. Pneumatic System Architecture

3. SIMULATION RESULTS

In the simulation, the input signal applied to the proportional directional control valve of the pneumatic system is defined as a sinusoidal waveform. This input varies the spool position of the valve over time, thereby controlling the pneumatic flow paths. The time-dependent variation of the applied signal is shown in Figure 17.

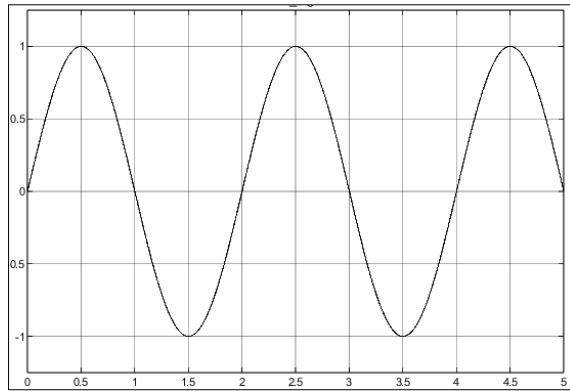


Figure 17. Valve Signal

As shown in Figure 18, the input signal has a smooth sinusoidal waveform with an amplitude of 1 and an angular frequency of 3.1416 rad/s. This signal serves as the primary reference input that enables the proportional valve control system to perform continuous and consistent forward–backward motions. During the positive half-cycle of the signal, the valve spool moves in one direction, directing the compressed air into chamber A of the cylinder, whereas during the negative half-cycle, the spool moves in the opposite direction, reversing the flow direction.

The pressure variation in line A of the pneumatic cylinder is shown in Figure 18. In the figure, the pressure variations at both the inlet and outlet ends of the pipeline connected to line A are presented together. The two curves are observed to overlap almost completely. According to the obtained results, the maximum measured pressure in line A is approximately 6×10^5 Pa (0.6 MPa). This value is in full agreement with the system's input pressure of 0.6 MPa, confirming the accuracy of the model and validating the assumption of negligible flow losses. The minimum pressure is measured at approximately 1×10^5 Pa (0.1 MPa), representing the near-atmospheric pressure level.

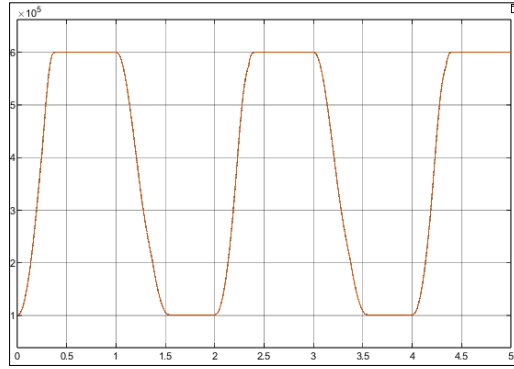


Figure 18. The pressure variation at the inlet and outlet points of line A in the pneumatic actuator

The pressure variation in line B of the pneumatic cylinder is shown in Figure 19. The graph presents the pressure profiles at both the inlet and outlet points of the pipeline connected to line B. According to the obtained results, the two curves completely overlap. The maximum pressure in line B is approximately 6×10^5 Pa (0.6 MPa), which is consistent with the system's input pressure. The minimum pressure is measured at around 1×10^5 Pa (0.1 MPa). Similar to line A, this value represents the moments when the valve position changes and the connection to the atmosphere occurs.

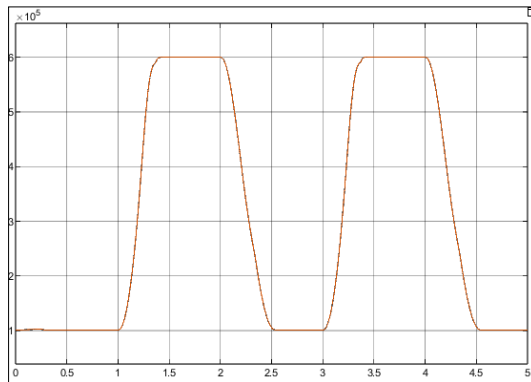


Figure 19. The pressure variation at the inlet and outlet points of line B in the pneumatic actuator

The pressure variations in chambers A and B of the pneumatic actuator are shown in Figure 20. In the graph, the orange curve represents the pressure in chamber A, while the black curve represents the pressure in chamber B. The two pressure waveforms vary in opposite phases, clearly demonstrating the characteristic behavior of double-acting pneumatic cylinders.

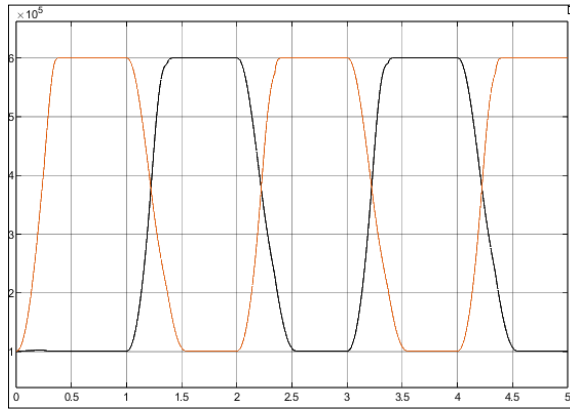


Figure 20. The reciprocal pressure variations in chambers A and B of the pneumatic actuator

The valve spool position alternately directs the compressed air to chambers A and B during each half cycle. In the positive half-cycle, the valve delivers compressed air to line A while line B is vented to the atmosphere; consequently, the pressure in chamber A rises to approximately 6×10^5 Pa (0.6 MPa), while the pressure in chamber B drops to around 1×10^5 Pa (0.1 MPa). In the negative half-cycle, the process reverses pressure increases in chamber B while chamber A is exhausted. This alternating pressure variation is the primary cause of the piston's reciprocating motion and demonstrates how pneumatic pressure differences are converted into mechanical motion within the system. The smooth and symmetric variation of the curves indicates stable valve control performance and the absence of hysteresis or delay-induced instabilities. The time-dependent

variation of the pneumatic cylinder piston position is shown in Figure 21. The graph confirms that the double-acting cylinder structure successfully performs a full-stroke motion in both directions

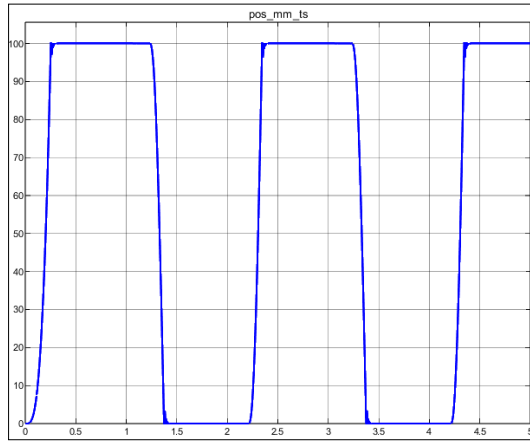


Figure 21. Pneumatic Actuator Position

According to the simulation results, the piston oscillates between 0 and 100 mm. This motion occurs due to the reversal of the pressure difference between chambers A and B; as the valve input signal varies sinusoidally, the piston position responds linearly with forward and backward movement. The square wave-like position profile observed in the graph indicates that the pneumatic cylinder exhibits a fast response time and reacts to valve position changes without delay. After reaching the maximum stroke value of 100 mm, the piston remains momentarily in a stable state before returning as the pressure difference reverses. This behavior demonstrates that the pneumatic system exhibits symmetric and repeatable motion under proportional valve control.

4. CONCLUSIONS

In this study, a pneumatic actuator system was modeled and its dynamic behaviors were analyzed using Simscape modules within the MATLAB R2024b Simulink environment. The model includes a double-acting pneumatic cylinder, a proportional directional control valve, pipelines, and sensor components, providing a numerical representation of the physical system. Simulation results demonstrated that the sinusoidal input signal applied to the valve periodically altered the pressure difference between chambers A and B, enabling the piston to successfully perform a full-stroke motion within the 0–100 mm range. The obtained out-of-phase pressure profiles in lines A and B were found to be consistent with the expected behavior of a double-acting cylinder configuration. The overlap between the inlet and outlet pressure values of the pipeline confirmed that the system exhibited negligible pressure losses. The results reveal that the developed model provides a reliable simulation framework for the analysis of valve dynamics and the development of control strategies in pneumatic systems. In future studies, the model is intended to be integrated with closed-loop control architectures and validated through experimental investigations.

REFERENCES

- Azraai, M. A., Rani, R., Adnan, M. F. M., Qibtiah, R. M., Mayyidin, A. I., Asnawi, R., & Sulong, M. S. (2025). Advanced Pneumatic Control: Real-Time Leakage Detection Using Flow Sensors and Siemens PLC Integration. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 64(2), 187–198. <https://doi.org/10.37934/ARASET.64.2.187198>
- Dorri, A., Pocari, S., Londo, A., & Alimhillaj, P. (2023). PID Control For Pneumatic Cylinder Stiffness For Aerospace Applications. Retrieved October 7, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/371761769_Pid_Control_For_Pneumatic_Cylinder_Stiffness_For_Aerospace_Applications
- Gaheen, O. A., Benini, E., Khalifa, M. A., & Aziz, M. A. (2022). Pneumatic cylinder speed and force control using controlled pulsating flow. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 35, 101213. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2022.101213>
- Mabrouk, M. H., Youssry, M. A., & Elmayyah, W. M. (2020). Position control of a pneumatic cylinder actuator using modified PWM algorithm. *Journal of Engineering Science and Military Technologies*, 4(1), 121–126. <https://doi.org/10.21608/EJMTC.2020.31861.1145>
- Szakács, T., & Khalifa, N. (2024). Pneumatic Piston Control Optimization. *Journal of Physics: Conference Series*, 2848(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2848/1/012002>
- The MathWorks, Inc. (2025). MATLAB. Retrieved September 18, 2025, from <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

- Tran, V. T., Nguyen, B. S., Vu, T., & Bui, N. T. (2024). Trajectory Tracking Control of Pneumatic Cylinder-Actuated Lower Limb Robot for a Gait Training System. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 15367–15372. <https://doi.org/10.48084/ETASR.7733>
- Zhou, X., & Shen, J. (2024). Automatic Control Design of Pneumatic Solenoid Valve Based on Siemens PLC. *International Journal of Mechanical and Electrical Engineering*, 4(1), 1–6. <https://doi.org/10.62051/IJMEE.V4N1.01>

GÜNEŞ PANELLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI PERFORMANS ÖLÇÜMÜ YAPAN ARDUİNO TABANLI VERİ TOPLAMA VE KAYIT SİSTEMİ

Ali YÜCE¹

Kadir DOĞANŞAHİN²

1. GİRİŞ

Enerji talebinin küresel ölçekte sürekli artması, sanayileşme ve kentleşme süreçlerinin hızlanması ve fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi son yıllarda önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle artan nüfus, sanayileşme ve kentleşme süreçleri enerji talebini sürekli yükseltmekte; bu durum mevcut enerji üretim ve dağıtım altyapılarında sürdürülebilirlik açısından önemli baskılar yaratmaktadır (Li et al., 2015; Burger et al., 2018). Öte yandan fosil yakıtların kullanımının çevre üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler — özellikle sera gazı emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliği — hükümetleri ve endüstriyi karbon emisyonlarını azaltacak alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir (Panwar et al., 2011). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, dünya genelinde elektrik üretiminin yaklaşık %30'u yenilenebilir kaynaklardan sağlanmakta olup bu oranın 2050 yılına kadar %60 seviyesine ulaşacağı öngörülmektedir (IEA, 2023). Bu dönüşüm yalnızca enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından değil,

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ali.yuce@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4642-6272.

² Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, kadir.dogansahin@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6763-058X.

aynı zamanda enerji bağımsızlığının sağlanması, ekonomik kalkınmanın desteklenmesi ve çevresel etkilerin azaltılması açısından da stratejik bir zorunluluk olarak değerlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojileri, düşük karbon ekonomisine geçiş sürecinde kilit bir rol oynamakta ve birçok ülkenin uzun vadeli enerji politikalarının merkezinde yer almaktadır (Femia et al., 2017).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, yüksek teorik potansiyeli, çevresel sürdürülebilirliği ve hızla gelişen teknolojik altyapısı ile öne çıkmaktadır (Panwar et al., 2011). Fotovoltaik (FV) paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen yarı iletken yapıları sayesinde küresel enerji dönüşümünün merkezinde yer almaktadır. Son yıllarda hücre teknolojilerinde (PERC, TOPCon, HJT vb.) ve üretim süreçlerinde kaydedilen gelişmeler, panel verimliliklerini önemli ölçüde artırmış ve kurulum maliyetlerini azaltmıştır. Örneğin, PERC hücrelerinde %24'e kadar, TOPCon teknolojisinde %25–25.7'ye kadar ve SHJ yapılarında laboratuvar koşullarında %26.8'e kadar verimlilik elde edilmiştir (Ghosh et al., 2022; Kivambe et al., 2025). Bu ilerlemeler, FV teknolojisini yalnızca büyük ölçekli santrallerde değil, konut, ticari tesis ve taşınabilir enerji sistemlerinde de yaygınlaştırmıştır (Joshi, 2009).

Bununla birlikte, FV panellerin performansı yalnızca panel verimliliği veya malzeme özellikleriyle sınırlı değildir; çevresel ve operasyonel koşullar da üretim üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Işınım şiddeti, panelin eğim açısı, gölgeleme oranı ve özellikle hücre sıcaklığı gibi faktörler, çıkış gücünde belirleyici rol oynar. Literatürde sıcaklığın FV performansına etkisi üzerine yapılan birçok çalışma, her 1 °C'lık sıcaklık artışının panel veriminde yaklaşık %0,3–0,5 azalmaya neden olduğunu göstermektedir (Segbefia et al., 2023). Özellikle yanlış eğim açısı seçimi, ışıının yüzeye düşme oranını azaltarak yıllık enerji üretiminde belirgin kayıplara neden olabilir (örneğin yıllık

yaklaşık %8 enerji farkı rapor edilmiştir) (Tamoor et al., 2024; Amer et al., 2020). Bu durum, saha kurulumlarında gerçek zamanlı izleme ve optimizasyon ihtiyacını kaçınılmaz hale getirmektedir.

FV sistemlerin güvenilirliği açısından bir diğer kritik unsur da uzun dönemli izleme ve veri analizidir. Hücre sıcaklığı ve çevresel koşullara bağlı olarak zamanla meydana gelen termal genleşme, lehim bağlantılarında gerilim birikimi ve malzeme yaşlanması gibi etkiler, panel ömrünü kısaltabilir ve beklenmedik performans düşüşlerine neden olabilir (Segbefia et al., 2023). Bu nedenle, yalnızca anlık verimliliğin ölçülmesi değil, uzun vadeli davranışın izlenmesi ve verilerin detaylı analiz edilmesi de sistem optimizasyonunun vazgeçilmez bir parçasıdır.

Literatürde FV panel performans ölçümüne yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu geleneksel kristal silikon paneller için geliştirilmiş olup, genellikle sabit kurulum gerektiren laboratuvar ortamlarında kullanılmaktadır. Bu sistemler, yüksek hassasiyetli ölçüm yapabilmelerine karşın, yüksek maliyetleri, taşınabilir olmamaları ve sahada uzun süreli ölçüm yapmaya uygun olmayışları nedeniyle pratik uygulamalarda sınırlı kalmaktadır (Femia et al., 2017). Ayrıca bu çözümlerin önemli bir kısmı yalnızca gerilim ve akım gibi temel elektriksel parametrelerin ölçülmesine odaklanmış olup, panel yüzey sıcaklığı, eğim açısı veya çevresel koşullar gibi performansı doğrudan etkileyen değişkenleri kapsam dışı bırakmaktadır (Sutikno et al., 2021; Asnil et al., 2023). Örneğin, laboratuvar/test tezgâhı amaçlı tasarlanan gömülü izleme sistemleri, sahada taşınabilirlik ve kullanıcı-terafli ölçüm periyodu gibi ayarlarda sınırlamalar gösterebilmektedir (Dolara et al., 2024). Benzer şekilde, düşük maliyetli/IoT tabanlı birçok kaydedici temel olarak V-I (ve türetilmiş güç) izlemeye odaklanırken, eğim açısı gibi kurulum

parametrelerini kullanıcı girdisi veya sensörle açıkça yönetmeyebilir (Ansari et al., 2021; Demir et al., 2023).

Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında geliştirilen Arduino tabanlı taşınabilir datalogger (veri toplama ve kayıt cihazı), literatürde tanımlanan bu gereksinimleri doğrudan karşılamaya yönelik yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Geliştirilen sistem, panelin gerilim, akım ve güç gibi elektriksel parametrelerini ve arka yüzey sıcaklığını gerçek zamanlı olarak ölçebilmekte, elde edilen verileri zaman etiketli olarak SD karta kaydedebilmektedir. Ayrıca kullanıcı, menü arayüzü üzerinden ölçüm periyodu ve panel eğim açısı gibi kritik parametreleri ayarlayarak farklı senaryolar altında ölçümler gerçekleştirebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde cihaz, yalnızca akademik araştırmalarda değil, saha testi, kurulum optimizasyonu ve performans izleme gibi endüstriyel uygulamalarda da kullanılabilecek esnek, düşük maliyetli ve yüksek işlevli bir ölçüm platformu sunmaktadır.

2. SİSTEM TASARIMI YAKLAŞIMI

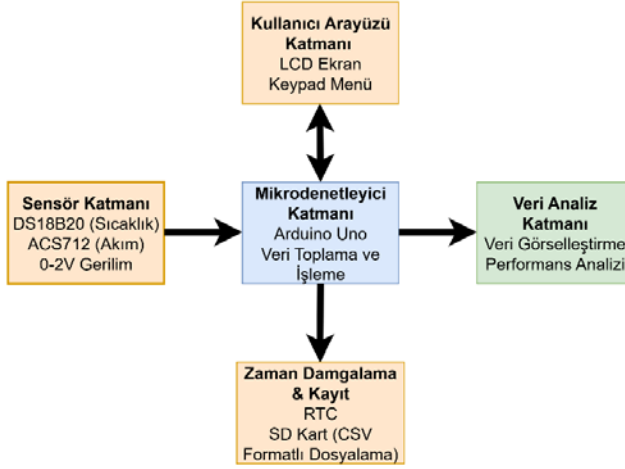
Bu çalışmanın temel amacı, FV panellerin yük altındaki performansını yüksek doğrulukla ölçebilen, taşınabilir, kullanıcı dostu ve düşük maliyetli bir datalogger sistemi tasarlamak ve geliştirmektir. Literatürde mevcut ölçüm sistemlerinin genellikle laboratuvar ortamına bağlı kalması, taşınabilir olmamaları, kullanıcı etkileşimine sınırlı olanak tanımaları ve ölçüm parametrelerinin sabit olması gibi nedenlerle saha uygulamalarında yetersiz kaldığı görülmektedir (Femia et al., 2017). Bu nedenle önerilen sistem, yalnızca temel elektriksel parametrelerin ölçülmesini değil, aynı zamanda farklı çalışma koşullarında FV panellerin davranışlarının ayrıntılı olarak analiz edilmesine imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır.

Sistem tasarımı sürecinde aşağıdaki kriterler gözetilmiştir:

- **Gerçek zamanlı veri toplama ve kayıt imkânı:** Panelin uç noktalarındaki gerilim, akım ve buna bağlı olarak güç değerleri ile panel yüzey sıcaklığı sürekli olarak izlenir ve zaman damgalı olarak kaydedilir.
- **Kullanıcı tarafından ölçüm aralığı ve panel eğim açısının ayarlanabilmesi:** Farklı çalışma koşullarında performans karşılaştırması yapabilmek amacıyla ölçüm sıklığı ve panel eğim açısı menü üzerinden dinamik olarak ayarlanabilmektedir.
- **Düşük maliyetli, modüler ve genişletilebilir donanım yapısı:** Arduino tabanlı açık kaynaklı mimari hem maliyeti düşük tutmakta hem de gelecekte farklı sensörlerin ve iletişim modüllerinin sisteme kolaylıkla entegre edilmesine olanak sağlamaktadır.
- **Taşınabilirlik ve saha koşullarında kolay kurulum:** Cihaz kompakt boyutlara sahip olup, saha testlerinde kolay taşınabilirlik ve hızlı kurulum avantajı sunmaktadır.
- **Verilerin standart CSV formatında dışa aktarılması:** Elde edilen veriler, yaygın analiz yazılımlarıyla uyumlu olacak şekilde CSV formatında SD karta kaydedilir ve doğrudan işlenebilir.

Bu hedefler doğrultusunda geliştirilen sistem mimarisi üç temel bileşenden oluşmaktadır. Donanım altyapısı, Arduino Uno mikrodenetleyicisi ve RTC+SD kart modülü ile sensör verilerinin toplanması, işlenmesi ve zaman damgalı olarak SD karta kaydedilmesini sağlar. Sensör katmanı, panelin elektriksel ve termal davranışlarını izlemek için sıcaklık, akım ve gerilim verilerini ölçerek mikrodenetleyiciye iletir. Yazılım ve kullanıcı

arayüzü ise ölçüm döngülerini yönetir, verilerin işlenmesini gerçekleştirir ve menü üzerinden veri kayıt periyodu ile panel eğim açısı işlemlerinin kolayca ayarlanmasına olanak tanır. Şekil 1’de genel mimarisi sunulan sistem, farklı çevresel koşullar altında performans ölçümleri yapılmasını destekler ve modüler yapısı sayesinde gelecekte kablosuz iletişim modülleri veya ek sensörlerin entegre edilmesine imkân tanır.



Şekil 1. Geliştirilen datalogger cihazının genel mimarisi

3. SİSTEM TASARIMI YAKLAŞIMI

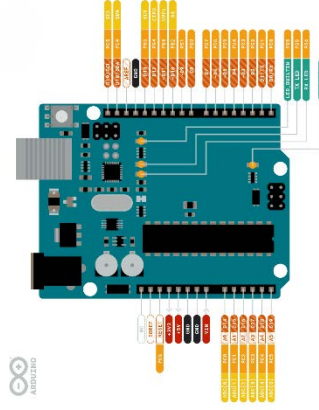
Geliştirilen datalogger cihazının çekirdeğini, açık kaynak donanım platformları arasında yaygın olarak tercih edilen Arduino Uno mikrodenetleyicisi oluşturmaktadır. Arduino Uno’nun tercih edilmesinin temel nedenleri; kolay prototipleme imkânı sunması, zengin kütüphane desteği sayesinde sensör ve modüllerin hızlı entegrasyonuna olanak tanınması, düşük maliyetli olması ve eğitimden endüstriye kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmasıdır. Sistemin modülerliğini artırmak ve fonksiyonel kapasitesini genişletmek amacıyla mikrodenetleyici kartı üzerine RTC+SD kart modülü ve LCD (Liquid Crystal Display) ekranlı

kontrol kartı olmak üzere iki temel genişletme kartı entegre edilmiştir.

3.1. Ana donanım birimleri

3.1.1. Arduino uno mikrodenetleyici

Arduino Uno, ATmega328P tabanlı 8-bit bir mikrodenetleyici kartıdır ve 16 MHz saat frekansında çalışır. Üzerinde 14 dijital giriş/çıkış, 6 analog giriş pini ve USB bağlantısı bulunur (Arduino Documentation, 2025). Geliştirilen datalogger sisteminde veri toplama, işleme ve kayıt işlemleri bu mikrodenetleyici tarafından yürütülür. Düşük güç tüketimi ve yaygın sensörlerle uyumluluğu sayesinde enerji verimli uygulamalar için uygundur. Kartın dijital pinleri (D0–D13) sensörlerden gelen dijital sinyallerin okunması veya aktüatör kontrolü için kullanılır. Bu pinlerden bazıları (D3, D5, D6, D9, D10, D11) PWM desteği sunarak motor kontrolü veya sinyal üretimi gibi görevlerde kullanılabilir. Ayrıca D10–D13 arası pinler SPI iletişimi için, D0 (RX) ve D1 (TX) ise UART haberleşmesi için kullanılır. I²C iletişimi, çoklu sensörlerin aynı veri hattı üzerinden bağlanabilmesini sağlayan SDA ve SCL pinleri ile gerçekleştirilir. Analog girişler (A0–A5) sensörlerden gelen analog sinyalleri 10-bit çözünürlükle dijital değerlere dönüştürür. Kart üzerindeki güç pinleri, harici besleme (VIN), sabit 5 V ve 3.3 V çıkışları ile GND referans hattını içerir. Ayrıca AREF pini ADC için referans voltajı tanımlar, RESET pini sistemi yeniden başlatır. ICSP başlığı ise mikrodenetleyicinin doğrudan programlanmasına imkân tanır.



**Şekil 2. Arduino Uno mikrodnetleyici kartı pin bağlantı şeması
(Arduino Documentation, 2025)**

3.1.2. RTC+SD kart modülü

Cihazın veri kaydetme ve uzun süreli arşivleme işlevi, Arduino Uno mikrodnetleyicisine entegre edilen RTC (Real-Time Clock) ve SD kart modülü aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu bileşen, sistemin ölçülen değerleri yalnızca kaydetmesini değil, aynı zamanda zamana bağlı ve analiz edilebilir bir veri yapısına dönüştürmesini sağlar. Veri kayıt altyapısı, sistemin bilimsel araştırmalar, saha testleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliği açısından kritik öneme sahiptir. SD kart modülü, gerilim, akım, güç, sıcaklık ve panel eğim açısı gibi parametrelerin uzun süreli ve güvenli biçimde depolanmasını sağlar. SPI protokolü ile Arduino ile haberleşen bu modül, verileri otomatik olarak CSV formatında kaydeder. Bu sayede veriler Excel, MATLAB veya Python gibi yazılımlarda doğrudan analiz edilebilir. Ayrıca çevrimsel kayıt altyapısı sayesinde bellek dolduğunda yeni dosyalar oluşturularak veri kaybı riski en aza indirilir ve haftalar süren testlerde dahi kesintisiz kayıt sağlanır.

RTC modülü, her bir ölçüm verisine tarih ve saat bilgisi ekleyerek zaman damgası oluşturur. Bu sayede veriler yalnızca anlık değerler olarak kalmaz, aynı zamanda saatlik, günlük veya

mevsimsel eğilimler analiz edilebilir. Zaman bilgisinin varlığı, performans değişimlerinin çevresel koşullar (ışınım, sıcaklık, rüzgâr vb.) ile ilişkilendirilmesine ve sistem davranışlarının neden-sonuç ilişkisi içinde incelenmesine olanak tanır. Ayrıca performans düşüşleri veya arızalar belirli zaman aralıklarında kolayca tespit edilebilir. Tüm kayıt süreci, mikrodenetleyici ile RTC+SD kart modülünün koordineli çalışmasıyla gerçekleşir. Sensörlerden gelen veriler mikrodenetleyici tarafından okunur, işlenir ve belirlenen aralıklarla CSV dosyasına kaydedilir. RTC zaman bilgisini eklerken, SD kart bu verileri depolar. Kullanıcı, kayıt sonrası verileri doğrudan bilgisayara aktararak detaylı analiz yapabilir.



Şekil 3. (RTC+SD Kart Bütünleşik Modülü

3.1.3. LCD ekranlı kontrol kartı

Cihazın kullanıcı etkileşimi, üzerinde 16x2 LCD ekran ve beş yönlü tuş takımı bulunan kontrol kartı aracılığıyla sağlanır. LCD ekran, sensörlerden toplanan verilerin, ölçüm sonuçlarının ve sistem durum bilgilerinin gerçek zamanlı olarak görüntülenmesine imkân tanır. Ekran, Arduino'nun dijital pinlerine doğrudan bağlanır (D4–D7 veri hattı, D8 “Enable”, D9 “RS”) ve böylece ölçüm verileri veya durum mesajları kolaylıkla iletilebilir. Tuş takımı (SELECT, UP, DOWN, LEFT, RIGHT), tek bir analog giriş pini (A0) üzerinden farklı direnç değerleriyle okunur; bu sayede menü gezintisi, ölçüm aralığı ayarı ve kayıt kontrolü gibi işlemler doğrudan cihaz üzerinden yapılabilir. Kart

üzerindeki potansiyometre ekran kontrastının hassas ayarını sağlar. 5 V ile çalışan modül, Arduino Uno'ya doğrudan takılabilir ve ek bağlantı gerektirmez. Böylece sistem, özellikle taşınabilir veri toplama uygulamalarında görsel arayüz ve kullanıcı kontrolü işlevlerini kompakt bir yapıda sunar. LCD ekran ayrıca “Kayıt Başlatıldı” veya “Ölçüm Aralığı: 30 sn” gibi durum bilgilerini anlık olarak görüntüler.



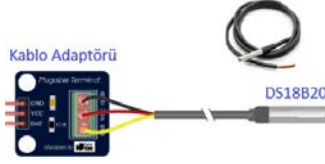
Şekil 4. LCD ekranlı kontrol kartı arayüz ekranı

3.2. Kullanılan sensörler ve özellikleri

Geliştirilen sistemde, panelin elektriksel ve termal karakteristiklerinin izlenebilmesi için üç farklı sensör kullanılmıştır. Bu sensörler, veri toplama sürecinin doğruluğunu ve çeşitliliğini artırmakta, panel performansının farklı açılardan değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.2.1. DS18B20 sıcaklık sensörü

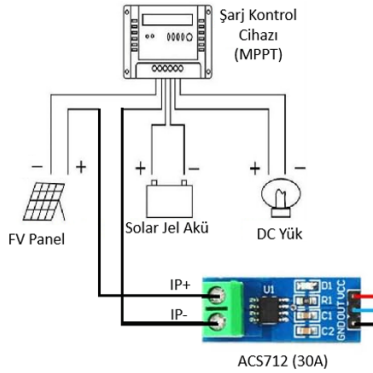
DS18B20 yüksek hassasiyetli ve dijital çıkışlı bir sıcaklık sensörüdür. En önemli özelliği, 1-Wire iletişim protokolü kullanarak yalnızca tek bir veri hattı üzerinden mikrodenetleyici ile haberleşebilmesidir. Bu yapı, kablolama ve donanım karmaşıklığını azaltır ve birden fazla DS18B20 sensörünün aynı veri hattı üzerinde adreslenerek çalıştırılmasına imkân tanır. Bu nedenle DS18B20, özellikle IoT tabanlı ölçüm sistemleri, enerji izleme projeleri ve güneş paneli sıcaklık analizi gibi çok noktalı sıcaklık ölçümü gereken uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. DS18B20 sensörü ve pin yapısı Şekil 5'te verilmiştir (Maxim Integrated, 2025).



Şekil 5. DS18B20 sensörü

3.2.2. ACS712 akım sensörü (30A)

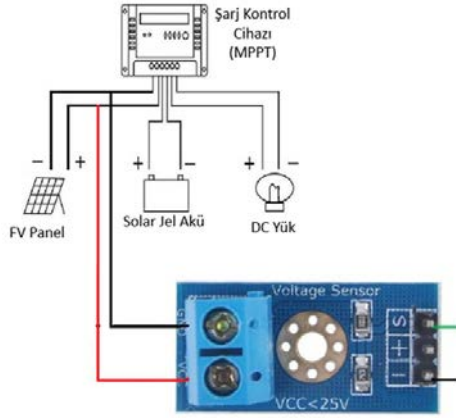
ACS712, Hall etkisi prensibine dayalı çalışan, izolasyonlu ve doğrusal çıkışlı bir akım sensörüdür. Elektrik akımını doğrudan algılamak için iletken üzerinden geçen akımın oluşturduğu manyetik alanı ölçer ve bunu orantılı bir analog voltaja dönüştürür. Bu sayede sensör, akım ölçümü sırasında devreyle doğrudan elektriksel temas kurmadan güvenli ve izolasyonlu bir şekilde veri sağlar. Bu özellik, özellikle güneş paneli uygulamaları gibi yüksek akım içeren sistemlerde mikrodenetleyici ve ölçüm devresini korumak açısından büyük avantaj sağlar. ACS712 akım sensörünün Datalogger sistemimizdeki pin şeması Şekil 6'da verilmiştir (Allegro Microsystems, 2025). ACS712 modülleri farklı akım aralıklarında (± 5 A, ± 20 A ve ± 30 A) üretilir. Bu çalışmada kullanılan model, ACS712-30A olup, FV panel uygulamalarında yaygın olarak görülen akım aralıkları için uygundur.



Şekil 6. ACS712 akım sensörünün devre bağlantısı

3.2.3. 0–24 V gerilim ölçüm modülü

Panel çıkış geriliminin izlenmesi için 0–24 V DC ölçüm aralığına sahip analog bir voltaj bölücü sensör kullanılmıştır. Sensör, çıkış sinyalinin Arduino'nun analog giriş pinleriyle uyumlu hale getirerek gerilimin hassas şekilde ölçülmesine olanak tanır. Böylece gerilim ve akım verileri birlikte kullanılarak panelin anlık güç üretimi hesaplanır. Şekil 7'de 0-25V gerilim sensörünün pin şeması verilmiştir.



Şekil 7. 0-24V Gerilim sensörü bağlantı şeması

3.3. Donanım entegrasyonu ve genel yapı

Geliştirilen datalogger sisteminin donanım altyapısı Şekil 8'de parçadan bütüne doğru gösterilmiştir. Alt sırada Arduino Uno mikrodenetleyicisi, RTC+SD bütünleşik modülü ve LCD ekranlı kontrol kartının ayrıştırılmış halleri görülmektedir. Üst sırada ise tüm modüllerin birleştirildiği datalogger sisteminin yan ve üstten görünüşleri görülmektedir. Şekil 8'den de görüldüğü üzere geliştirilen datalogger sistemi birden fazla elektronik bileşenin uyumlu bir şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapı, hem taşınabilirlik hem de modülerlik açısından yüksek esneklik sunarak, saha koşullarında uzun süreli ve güvenilir ölçümler yapılmasına olanak tanır.

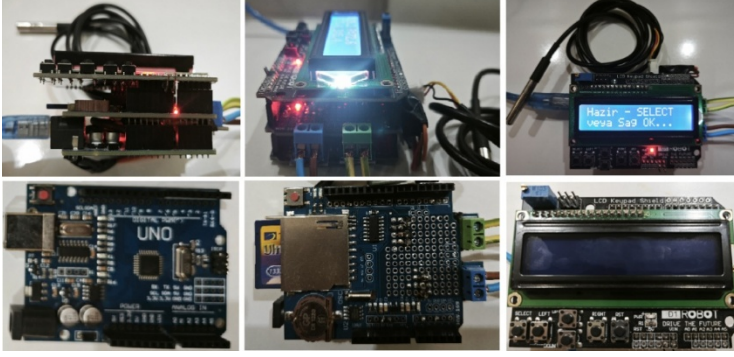
Cihazın kullanıcı arayüzü, 16x2 LCD ekran ve çok yönlü buton yapısına sahip üzerinde kontrol tuşları buluna bir kart ile sağlanmıştır. Bu arayüz üzerinden ölçüm süreci boyunca sıcaklık, gerilim, akım ve anlık güç değerleri sürekli olarak izlenebilir. Ayrıca menü sistemi sayesinde kullanıcı; ölçüm sıklığı ve panelin eğim açısı gibi parametrelerin ayarlarını doğrudan sahada, herhangi bir bilgisayar bağlantısına ihtiyaç duymadan değiştirebilir. Bu durum, özellikle açık alan testlerinde veya uzak saha uygulamalarında cihazın kullanılabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Sistemin modüler mimarisi, farklı uygulama senaryolarına kolayca uyarlanmasına olanak tanır. Örneğin, panelin ışıyım yoğunluğunu ölçmek için bir Güneş Işıyımı (Piranometre) sensörü, ortam koşullarını izlemek için bir DHT22 sıcaklık-nem sensörü veya kablosuz veri iletimi için bir LoRa veya Wi-Fi modülü sisteme sonradan entegre edilebilir. Tüm bu modüller Arduino'nun standart pin yapısı sayesinde minimum donanım değişikliği ile sisteme eklenebilir. Bu da cihazı yalnızca tek bir deney koşuluna bağlı olmaktan çıkarak, çok farklı araştırma ve endüstriyel kullanım senaryoları için yeniden yapılandırılabilir bir platform haline getirir.

Ayrıca cihazın enerji verimliliği ve taşınabilirlik tasarımı da dikkate alınmıştır. Düşük güç tüketimli bileşenlerin kullanılması sayesinde sistem uzun süreli ölçümlerde taşınabilir batarya paketleri ile çalıştırılabilir. Kompakt yapısı, sahada kolay taşınmasını ve kurulmasını sağlarken, standart konnektör yapısı sayesinde farklı panel sistemlerine hızlıca uyarlanabilir.

Sonuç olarak, geliştirilen donanım yapısı yalnızca ölçüm işlemini gerçekleştiren bir cihaz değil; aynı zamanda akademik araştırmalar, saha testleri ve endüstriyel enerji izleme uygulamaları için yeniden yapılandırılabilir, ölçeklenebilir ve genişletilebilir bir platform olarak tasarlanmıştır. Bu bütünleşik

yaklaşım, FV panellerinin gerçek saha koşullarındaki performanslarının detaylı ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesine imkân sağlamaktadır.



Şekil 8. Cihazın genel donanım entegrasyonu

4. YAZILIM TASARIMI VE MENÜ ARAYÜZÜ

4.1. Yazılım mimarisi ve çalışma prensibi

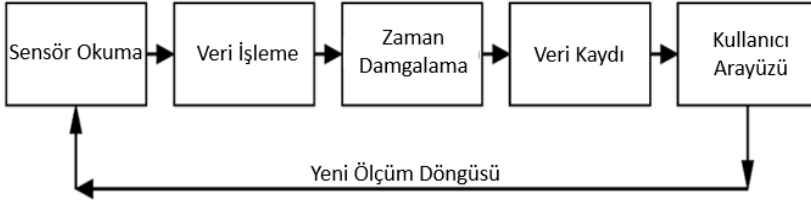
Cihazın yazılım mimarisi dört ana modülden oluşur ve bu modüller birlikte çalışarak sistemin tüm işlevlerini bütünsel biçimde yürütür. Genel akış diyagramı Şekil 9’da gösterilmiştir.

İlk olarak Sensör Verisi Toplama Modülü, sıcaklık, akım ve gerilim gibi temel parametreleri periyodik olarak okuyarak dijital formata dönüştürür. DS18B20 sensörü dijital veri üretirken, akım ve gerilim sinyalleri ADC üzerinden işlenir. Ardından Veri İşleme ve Güç Hesaplama Modülü, bu verilerden anlık güç değerlerini hesaplar ($P = V \times I$) ve gerektiğinde filtreleme işlemleri uygulayarak güvenilir verileri sonraki aşamaya aktarır.

Veri Kaydı ve Zaman Etiketleme Modülü, ölçümleri RTC’den alınan zaman bilgisiyle etiketleyerek SD karta CSV formatında kaydeder. Son olarak Kullanıcı Arayüzü ve Menü Yönetimi Modülü, LCD ekran üzerinden verilerin gerçek zamanlı

gösterimini sağlar ve keypad aracılığıyla kayıt periyodu, eğim açısı veya kayıt kontrolü gibi ayarların yapılmasına imkân tanır.

Bu modüllerin entegre çalışmasıyla sistem, başlatmadan veri kaydına kadar tüm süreci otomatik ve kullanıcı dostu biçimde yönetir. Böylece geliştirilen yapı, FV panellerinin performans analizinde güvenilir, taşınabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm sunar.



Şekil 9. Yazılım mimarisinin genel akış diyagramı

4.2. Sensör verilerinin okunması ve işlenmesi

Sensör modülleri ile mikrodenetleyici arasındaki iletişim aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir.

- DS18B20 sıcaklık sensörü 1-Wire dijital protokolü ile bağlanarak doğrudan dijital veri sağlar.
- ACS712 akım sensörü ve gerilim ölçüm modülü ise analog çıkış verir; bu sinyaller Arduino'nun 10 bit ADC'si ile dijital değerlere dönüştürülür.
- Ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak gerçek zamanlı güç hesabı yapılır.

Bu hesaplama mikrodenetleyici içinde sürekli olarak güncellenir ve hem LCD üzerinde gösterilir hem de kayıt dosyasına eklenir.

4.3. Zaman damgalı veri kaydı

Zaman damgalama işlemi, RTC modülünün yazılım ile entegre şekilde çalışmasıyla sağlanır. Her ölçüm döngüsünde

alınan veriler, tarih ve saat bilgisiyle etiketlenerek SD kart üzerindeki CSV dosyasına eklenir. Bu yöntem sayesinde:

- Ölçümler zaman serisi analizi için düzenli bir yapı kazanır.
- Farklı gün ve saatlerdeki panel davranışları karşılaştırılabilir.
- Uzun süreli testlerde sıcaklık, akım ve güç değişimleri korelasyon analizine tabi tutulabilir.

CSV dosyasında her satır Zaman, Sıcaklık (°C), Voltaj (V), Akım (A), Güç (W), Panel Eğim Açısı (°) yapısıyla saklanır.

4.4. Menü sistemi ve kullanıcı arayüzü tasarımı

Yazılım tasarımının en önemli bileşenlerinden biri de kullanıcı etkileşimini sağlayan Şekil 10'da görselleri verilen menü yapısıdır. Menü sistemi, LCD ekranlı kontrol kartı üzerinde bulunan butonlar aracılığıyla kontrol edilir. Kullanıcı, menü üzerinden aşağıdaki işlemleri yapabilir:

- **Kayıt Periyodu Girişi:** Veri kayıt periyodu saniye bazlı olarak UP/DOWN tuşları ile ayarlanabilir.
- **Panel Eğim Açısı Girişi:** Farklı eğimlerde test yapılması durumunda panel açısı UP/DOWN tuşları ile ayarlanabilir ve sisteme kaydedilebilir.
- **Kayıt Başlat/Durdur:** Ölçüm süreci RIGHT tuşu ile kullanıcı isteğine göre başlatılıp durdurulabilir.
- **Gerçek Zamanlı İzleme:** Kayıt başlatıldığında LCD ekranda sıcaklık (T), akım (I), gerilim (V) ve güç (P) değerleri canlı olarak görüntülenebilir.

Menü arayüzü, basit bir “düğme-navigasyon” yapısı üzerine kurulmuş olup, düşük donanım kaynaklarıyla yüksek işlevsellik sağlar.



Şekil 10. Menü arayüzü yapısı ve kullanıcı etkileşim akış örnekleri

5. SAHA UYGULAMASI VE ÖRNEK VERİ

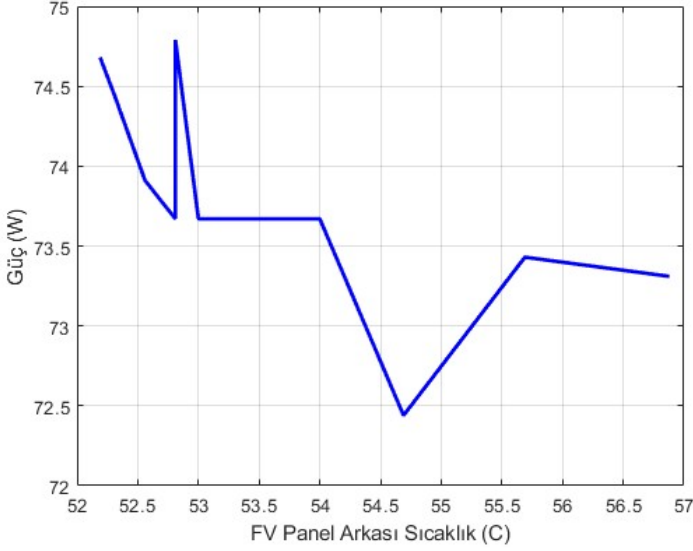
Geliştirilen datalogger sistemi, FV panellerin saha koşullarındaki performansını değerlendirmek amacıyla 35° eğim açısında yük altında test edilmiştir. Testte, panelin arka yüzey sıcaklığı DS18B20 sensörü ile ölçülmüş, akım ve gerilim değerleri ise ACS712 akım sensörü ve 0–25 V gerilim sensörü aracılığıyla izlenmiştir. 30 saniyelik aralıklarla alınan veriler zaman damgalı olarak CSV formatında SD karta kaydedilmiştir. Tablo 1, bu test senaryosunda elde edilen verilerin bir bölümünü göstermekte olup, cihazın gerçek zamanlı veri toplama ve kayıt yeteneklerini doğrulamaktadır.

Tablo 1. 35° Eğim Açısında FV Panel Ölçüm Veri Örnekleri

Zaman Damgası	Sıcaklık (°C)	Voltaj (V)	Akım (A)	Güç (W)	Eğim Açısı (Derece)
2025-09-16,12:19:30	56.88	15.01	4.88	73.31	35
2025-09-16,12:20:00	55.69	15.04	4.88	73.43	35
2025-09-16,12:20:30	54.69	15.06	4.81	72.44	35
2025-09-16,12:21:00	54.00	15.09	4.88	73.67	35
2025-09-16,12:21:30	52.81	15.09	4.88	73.67	35
2025-09-16,12:22:00	53.00	15.09	4.88	73.67	35
2025-09-16,12:22:30	52.81	15.09	4.96	74.79	35
2025-09-16,12:23:00	52.56	15.14	4.88	73.91	35
2025-09-16,12:23:30	52.31	15.72	4.73	74.44	35
2025-09-16,12:24:00	52.19	15.77	4.73	74.68	35

Tablo 1’de örnek olarak sunulan kısmi veriler, cihazın ölçüm ve kayıt işlevlerini başarıyla yerine getirdiğini göstermektedir. Tablo 1’de sunulan kısmi ölçüm sonuçlarına göre panel yüzey sıcaklığının yaklaşık 56.9 °C seviyesinden başlayarak zamanla azaldığı, bununla birlikte çıkış gerilimi ve akım değerlerinin nispeten sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 11’de panel arkası sıcaklığına bağlı güç eğrisi Tablo 1’deki verilere göre çizdirilmiştir. Bu eğriden görüldüğü gibi sıcaklığın azalmasıyla birlikte çıkış gücünde küçük dalgalanmalar meydana gelmiş ve maksimum güç yaklaşık 73.67 W civarında ölçülmüştür. Bu sonuçlar, panel sıcaklığının fotovoltaiik hücre verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda hücrelerin açık devre gerilimi düşmekte, bu da toplam çıkış gücünü sınırlamaktadır. Deney boyunca ölçülen sıcaklığın kademeli olarak düşmesiyle birlikte çıkış gücünün de hafifçe arttığı gözlemlenmiştir. Bu ilişki, geliştirilen cihazın yalnızca elektriksel parametreleri değil,

aynı zamanda sıcaklık gibi çevresel etkilerin panel performansı üzerindeki sonuçlarını da analiz edebilecek kapasitede olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 11. 35° Eğim Açısında Ölçülen Panel Sıcaklık-Güç İlişkisi

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Arduino tabanlı taşınabilir datalogger sistemi, fotovoltaiik (FV) panellerin gerçek çalışma koşullarındaki performanslarının izlenmesi ve analiz edilmesi için düşük maliyetli, taşınabilir ve kullanıcı dostu bir çözüm sunmaktadır. Sistem, sıcaklık, akım, gerilim ve güç gibi temel parametreleri gerçek zamanlı olarak ölçebilmekte ve zaman damgalı biçimde kaydederek ileri analizler için kullanılabilir hâle getirmektedir. Yapılan testler, cihazın yük altındaki FV panel davranışlarını güvenilir şekilde izleyip kaydedebildiğini göstermiştir. Zaman damgalı veri yapısı sayesinde, sıcaklık değişimlerinin çıkış gücü üzerindeki etkisi ve akım-gerilim

ilişkileri gibi performans göstergeleri detaylı biçimde analiz edilebilmektedir. Böylece sistem, yalnızca anlık ölçüm aracı olmanın ötesine geçerek uzun süreli performans takibi için de uygun bir araştırma altyapısı sağlamaktadır. Kullanıcı arayüzü üzerinden kayıt aralığı ve panel eğim açısı gibi parametrelerin doğrudan ayarlanabilmesi, farklı senaryolara kolayca uyum sağlanmasına imkân tanımıştır. Düşük maliyetli yapısı ve açık kaynaklı mimarisi sayesinde sistem; saha testlerinden akademik araştırmalara, eğitim uygulamalarından endüstriyel ölçüm projelerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Sonuç olarak geliştirilen sistem, FV panellerin performans analizine ek olarak farklı panel teknolojileri ve çevresel koşullar altında enerji izleme çalışmaları için de uygun bir platform sunmaktadır. Gelecekte kablosuz haberleşme, bulut entegrasyonu ve yapay zekâ tabanlı veri analitiği gibi özelliklerin eklenmesiyle sistemin kapsamının daha da genişletilmesi mümkündür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Malatya Turgut Özal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 24G12 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları destek için teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- Allegro Microsystems. (2025). *ACS712 Hall Effect-Based Linear Current Sensor Datasheet*.
- Amer, K. A., Fakher, M., Salem, A., Ahmad, S. M., Irhouma, M. A., Altahbao, S. A. S., & Salim, E. (2020). Power losses on PV solar fields: sensitivity analysis and a critical review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(9), 1000-1007.
- Ansari, S., Ayob, A., Lipu, M. S. H., Saad, M. H. M., & Hussain, A. (2021). A review of monitoring technologies for solar PV systems using data processing modules and transmission protocols: Progress, challenges and prospects. *Sustainability*, 13(15), 8120.
- Arduino Documentation. (2025). *Arduino Uno Technical Specifications*. Arduino.cc
- Asnil, A., Krismadinata, K., Husnaini, I., Hazman, H., & Astrid, E. (2023). Real-time monitoring system using IoT for photovoltaic parameters. *TEM J*, 12(3), 1316-1322.
- Burger, J. R., Brown, J. H., Day Jr, J. W., Flanagan, T. P., & Roy, E. D. (2019). The central role of energy in the urban transition: Global challenges for sustainability. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 4(1), 5.
- Demir, B. E. (2023). A New Low-Cost IoT Based Monitoring System Design for Stand-Alone Solar Photovoltaic Plant and Power Estimation.
- Dolara, A., Cabrera-Tobar, A., Ogliari, E., Leva, S., & Hanne, L. (2024). Design of an Embedded Test Bench for Organic Photovoltaic Module Testing. *Electronics*, 13(16), 3104.

- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2017). *Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems*. CRC press.
- Ghosh, D. K., Bose, S., Das, G., Acharyya, S., Nandi, A., Mukhopadhyay, S., & Sengupta, A. (2022). Fundamentals, present status and future perspective of TOPCon solar cells: a comprehensive review. *Surfaces and interfaces*, 30, 101917.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org>.
- Joshi, A. S., Dincer, I., & Reddy, B. V. (2009). Performance analysis of photovoltaic systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1884-1897.
- Kivambe, M., Abdallah, A., Figgis, B., Abdelrahim, M., Elgaili, M., Pillai, D., & Aissa, B. (2025). Comprehensive assessment of performance and reliability of PERC, TOPCon and SHJ modules in desert climates. *Solar Energy*, 295, 113555.
- Li, K., & Lin, B. (2015). Impacts of urbanization and industrialization on energy consumption/CO2 emissions: does the level of development matter?. *Renewable and sustainable energy reviews*, 52, 1107-1122.
- Maxim Integrated. (2025). *DS18B20 Digital Thermometer Datasheet*.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1513-1524.

- Segbefia, O. K. (2023). Temperature profiles of field-aged photovoltaic modules affected by optical degradation. *Heliyon*, 9(9).
- Sutikno, T., Purnama, H. S., Pamungkas, A., Fadlil, A., Alsofyani, I. M., & Jopri, M. H. (2021). Internet of things-based photovoltaics parameter monitoring system using NodeMCU ESP8266. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 11(6).
- Tamoor, M., Bhatti, A. R., Farhan, M., Rasool, A., & Sherefa, A. (2024). Optimizing tilt angle of PV modules for different locations using isotropic and anisotropic models to maximize power output. *Scientific Reports*, 14(1), 30197.

DOĞANIN DİLİYLE RÜZGARI ANLAMAK: GRAMATİK EVRİM VE GENETİK EŞİTLİK PROGRAMLAMA

Şehmus FİDAN¹

Emre ERKAN²

1. GİRİŞ

Karmaşık sistemlerin modellenmesi, bilim ve mühendislikte en zorlu alanlardan biridir. Bu sistemlerde değişken ilişkileri genellikle doğrusal olmayan ve sezgisel olarak anlaşılması zor yapılardır. Bu nedenle, verinin kendi iç dinamiğinden model çıkarabilen gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulur. Sembolik regresyon, sabit bir formül yerine geniş bir denklem uzayında en uygun yapıyı arayan bir makine öğrenimi tekniğidir. Genetik eşitlik programlamasından (GEP) türeyen bu yaklaşım, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden sembolik eşitliği bulmayı amaçlar. Koza'nın (1992) çalışmaları, bu yöntemin “veriden program türetme” ilkesine dayandığını göstermiştir. Sembolik regresyonun en önemli avantajı, sadece tahmin doğruluğu değil, aynı zamanda yorumlanabilir ve basit sonuçlar sunmasıdır. Geleneksel regresyonlar sabit model yapısı üzerinde katsayıları optimize ederken, sembolik regresyon modeli temel fonksiyonlar, değişkenler ve sabitlerden oluşan bir ağaç yapısında ortaya koyar (Banzhaf vd., 1998).

¹ Doç. Dr., Batman Üniversitesi, Elektronik Teknolojisi Programı, sehmus.fidan@batman.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5249-7245.

² Dr. Öğr. Üyesi, Batman Üniversitesi, Elektronik-Haberleşme Teknolojisi Programı, emre.erkani@batman.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0187-4079.

Sembolik regresyon, fiziksel yasaların keşfi, finans, biyoinformatik ve mühendislik gibi birçok alanda veriye dayalı ve açıklanabilir modeller üretmek için kullanılmaktadır. Ancak, sonsuz büyüklükteki denklem uzayı ve yüksek hesaplama karmaşıklığı yöntemin temel zorluklarıdır. Bu yönleriyle sembolik regresyon, yapay zekânın sadece tahmin değil, anlamlı bilgi üretme gücünü temsil eder. Gramatik evrim (GE) ise sembolik regresyona özgün bir yaklaşım getiren esnek bir genetik programlama yöntemidir. GE, bireyleri doğrudan ağaç yapıları yerine ikili diziler olarak kodlar ve bu diziler, bağlam-duyarsız bir gramer aracılığıyla çalıştırılabilir matematiksel ifadelere dönüştürülür. Bu yapı yönteme önemli esneklik ve uyarlanabilirlik kazandırır.

GE'nin en büyük gücü, gramerin bir iskelet olarak kullanılmasından kaynaklanır. Araştırmacı, grameri tanımlayarak arama uzayını kısıtlayabilir, dilbilgisi kurallarına uygun eşitliklerin üretilmesini garanti edebilir ve probleme özgü alan bilgisini sürece dahil edebilir. Bu, gelişigüzel oluşturulmuş geçersiz bireylerin ortaya çıkma olasılığını ortadan kaldırarak arama verimliliğini artırır (Ryan, O'Neill ve Collins, 2018). Ayrıca, genotip ile fenotip arasındaki bu ayrım, geleneksel genetik algoritmalarda kullanılan crossover ve mutasyon operatörlerinin sorunsuz bir şekilde uygulanabilmesine olanak tanır, çünkü operatörler basit dizi seviyesinde çalışır. Bu özellikleriyle GE, sembolik regresyonun yanı sıra otomatik yazılım tamiri, sanat eseri üretimi ve iş kuralı keşfi gibi çok çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır (Çelik & Fidan, 2022; Lv vd., 2024; Nawaz vd., 2024).

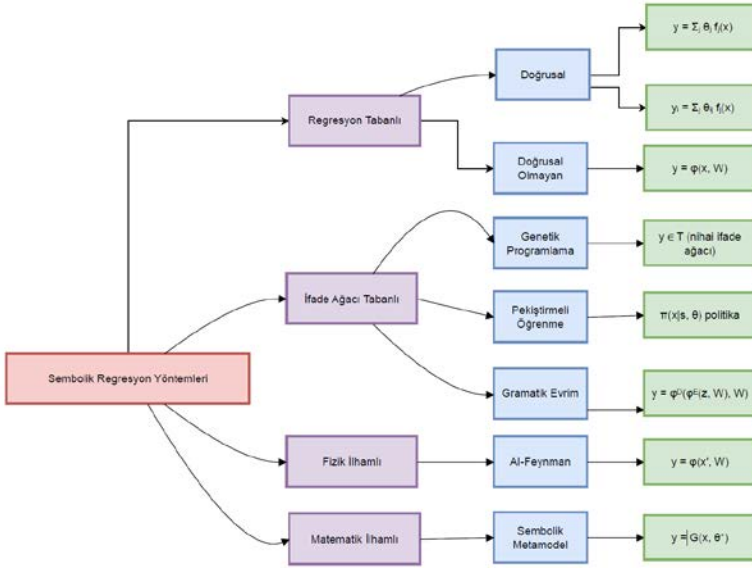
GEP, sembolik regresyon ve fonksiyon keşfi için geliştirilen güçlü bir evrimsel hesaplama yöntemidir. Ferreira (2001) tarafından ortaya konulan GEP, Genetik Algoritma (GA) ve Genetik Programlamanın (GP) sınırlamalarını aşmayı hedefler. GEP'in en önemli farkı, sabit uzunluklu doğrusal

kromozomları (genotip) ağaç yapısındaki eşitliklere (fenotip) dönüştürebilen özel bir kodlama sistemidir. Bu ikili temsil, tekniğin temel gücünü oluşturur. Her kromozom genlerden oluşur; genlerin baş kısmı fonksiyon ve terminalleri, kuyruk kısmı ise yalnızca terminalleri içerir. Bu yapı, Ferreira'nın (2006) belirttiği gibi, her zaman geçerli eşitlik ağaçları üretilmesini sağlayarak GP'deki geçersiz birey sorununu ortadan kaldırır. Bu mimarisi sayesinde GEP, doğrusal olmayan ve trigonometrik ilişkileri içeren çoklu gen modelleri keşfetmede oldukça etkilidir. (Li vd., 2017; Fidan, 2024; Mazraeh & Parand, 2024; Ryan vd., 2022).

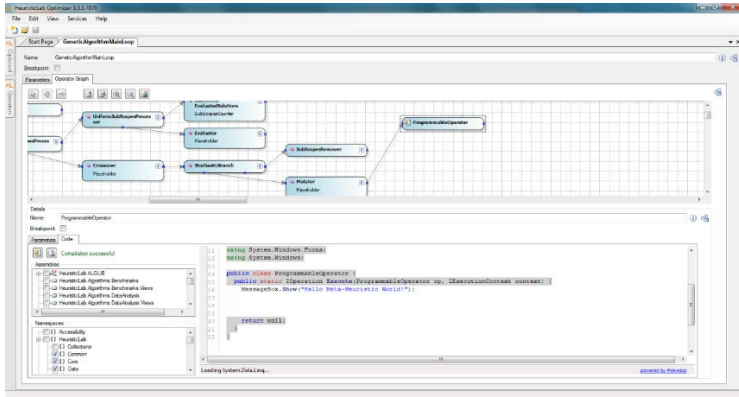
Bu çalışma, sembolik regresyonun temel yaklaşımları olan GE ve GEP yöntemlerini sistematik biçimde inceleyerek teorik temellerini, güçlü yönlerini ve uygulama alanlarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Her iki yöntemin de farklı problem ve disiplinlerde başarılı biçimde kullanıldığı görülmektedir. Ancak karmaşık mühendislik ve fiziksel sistemlerde hangi tekniğin hangi durumda daha uygun olduğuna dair net bir rehber bulunmamaktadır. Bu araştırma, GE ve GEP'i ortak kriterlerle değerlendirerek alana bütüncül bir bakış kazandırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, araştırmacılara problem türüne göre uygun sembolik regresyon yöntemini seçmede yardımcı olacak bir karar çerçevesi sunmaktadır. Çalışma, teorik bir karşılaştırmanın ötesinde, açıklanabilir yapay zeka modelleri geliştirmek isteyenler için yol gösterici bir kaynak oluşturmayı amaçlar. Böylece, sembolik regresyonun karmaşık sistemlerin modellenmesinde daha etkili kullanımı desteklenmektedir. İkinci bölümde GEP ve GE yöntemleri, üçüncü bölümde parametreler ve karşılaştırmalı analizler, son bölümde ise çalışma sonuçları sunulmuştur.

2. SEMBOLİK REGRESYON YÖNTEMLERİ

Sembolik regresyon, verilerden yorumlanabilir matematiksel ifadeler türetmek için farklı yaklaşımlar kullanmaktadır. Regresyon tabanlı yöntemler, tanımlı baz fonksiyonlar üzerinden doğrusal veya sinir ağlarıyla doğrusal olmayan modeller kurmaktadır. İfade ağacı tabanlı yöntemler ise çözümleri ağaç yapılarıyla temsil eder; bu gruba GEP, pekiştirmeli öğrenme tabanlı yapı inşası ve dil modeli tabanlı gramatik evrim yöntemleri dahildir. Fizik ilhamlı yaklaşımlar, fiziksel yasaları kısıt olarak kullanarak daha gerçekçi modeller üretir. Matematik ilhamlı yöntemler ise istatistiksel öğrenme ve model birleştirme teknikleriyle sembolik çıkarımı güçlendirir. Bu yöntemlerin hiyerarşik yapısı Şekil 1’de sunulmuştur.



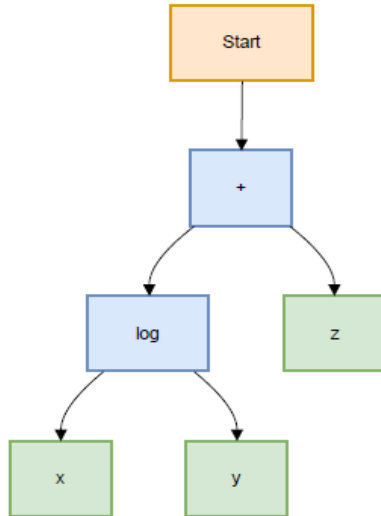
Şekil 1. Sembolik regresyon yöntemlerinin taksonomik yapısı



Şekil 2. Heuristik Lab Görünümü

2.1. Heuristik Lab

Şekil 2’de arayüzü gösterilen HeuristicLab, GNU Genel Kamu Lisansı (GPL) altında lisanslanmış özgür ve açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Kullanıcıların, genetik algoritmalar, genetik programlama, sembolik regresyon ve benzeri bir dizi gelişmiş hesaplama tekniğini kullanarak karmaşık problemleri çözmesine olanak tanır (Wagner, 2005).



Şekil 3. Örnek bir GEP ağacı

2.2. Genetik İfade Programlama (GEP) Yaklaşımı

GEP, başta sembolik regresyon yoluyla denklem türetmek olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilen bir hesaplama zeka yöntemidir (Banzhaf, 1998). GEP'in temel yapı taşı olan oluşturan kromozomlar, sabit uzunluktaki genlerden meydana gelir ve her bir gen, bir baş (head) ve bir kuyruk (tail) bölümüne ayrılmıştır. Yöntemin işleyişi, rastgele oluşturulan eşitlik ağaçlarından başlar; bu ağaçlar bir uygunluk (fitness) değerlendirmesine tabi tutulur, ardından genetik operatörler (çaprazlama, mutasyon) kullanılarak yeniden düzenlenir ve yeni nesiller oluşturulur. GEP'te, her bir kromozom potansiyel bir matematiksel fonksiyonu kodlar ve bu nedenle bir GEP ağacı, bu fonksiyonun bir bütün halinde grafiksel temsilinden ibarettir. GEP metodolojisi, temelde beş ana bileşen üzerine inşa edilir: fonksiyon kümesi, terminal kümesi, kontrol parametreleri, uygunluk fonksiyonu ve durdurma kriteri (Ryan, 1998; Poli vd., 2008). Fonksiyon kümesi, en uygun modeli oluşturmak üzere seçilen temel matematiksel operatörlerden (toplama, çıkarma, çarpma, bölme, logaritma, karekök vb.) oluşur. Terminal kümesi ise modelin girdi değişkenlerini ve sabit değerlerini içerir. Kontrol parametreleri, algoritmanın davranışını yönlendiren popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı ve mutasyon olasılığı gibi değerleri ifade eder. Uygunluk fonksiyonu, popülasyondaki her bir bireyin (aday çözümün) performansını nicel olarak ölçen ve çözüm kalitesinin değerlendirilmesini sağlayan kriterdir. Durdurma kriteri ise önceden tanımlanmış bir şarttır; iterasyonlar sırasında hata değeri kabul edilebilir bir eşiğin altına indiğinde çalışması sonlandırılır.

Şekil 3'deki GEP ağacı incelendiğinde, $\log(x - y) + z$ matematiksel eşitliğine kolaylıkla ulaşılabilmektedir. Görselde, yeşil kutular terminal (yaprak) düğümleri, mavi düğümler ise fonksiyon (işlem) düğümleri temsil etmektedir. Terminaller bağımsız değişkenleri (x, y, z) ifade ederken, fonksiyon

düğümüleri temel matematiksel operatörleri (+, -, *, *log*) göstermektedir. Burada değişkenler programın girdi parametreleri olarak kullanılmakta olup, sabit değerlerin kullanımı da mümkündür (Banzhaf et al., 1998).

2.3. Gramatik Evrim (GE) Yaklaşımı

GE, köklerini GEP'den alır ve dilbilgisi odaklı bir yaklaşım kullanır (O'Neill ve Ryan, 2001). Bu yöntem, bir bağlam-duyarsız dilbilgisi (CFG) ile bir genetik algoritma aracılığıyla yürütülen bir kural-seçim sistemini entegre ederek eşleme prosedürünü kolaylaştırır ve CFG, dilin yapısal kurallarını tanımlar. Bu algoritmalar, genetik algoritmaların temel prensiplerini (seçilim, çaprazlama ve mutasyon) kullanarak çözümlere ulaşır. Genetik algoritma tarafından üretilen kromozomlar, CFG kuralları kullanılarak bir programa veya eşitliğe dönüştürülür ve böylece probleme uygun matematiksel eşitlikler otomatik olarak belirlenir. CFG, genetik programlamanın çözüm uzayını ve üretebileceği yapıları tanımlar (Noorian vd., 2016). CFG, dilbilimde kullanılan bir kavram olup, bir dilin yapısını ifade eden kurallar ve sembol kümelerinden oluşur. CFG'de T (terminal), N (terminal olmayan semboller), S (başlangıç) ve R, üretim kuralları olarak tanımlanır. CFG'ler genellikle Backus-Naur Formu (BNF) ile ifade edilir. BNF için örnek bir şablon Denklem 1-4 arasında verilmiştir. Bu denklemlerde, terminal olmayan semboller $N = \{expr, op, coef, var\}$ ve terminaller $T = \{+, -, x, \div, v_1, v_2, c_1, c_2\}$ kullanılarak oluşturulmaktadır.

$$< expr > := (< expr >) < op > (< expr >) \quad (1)$$

$$< op > := + | - | x | \div \quad (2)$$

$$< coef > := c_1 | c_2 \quad (3)$$

$$< var > := v_1 | v_2 \quad (4)$$

Denklem 1–4, sembolik regresyon eşitliklerinin GE tarafından nasıl üretildiğini tanımlamaktadır. İlk kural, bir ifadenin $<expr>$ alt ifadeler ve bir işlemci $<op>$ aracılığıyla oluşturulabileceğini göstermektedir. İkinci denklem, kullanılabilecek işlemcilerin toplama, çıkarma, çarpma ve bölme olduğunu belirtmektedir. Üçüncü denklem, sabit katsayıların (c_1 , c_2) seçiminden türetildiğini, Denklem 4 ise değişkenlerin (v_1 , v_2) farklı veri girişlerinden alınabileceğini ifade etmektedir.

3. ANALİZ VE TARTIŞMA

3.1. Sembolik Regresyon Parametrizasyonu

Şekil 3’te sunulan dilbilimsel evrim ve GEP ile üretilmiş örnek bir ağaç yapısını göstermektedir. Her iki algoritmanın çalışma yapıları farklı olsa da, oluşturulan ağaçların yapısal olarak birbirine benzediği görülmektedir. Bununla birlikte, oluşturulan yapısal ağaçlarda temel matematiksel fonksiyonlar açısından bazı farklılıklar bulunmaktadır. Tablo 1 parametre tanımları ve parametreleri göstermektedir.

Tablo 1. GEP ağacına ilişkin parametreler

Parametre Tanımı	Parametreler
Fonksiyon Kümesi	$+, -, *, /, \sqrt{}, \sqrt[3]{}, \log, x^2, x^3, \sin, \cos, \tan, \tanh,$
Nesil Sayısı	50
Popülasyon Sayısı	1000
GEP Ağacı Derinliği (Max)	5
GEP Ağacı Eleman Sayısı (Max)	10
Mutasyon Olasılığı	0.15

3.2. Verinin Tanımlayıcı Analizi

Rüzgar türbinlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak, enerji üretim maliyetlerini düşürmek ve yatırım getirisini en üst düzeye çıkarmak için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, türbinlerde kurulu olan SCADA sistemleri,

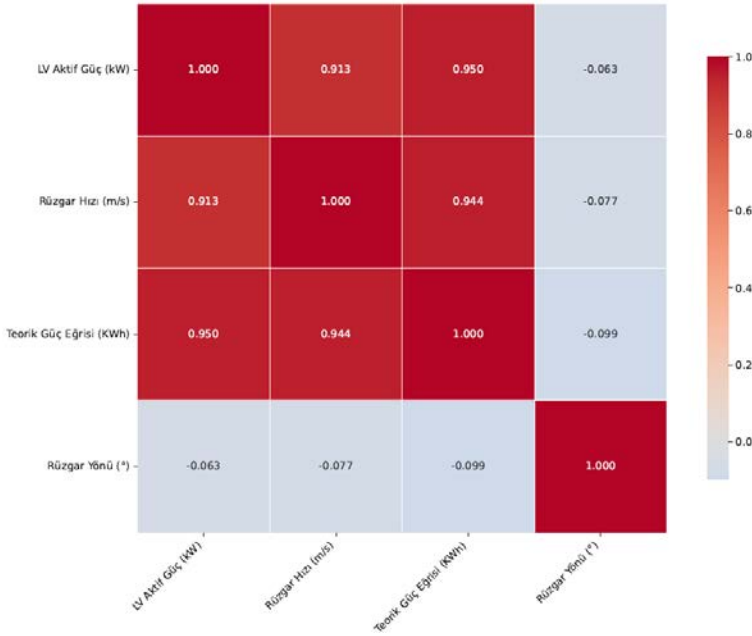
operatörlere ekipmanın durumu ve performansı hakkında yorum yapabilmeleri için gerçek zamanlı veri sağlar. Kaggle üzerinden elde edilen veriseti, bir SCADA sisteminden periyodik olarak kaydedilmiş verileri içermektedir (Berkerisen, 2021). Veri seti, bir rüzgar türbininden 10 dakikalık aralıklarla toplanmış 50.500 gözlemden oluşmaktadır. Her gözlem, sekiz farklı değişken içermektedir. Tablo 2’de tanımlayıcı istatistik değerleri sunulmuştur.

Tablo 2. Tanımlayıcı istatistik verileri

Özellik	Min	Max	Median	Oortalama	Std. Sapma	Variance	% 25	% 75
LV Aktif Güç (Pa) (kW)	2	3618.7	825.83	1307.68	1312.45	172249.26	50.66	2482.51
Rüzgar Hızı (Ws) (m/s)	0	25.20	7.10	7.5579	4.2	17.86	4.201	10.308
Teorik Güç Eğrisi (Tpc) (KWh)	0	3600	1063.77	1492.17	1368.01	187173.8	161.32	2965.0
Rüzgar Yönü (Wd) (°)	0	359.99	73.7129	123.68	93.443	8731.73	49.351	201.696
Ortalama hız (ms) (m/s)	0	25	7	7.437	4.2317	17.9	4	10.5
Ortalama Rüzgar Yönü (md) (°)	0	330	60	117.68	90.57	8203.19	60	210

Veri setinde yer alan LV aktif güç (kW) değişkeni, türbinin ürettiği aktif gücü ifade etmekte olup, minimum 2 kW, maksimum 3618.73 kW ve ortalama 1307.68 kW değerleriyle geniş bir dağılım göstermektedir. Güç üretimindeki bu yüksek standart sapma (1312.46), değişken rüzgar koşullarının enerji üretimine olan doğrudan etkisini yansıtmaktadır. Rüzgar Hızı (m/s) 0 ile 25.2 m/s arasında değişmekte ve ortalama 7.56 m/s olarak ölçülmüştür. Ortalama rüzgar hızının, güç üretimi açısından tipik türbin başlangıç hızlarının üzerinde olması, enerji üretim potansiyelini desteklemektedir. Teorik güç eğrisi (kWh) değişkeni, türbinin nominal performansını göstermekte olup, ortalama 1492.16 kWh değerine sahiptir. Teorik güç eğrisindeki yüksek varyans (1,871,473.90), gerçek ölçümlerin ideal modele kıyasla oldukça değişken olduğunu işaret etmektedir. Rüzgar Yönü 0° ile 360° arasında dağılım

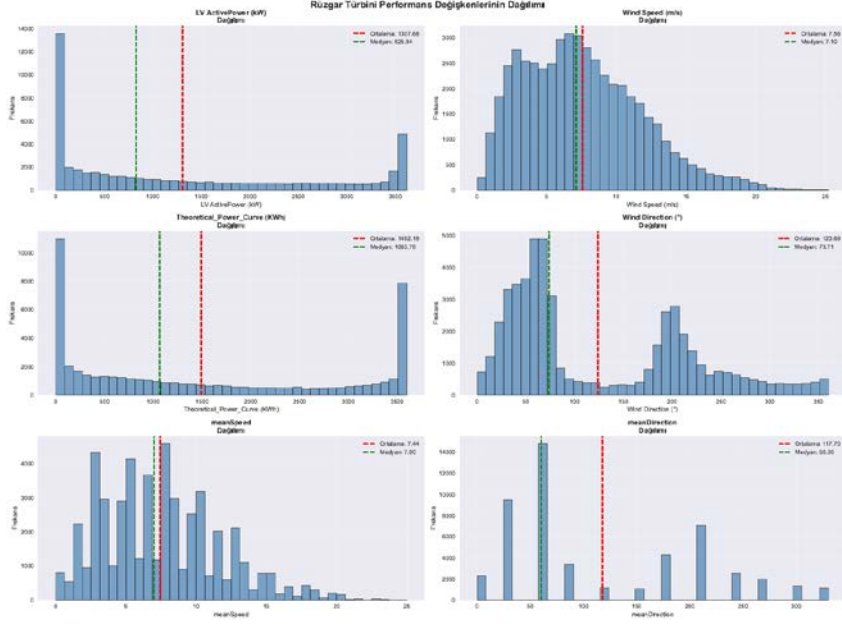
göstermekte ve ortalama 123.69° olarak hesaplanmıştır. Rüzgar yönündeki yüksek standart sapma (93.44), rüzgarın çok farklı yönlerden geldiğini, ancak ortalamanın belirli bir hakim yön olduğuna işaret ettiğini göstermektedir. Ortalama Hız değişkeni 7.44 m/s ile genel rüzgar profilini özetlemekte ve aktif güç üretim değerleriyle tutarlılık sergilemektedir. Ortalama Yön ise 117.70° değeriyle, türbin yerleşimi ve yönlendirme mekanizması açısından kritik öneme sahip olan hakim rüzgar yönünü temsil etmektedir.



Şekil 4. Değişkenler arası korelasyon matrisi

Şekil 4'te değişkenler arası korelasyon matrisi verilmiştir. Zaman bileşenleri (saat, gün, ay, yıl) süreksiz ve döngüsel olduklarından matriste yer almamıştır. Rüzgar hızının zamana doğrudan güçlü bir bağı olmadığı için çıkarılmıştır. Rüzgar hızı ile LV aktif güç arasındaki yüksek pozitif korelasyon, sistemin fiziksel prensiplere uygun çalıştığını göstermektedir. Teorik güç eğrisiyle ölçülen aktif güç arasındaki

yüksek korelasyon, modelin gerçek sistemi iyi temsil ettiğini kanıtlar. Rüzgar yönünün düşük korelasyonu ise türbin yönlendirme mekanizmasının doğru çalıştığını göstermektedir. Genel olarak korelasyon yapısı, sistem güvenilirliğini ve veri doğruluğunu teyit eder; bu analiz, performans değerlendirmesi ve optimizasyon için temel bir araçtır.



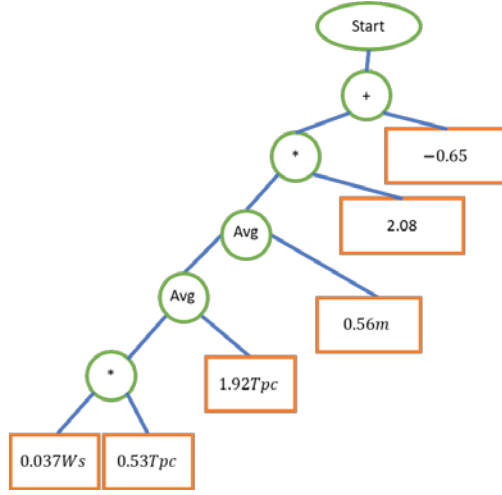
Şekil 5. Giriş parametrelerine ilişkin histogram grafiği

Şekil 5'te giriş parametrelerine ait histogramlar verilmiştir. Güç çıkışı belirgin şekilde sağa çarpık bir dağılım göstermekte ve verilerin çoğu 0–1000 kW aralığında yoğunlaşmaktadır. Bu durum, türbinin çoğunlukla nominal kapasitesinin altında çalıştığını göstermektedir. Ortalama değerin medyandan yüksek olması, yüksek güç değerlerinden kaynaklanmaktadır. Yaklaşık 3600 kW civarındaki tepe noktalar, türbinin maksimum kapasitesine ulaştığı anları temsil eder. Rüzgar hızı dağılımı yaklaşık normaldir ve 4–12 m/s aralığında yoğunlaşmıştır; bu da türbinin optimum çalışma bölgesini yansıtır. Kesme hızı (≈ 3.5 m/s) ve açma hızı (≈ 25 m/s)

hızları sırasıyla türbinin çalışma başlangıcı ve güvenlik durdurma koşullarını belirtir. Teorik güç eğrisi de benzer biçimde sağa çarpık dağılım sergiler; sağ uçtaki sınır teorik maksimum kapasiteyi gösterir. Gerçek ve teorik değerler arasındaki farklar, sistem verimliliği ve operasyonel kayıplar hakkında bilgi sağlar. Rüzgar yönü dağılımı multimodal yapıdadır ve 180° – 270° arasında yoğunlaşmıştır; bu durum bölgenin hakim rüzgar yönlerinin güneybatı–kuzeybatı ekseninde olduğunu gösterir. Ortalama hız dağılımı dar bir aralıkta yoğunlaşarak aşırı değerleri filtrelerken, ortalama yön dağılımı 210° ve 240° civarında iki belirgin hakim yön ortaya koymaktadır.

3.3. GEP Yöntemine İlişkin Sonuçlar

GEP yöntemini kullanarak gerçekleştirilen sembolik regresyon analizinden elde edilen sonuçlar, modelin tahmin performansı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Testlere ilişkin veri seti üzerinde Pearson R^2 değeri 0.92 olarak hesaplanmıştır; bu, modelin bağımsız veri setindeki varyansın %92'sini açıkladığını göstermektedir. Eğitim veri setinde ise R^2 değeri 0.90 seviyesinde kalarak modelin genelleme yeteneğinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Hata metriklerine bakıldığında, test seti için ortalama mutlak hata (MAE) yaklaşık 199.86, ortalama karesel hata (MSE) ise 141,537.81 olarak ölçülmüştür. Normalleştirilmiş ortalama karesel hata (NMSE) değerleri hem test (0.081) hem de eğitim (0.095) setlerinde düşük seviyelerde seyretmektedir. Modelin derinliği 8, uzunluğu ise 13 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, modelin genel performansı tatmin edici düzeydedir ve veri setindeki desenleri başarılı şekilde yakalayabildiği görülmektedir. GEP yöntemi kullanılarak elde edilen eşitlik ağacı Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen ağacın çözümlemesi yapıldığında doğrudan Denklem 5 ile ilişkili olduğu görülebilir.



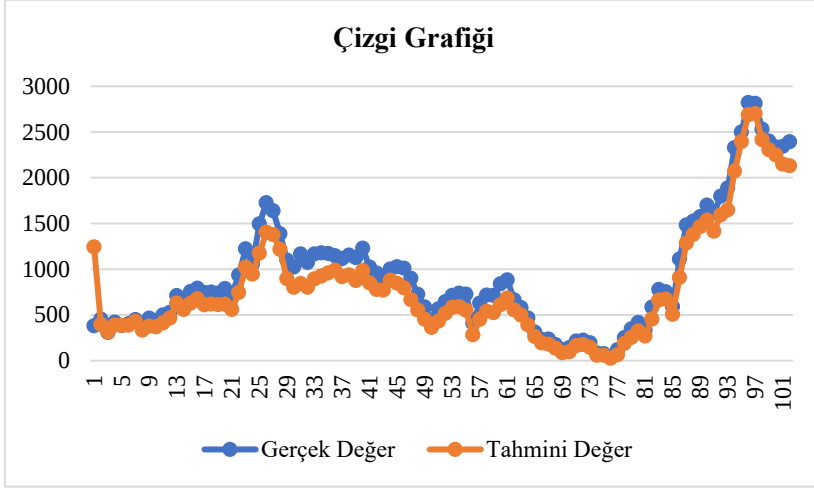
Şekil 6. GEP yöntemine ilişkin ağaç

GEP kullanılarak yapılan çalışmada elde edilen matematiksel eşitlik Denklem 5’de verilmiştir.

$$Pa(t) = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (c_0 \cdot Ws \cdot c_1 \cdot T_{pc}(t-1) + c_2 \cdot T_{pc}) + c_3 \cdot m \right) \cdot c_4 + c_5 \right) \quad (5)$$

Denklem 5’te $c_0 = 0.0379$, $c_1 = 0.53$, $c_2 = 1.92$, $c_3 = 0.56$, $c_4 = 2.08$, $c_5 = -0.654$ olarak hesaplanmıştır. Sembolik regresyon analizi sonucunda geliştirilen model, test veri seti üzerinde 0.92 Pearson R^2 değeri ile oldukça yüksek bir açıklayıcılık göstermiştir. Gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırıldığı Şekil 7’de sunulan çizgi grafiği, modelin hem eğitim hem de test verilerindeki temel eğilimleri başarıyla yakaladığını görsel olarak doğrulamaktadır. Normalleştirilmiş ortalama karesel hatanın test verilerinde 0.081 seviyesinde kalması, modelin genelleme performansının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen sembolik regresyon modelinin veri setindeki altta yatan ilişkileri etkili bir şekilde modellediği ve güvenilir tahminler ürettiği akademik olarak

doğrulanmıştır. Şekil 7’de GEP yöntemi ile elde edilen tahmini veriler ve gerçek değerlerin çizgi grafiği sunulmuştur.



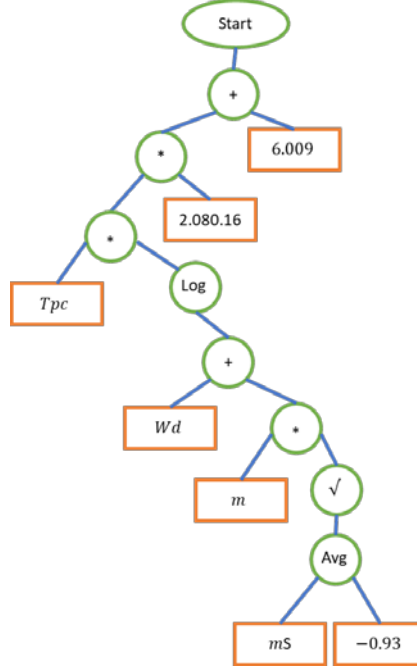
Şekil 7. GEP yöntemine ilişkin çizgi grafiği

3.4. GE Yöntemine İlişkin Sonuçlar

GEP tabanlı sembolik regresyon analizinde modelin yüksek doğrulukta sonuçlar ürettiği görülmüştür. Test verisinde elde edilen 0.935 Pearson R^2 değeri, modelin varyansın %93.5’ini açıkladığını göstermektedir. Normalleştirilmiş ortalama karesel hatanın testte 0.073, eğitimde 0.093 olması, modelin genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu kanıtlamaktadır. 11 derinlik ve 17 uzunluktaki model yapısı, problem karmaşıklığına uygun biçimde optimize edilmiştir. 291.300 çözüm arasından seçilen en iyi model, eğitim ve test verilerinde tutarlı performans göstererek GE yönteminin etkinliğini ortaya koymuştur. Elde edilen eşitlik ağacı Şekil 8’de, matematiksel ifade ise Denklem 6’da sunulmuştur.

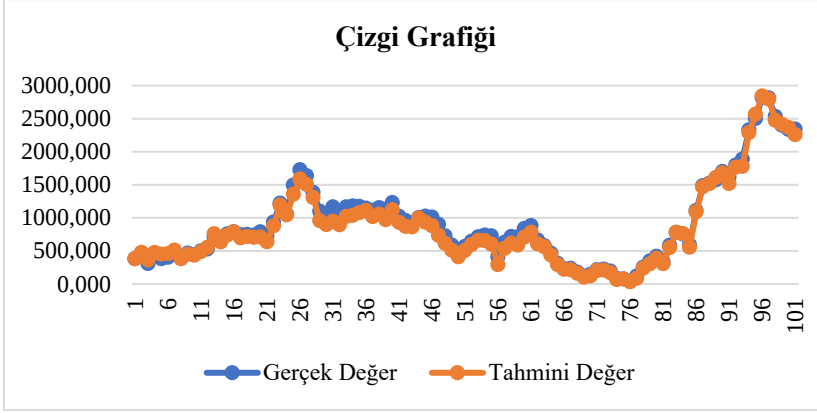
$$Pa(t) = \left(T_{pc} \cdot \log \left(\left(Wd (^\circ) + month \cdot \left(\frac{1}{2} (m_s + c_0) \right)^2 \right) \right) \cdot c_1 + c_2 \right) \quad (6)$$

Denklem 6'da $c_0 = -0.93293, c_1 = 0.16134, c_2 = 6.0096$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. GE yöntemine ilişkin ağaç

GE tabanlı sembolik regresyon modelinin performansı, Şekil 9'daki gerçek ve tahmini değer grafiğine göre başarılıdır. Çizgiler arasındaki yüksek uyum, modelin temel patternleri etkili şekilde öğrendiğini ve 0.935 R^2 değeri ile tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Minimal sapmalar, test veri setindeki 166.31'lik ortalama mutlak hatayı doğrulamaktadır. Karmaşık yapısına (derinlik: 11, uzunluk: 17) rağmen modelin sağladığı yüksek uyum, GE metodolojisinin bu tür problemler için etkinliğini kanıtlamaktadır. Görsel analizler, modelin eğitim ve test verilerinde güçlü ve güvenilir tahminler üretebildiğini teyit etmektedir.



Şekil 9. GE yöntemine ilişkin çizgi grafiği

GEP ve GE yaklaşımlarıyla geliştirilen sembolik regresyon modellerinin karşılaştırmalı analizi, her iki yöntemin de yüksek performanslı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymaktadır. GEP modeli test veri setinde 0.920 R^2 değeri ve 0.081 NMSE ile güçlü bir tahmin performansı sergilerken, GE modeli 0.935 R^2 ve 0.073 NMSE değerleriyle daha da yüksek bir açıklayıcılık seviyesine ulaşmıştır. Her iki modelin gerçek ve tahmini değer çizgileri arasındaki yüksek uyum, modellerin verideki temel dinamikleri başarıyla yakaladığını doğrulamaktadır. Model karmaşıklığı açısından incelendiğinde, GEP'nin 8 derinlik ve 13 uzunluk değerlerine karşılık, GE'nin 11 derinlik ve 17 uzunluk değerleriyle daha karmaşık bir yapı sergilediği görülmektedir. Hata metrikleri değerlendirildiğinde, GE modelinin test veri setinde 166.31 MAE değeriyle GEP modelinin 199.86 MAE değerine kıyasla daha düşük hata seviyeleri gösterdiği gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, her iki yöntem de etkili sembolik regresyon çözümleri sunmakla birlikte, GE yaklaşımının sunulan problem özelinde daha optimize edilmiş ve yüksek performanslı modeller üretme potansiyeli taşıdığı akademik olarak değerlendirilmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında sembolik regresyon problemlerine yönelik iki önemli evrimsel yöntem olan GEP ve GE ayrıntılı biçimde ele alınmış ve karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulmuştur. Bulgular, her iki yöntemin de karmaşık sistemlerde yüksek doğruluk düzeyiyle tahminler üretebildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle GE yaklaşımı, genotip-fenotip ayrımı ve gramer tabanlı yapı sayesinde daha yüksek açıklayıcılık ve genelleme kapasitesi sergilerken; GEP, kromozom temelli esnek kodlama yapısıyla daha yalın ve hesaplama açısından verimli modeller üretme avantajı sağlamaktadır. Her iki yöntemin de rüzgâr enerjisi tahmini, mühendislik problemleri ve farklı disiplinlerde başarılı uygulamalar sunması, sembolik regresyonun yorumlanabilir yapay zekâ modelleri geliştirmedeki önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Sonuç olarak, GEP ve GE yöntemlerinin nitelikleri göz önünde bulundurulduğunda, araştırmacılar için problem çözümü noktasında kapsamlı bir metodolojik çerçeve önerilmektedir. Bu çerçeve, yalnızca teorik bir katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda veri odaklı bilimsel araştırmalarda açıklanabilirlik ve doğruluk dengesini gözetten pratik çözümler geliştirilmesine de katkıda bulunmaktadır.

REFERANSLAR

- AbdusSalam, S., Abel, S., & Romão, M. C. (2025). Symbolic regression for beyond the standard model physics. *Physical Review D*, 111(1), 015022.
- Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R. E., & Francone, F. D. (1998). Genetic Programming: An Introduction. Morgan Kaufmann.
- Berkerisen, R. (2021, October 1). *Wind Turbine SCADA Dataset* (Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/berkerisen/wind-turbine-scada-dataset>
- Çelik, Y. H., & Fidan, Ş. (2022). Analysis of cutting parameters on tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy by multiple linear regression and genetic expression programming methods. *Measurement*, 200, 111638.
- Dong, J., & Zhong, J. (2025). Recent Advances in Symbolic Regression. *ACM Computing Surveys*, 57(11), 1-37.
- F. Noorian, A. M. de Silva, ve P. H. W. Leong, “gramEvol: Grammatical Evolution in R”, J. Stat. Softw., c. 71, ss. 1-26, Tem. 2016, doi: 10.18637/jss.v071.i01.
- Ferreira, C. (2001). Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. *Complex Systems*, 13(2), 87–129.
- Ferreira, C. (2006). Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence (2nd ed.). Springer.
- Fidan, Ş. Wind Energy Forecasting Based on Grammatical Evolution. *European Journal of Technique (EJT)*, 14(1), 23-30.
- Isik, I., Bati, S., Demir, M. E., Fidan, S., & Celik, Y. H. (2025). Symbolic regression analysis of cutting force and

- delamination in drilling and punching of GFRP composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 07316844251334171.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An Introduction to Statistical Learning*. New York: Springer.
- Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin.
- Li, Y., Ning, J., Wang, T., & Sun, Z. (2017). A Comprehensive Review of Gene Expression Programming. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data*.
- Lv, Q., Zhou, T., Zheng, H., Amiri-Ramsheh, B., Hadavimoghaddam, F., Hemmati-Sarapardeh, A., ... & Li, L. (2024). Modeling hydrogen solubility in water: comparison of adaptive boosting support vector regression, gene expression programming, and cubic equations of state. *International Journal of Hydrogen Energy*, 57, 637-650.
- M. O'Neill ve C. Ryan, "Grammatical evolution", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, c. 5, sy 4, ss. 349-358, Ağu. 2001, doi: 10.1109/4235.942529.
- Mazraeh, H. D., & Parand, K. (2024). GEPINN: An innovative hybrid method for a symbolic solution to the Lane–Emden type equation based on grammatical evolution and physics-informed neural networks. *Astronomy and Computing*, 48, 100846.
- McConaghy, T. (2011). FFX: Fast, scalable, deterministic symbolic regression technology. In *Genetic*

- Programming Theory and Practice IX* (pp. 235-260). Springer.
- Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. MIT press.
- Nawaz, M. N., Akhtar, A. Y., Awan, T. A., Nawaz, M. M., Qamar, S. U., Shehzad, T., ... & Farooq, R. (2024). Multivariate formulation to predict the frictional strength of fiber reinforced soils using gene expression programming. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 134, 108660.
- O'Neill, M., & Ryan, C. (2003). *Grammatical Evolution: Evolutionary Automatic Programming in an Arbitrary Language*. Springer.
- Petersen, B. K., Landajuela, M., Mundhenk, T. N., Santiago, C. P., Kim, J. T., & Kim, S. K. (2021). Deep symbolic regression: Recovering mathematical expressions from data via risk-seeking policy gradients. *arXiv preprint arXiv:1912.04871*.
- Poli, R., Langdon, W. B., & McPhee, N. F. (2008). *A Field Guide to Genetic Programming*.
- Ryan, C. (1998). *Automatic Re-engineering of Software Using Genetic Programming*. Kluwer Academic Publishers.
- Ryan, C., Kshirsagar, M., Vaidya, G., Cunningham, A., & Sivaraman, R. (2022). Design of a cryptographically secure pseudo random number generator with grammatical evolution. *Scientific reports*, 12(1), 8602.
- Ryan, C., O'Neill, M., & Collins, J. J. (2018). *Handbook of Grammatical Evolution*. Springer.

- Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data. *Science*, 324(5923), 81–85.
- Trujillo, L., Muñoz, L., Galván-López, E., & Silva, S. (2016). Neat Genetic Programming: Controlling bloat naturally. *Information Sciences*, 333, 21-43.
- Valmeekam, K., Olmo, A., Sreedharan, S., & Kambhampati, S. (2023). Large language models still can't plan (a benchmark for LLMs on planning and reasoning about change). *arXiv preprint arXiv:2206.10498*.
- Udrescu, S. M., & Tegmark, M. (2020). AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression. *Science Advances*, 6(16), eaay2631.
- Wagner, S., & Affenzeller, M. (2005). HeuristicLab: A generic and extensible optimization environment. In B. Ribeiro, R. F. Albrecht, A. Dobnikar, D. W. Pearson, & N. C. Steele (Eds.), *Adaptive and Natural Computing Algorithms* (pp. 538-541). Springer. https://doi.org/10.1007/3-211-27389-1_130
- Wynne, G., Duncan, A. B., Girolami, M., & Barp, A. (2023). Foundations of geometry and symbolic regression for discovering physical laws from data. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 381(2251), 20220052.
- Zhang, P., Tang, K., Wang, A., Wu, H., & Zhong, Z. (2024). Neural network integrated with symbolic regression for multiaxial fatigue life prediction. *International Journal of Fatigue*, 188, 108535.

ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

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