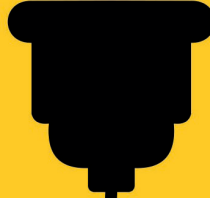


Aralık '25

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Alanında Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar



EDİTÖR
DOÇ.DR. HİLMİ ZENK

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8559-70-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI DERLEME, ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

Editör

DOÇ. DR. HİLMİ ZENK

İÇİNDEKİLER

DELTA ROBOTLAR VE ENDÜSTRİDE UYGULAMA ALANLARI....7

Fatmanur ATEŞ, Ramazan ŞENOL

VERİ ODAKLI ENERJİ YÖNETİMİ: GÜÇ SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKÂ ENTEGRASYONU VE UYGULAMALARI 21

Cihan AYHANCİ

KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA (PMSM) ALAN YÖNELİMLİ KONTROL (FOC) İÇİN UZAY VEKTÖR MODÜLASYONU (SVM) ENTEGRASYONU35

M. Murat TEZCAN, Ömer Furkan YANIK

OGR SİSTEMİ DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNDE FARKLI AMAÇ FONKSİYONLARININ ETKİSİ

63

Muhammet DEMİRBAŞ, M. Kenan DÖŞOĞLU

GÜNEŞ ENERJİSİ: TEK DİYOTLU PV PANEL MODELİ, YÜKSELTİCİ (BOOST) DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE MPPT ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ..... 89

Selami KARAKAŞ

İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİN VERİMLİLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI..... 105

Hande DEMİRÖZ, Koray ÜLGEN

**KÜRESELDE ENERJİ DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİNDEKİ YATIRIM
EĞİLİMLERİ VE TÜRKİYE..... 129**

Fatmanur ATEŞ, Ramazan ŞENOL

**3D YAZICI TEKNOLOJİLERİNİN RF UYGULAMALARINDA
KULLANIMI VE RF UYUMLU FONKSİYONEL FİLAMANTLER.... 145**

Burak DÖKMETaş

**ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞMENİN GEÇMİŞİ, BUGÜNÜ VE
GELECEĞİNE GENEL BAKIŞ 161**

Cihan AYHANCİ

**RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ ÖLÇEĞİNDE DİJİTAL İKİZ
YAKLAŞIMI: TÜRBİN İZ ETKİSİ, KONTROL VE OPTİMİZASYON 177**

Umut SARAY



DELTA ROBOTLAR VE ENDÜSTRİDE UYGULAMA ALANLARI

“ ”

Fatmanur ATEŞ¹

Ramazan ŞENOL²

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

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

1. Giriş

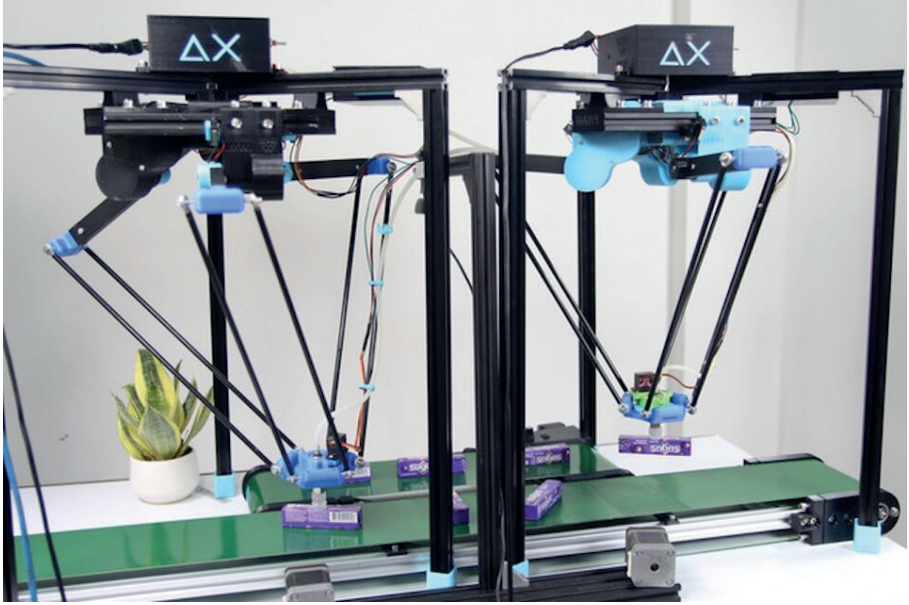
Teknolojik gelişmelerle insanlar tarafından yapılan pek çok iş artık robotlar tarafından yapılmaktadır. Robotların kullanım alanları ve amaçları gıdadan sağlık sektörüne, lojistikten tarım işlemlerine kadar pek çok alanda her geçen gün değişirken değişmektedir ve çeşitlenmektedir. Böylece insanlar hem zamanlarından tasarruf edebilmekte hem de fiziksel olarak zorlayıcı veya tekrarlı işlerden yılmak durumunda kalmamaktadırlar.

Robotlar yüksek hız ve hassas ölçüm kabiliyetlerine sahip olabilirler ayrıca yorulmadan çalışabilirler. Bu özellikleri onları insanlara göre çok daha verimli kılmaktadır. Ayrıca bazı işlerin insanlar veya diğer canlılar için can güvenliği oluşturabilir. Bu alanlarda robotların kullanımı, riskleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Robotik sistemlerin hata oranları gün geçtikçe düşmekte ve performansları sürekli iyileştirilmektedir. Bu sistemlerin arasında dikkat çeken robot türlerinden biri de delta robotlardır. Özellikle son yıllarda kullanımının hızla artması, delta robotları endüstriyel otomasyonun önemli bir unsuru hâline getirmiştir.

Delta robotlar, birçok kinematik zincirin birlikte çalıştığı paralel robot yapısının önemli örneklerindendir. Değiştirilebilir uç efektörleri ve paralel-kenar mekanizmasına dayanan yapılarıyla X, Y ve Z doğrultularında hareketler gerçekleştirebilirler. Üç kolun üst platformdan eşzamanlı olarak hareket ettirilmesiyle genellikle küçük bir üçgen olan uç platform yönlendirilir. Robotun bu yapısı yüksek hız ile yüksek ivme elde edilmesine izin verir (Kaewkorn vd.).

Delta robotların yapısal tasarımındaki en önemli avantaj, aktüatörlerin tamamen sabit platform üzerinde konumlandırılmış olmasıdır. Bu durum, hareket eden kolların kütlesini minimuma indirmeyi sağlar. Böylece robot çok yüksek hızlarda dahi kararlı bir şekilde çalışabilir (Öztürk, 2019). Paralel kinematik yapı, yükün tüm kollar arasında eşit şekilde dağılmasına olanak tanıdığı için sistem hem daha rijit hem de titreşime karşı daha dayanıklıdır. Bu nedenle delta robotlar, seri kinematik yapıya sahip robotlara kıyasla çok daha hassas konumlandırma yeteneği sunabilirler. Ayrıca yüksek tekrarlanabilirlik gerektiren süreçlerde tercih edilmektedir (Ayyıldız ve Ayyıldız, 2020).

Delta robotlar 1980'lerin başında Clavel tarafından geliştirilmiştir (Clavel, 1990). Delta robotların geliştirilme amacının, küçük ve hafif nesneleri çok yüksek hızlarda taşınması olarak ifade edilmiştir (Dastjerdi, 2020). Günümüzde ise yüksek rijitlikleri, düşük hareketli kütleleri ve hassas konumlandırma kabiliyetleri sayesinde alma-bırakma uygulamalarından makine takımı teknolojilerine (CNC tezgahlar, freeze makineleri vb.) kadar geniş bir alanda etkin şekilde kullanılmaktadır (Chen ve Su, 2025). Şekil 1'de örnek delta robot görseli verilmiştir.



Şekil 1: Delta robot – görüntüleme modülü ve konveyör sistemli kurulum (Trungdoanhong, Wikimedia Commons)

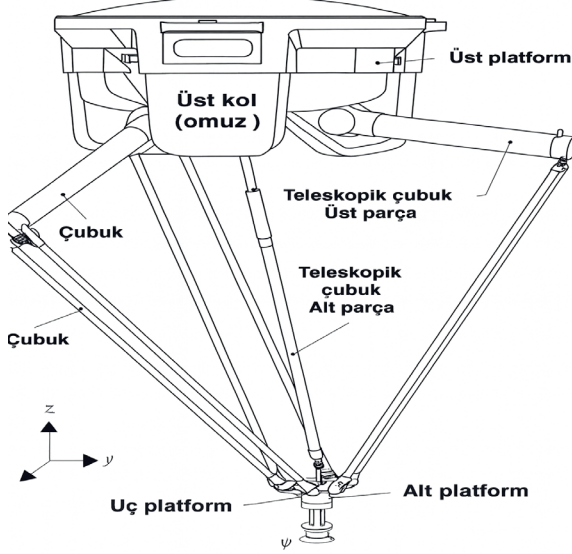
Bu çalışmada delta robotun temel yapısı, avantajları ve sınırlılıklarına değinilmiştir ayrıca endüstrideki kullanım alanlarından örnekler verilmiştir. Amaç, okuyucuların delta robot teknolojisi hakkında bilgi edinmesini sağlamak ve endüstriyel uygulamalarda bu sistemlerden nasıl faydalanabileceklerini göstermektir. Delta robotların yüksek hız, hassasiyet ve verimlilik özellikleri sayesinde otomasyon süreçlerinde önemli katkılar sunduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, bu çalışmanın sektördeki mühendisler ve araştırmacılar için bir rehber niteliği taşıması hedeflenmiştir.

2. Delta Robotun Temel Yapısı ve Çalışma Prensibi

Paralel robotlar sınıfına dahil olan delta robotlar, endüstride yüksek hızlı ve nesneleri hassas bir şekilde taşımak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel olarak, delta robot iki paralel plaka arasında çalışır: alttaki plaka hareketli bir platform, üstteki plaka ise üç kapalı kinematik zincirle birbirine bağlı sabit bir plakadan oluşur. Bu yapı, mekanik olarak hafiftir ancak dinamik olarak oldukça güçlü bir sistem meydana getirir (Kushwaha, 2024; Tamizi vd., 2022). Şekil 2’de temel delta robot yapısı verilmiştir.

Delta robotun mekanik tasarımı, Şekil 2’den de gözlemlenebileceği gibi hareketli platform ile uç efektör bağlantılıdır. Kolların uzunluğu, eklem tipleri ve serbestlik dereceleri gibi robota ait parametreler robotun performansına ve çalışma alanına etki eder. Genellikle, delta robotlar üç serbestlik derecesine sahiptir, ancak bazı tasarımlar, uç efektörün dönmesini sağlamak için dör-

düncü bir motor ve ek eklem sistemi içerir. Bu sayede robot, daha karmaşık görevleri yerine getirebilir (Ellassal vd., 2024).



Şekil 2: Temel delta robot yapısı

Delta robotların çalışma alanı sınırlıdır. Çalışma alanının sınırları, delta robotlar için en önemli parametredir. Robotun kollarının uzunluğu ve kullanılan motorların dönme açıları, çalışma alanını doğrudan etkiler. Ayrıca çevresel faktörler ve yük sınırları da robotun güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını belirler. Bu nedenle delta robot tasarımında sınırlamalar dikkate alınmalıdır (Laribi vd., 2007).

Delta robotlar, hafif yapıları sayesinde yüksek hızda hareket etme yeteneğine sahiptirler. Ancak bu hafif yapısı da belirli sınırlamalar getirir. Özellikle kısıtlama kuvvetleri dikkate alınmazsa, mekanik sistemde aşırı yüklenme veya parçalanma riski oluşabilir. Yükün platform üzerindeki kütle merkezi, hareket sırasında devrilme torklarına yol açabilir; bu nedenle destek eklemleri ve kolların dayanıklılığı kritik öneme sahiptir (Gnad vd., 2024).

Sonuç olarak, delta robotlar hafif yapıları, yüksek hız ve hassasiyet kapasitesi sayesinde endüstride yaygın olarak farklı alanlarda kullanılmaktadır. Ancak, mekanik sınırlamaların, kısıtlama kuvvetlerinin ve yük merkezinin etkilerinin tasarım ve kontrol aşamalarında dikkatle ele alınması önemlidir. Delta robotun kinematik ve dinamik analizi, güvenli ve verimli bir çalışma ortamı için kritik öneme sahiptir.

3. Endüstride Kullanım Alanları

Delta robotlar endüstride farklı alanlarda farklı amaçlarla kullanılan ro-

botik çözümlerdendir. Yüksek hızlı ve hassas olmalarıyla otomotiv, gıda, tıp, ilaç, elektronik sektöründe, tarımda, 3B baskıda, insan – robot etkileşiminin olduğu diğer alanlarda kullanımları tercih edilmektedir (Chen ve Su, 2025; Shen vd., 2021; Wang vd., 2025; Pham ve Kuo, 2023; Dastjerdi, 2020; Huang vd., 2025; Gezery vd., 2025). Seri robotlara kıyasla yük taşıma kapasitesinin fazla olması inşaat sektörü gibi alanlarda da kullanımını kolaylaştırır (Tamizi vd., 2022; Azad vd., 2022). Aşağıda delta robotların endüstride kullanımına yönelik örnek çalışmalar verilmiştir.

Tarım alanında artan üretim maliyetleri ve köyden şehre göçün artması ile birlikte oluşan iş gücü kıtlığı robotik sistemlerin tarımda kullanılması- nın önemini ortaya koymaktadır. Delta robotlar tarımda da farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Bu amaçlara örnek olarak Şlajpah vd. çalışması verilebilir. Şlajpah vd., kuşkonmaz bitkisinin narin ve değişken büyümeye sahip olduğundan hasat zorluğunun önemine vurgu yaparak delta robot ile kuşkonmaz hasadı gerçekleştirmişlerdir. Kuşkonmaz hasadı için büyük makineler ya da sera gibi kapalı ortama uygun çözümler olması sebebiyle açık alanda da kullanılabilecek hafif bir tarım robotu tasarlamayı amaçlamışlardır. Hareketli platform üzerine monte etmiş oldukları delta robotu, kuşkonmazı kavrayıp kesen tutucuya sahiptir. Ayrıca platformları üzerinde kuşkonmaz mızrak- larını tespit eden sensör sistemi olduğunu belirtmişlerdir. Robotik sistemi 3 boyutlu yazıcı modelleri kullanarak laboratuvar ortamında daha sonra açık ortamda test etmişlerdir. Laboratuvar ortamında %88 hasat başarı oranı, açık ortamda %77 hasat başarı oranı elde etmişlerdir (Şlajpah, 2023).

Delta robotların tarımsal alanda kullanımına Huang ve arkadaşlarının çalışması bir diğer örnek olarak verilebilir. Çalışmadan tohumluk patates kesimi için delta robot temelli robotik sistem tasarımı yapılmıştır. Yazarlar tohumluk patates kesiminin genellikle el ile yapıldığından tohum parçasının hasar görmesine ve hastalık bulaşma riski oluştuğuna vurgu yaparak has- sas ve hızlı otomatik sistemlerin geliştirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. POD-YOLO (Potato Orientation Detection You Only Look Once) mimarisi ile patateslerin duruşunu, sınırlarını ve göz konumlarını belirlemişler kesme işlemini görsel algılama ünitesine de sahip dört serbestlik dereceli delta robot tarafından gerçekleştirmişlerdir. Yuvarlak patateslerde %85 kesme başarı ve yaklaşık 418,8 kg/saat verim elde ettiklerini bu sonucunda kalifiyeli bir işçi- nin çalışmasının yaklaşık 3 katı olduğunu belirtmişlerdir (Huang vd., 2025).

Delta robotların yabani otları temizlemede de kullanım alanları mevcut- tur. Organik tarımda kimyasal ilaç kullanılmadığından yabancı otlar ya me- kanik yöntemlerle ya da el ile temizlenir. Ancak özellikle el ile temizlenmesi yoğun emek gerektirdiğinden ve zaman alıcı olduğundan robotiğe ait yeni çözümler üretilmektedir. Hussmann vd., yabancı ot temizliği için delta robot temelli bir robotik sistem önermişlerdir. Tasarladıkları robotun parçalarını 3 boyutlu yazıcı ile elde etmişler, mekanik tasarımı Autodesk Inventor'da yap-

mışlardır. Arduino Mega + RAMPS kartını tasarımlarında kullandıklarını belirtmişlerdir. Sonuçta düşük maliyetli olmasına karşın tatmin edici doğrulukta bir robot tasarımı yaptıklarını belirtmişlerdir. Yabani ot temizliğinde robotun kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Hussmann vd., 2019).

Nüfusun hızla artması sebebiyle gıda ihtiyacı artmakta ve verimli arazi alanları azalmaktadır. Talebi karşılamak için hassas besin kontrolü, verimli kaynak kullanımı, zararlılardan hastalıklardan oluşacak risklerin azaltılması, sık ekim topraksız tarım gibi konulara odaklanılmalıdır. Elsherbiny vd., bu problemlere dikkat çekerek bir delta robot tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında aeroponik sistemlerde dut çeliği büyümesini otomatik olarak izlemek ve geliştirmek için IoT tabanlı delta robot tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tomurcuk büyüme durumunu tespit etmek ve konumunu belirlemek amacıyla robot üzerinde bulunan kamera ile üç farklı açıdan görüntüleri alıp Tiny-YOLO'nun hafif modelleri (YOLOv8-YOLOv11) kullanılarak 3000 görüntü üzerinde eğitim gerçekleştirmişlerdir. Denedikleri yapay zeka modelleri içerisinde Tiny-YOLOv9 modelini önermişlerdir. Delta robotun uç noktasının koordinatlarını geri beslemeli yapay sinir ağları ve ElasticNet kullanarak hesaplamışlardır. Geri beslemeli yapay sinir ağları ile $R^2=0.999$ doğruluk elde etmişlerdir. Sonuçta düşük gelişim gösteren çeliği bulmak ve üzerine delta robot yardımıyla büyüme düzenleyici solüsyon püskürtme işlemini gerçekleştirmişlerdir (Elsherbiny, 2025).

Gıda endüstrisinde de delta robotlar kullanım alanı bulmaktadır. Gıda endüstrisinde paketleme sürecinin üretim maliyeti üzerinde etkisi büyüktür ve hız gerektirir. Ayrıca paketlerin eşit ağırlığa sahip olması ise önemli bir etkidir. Kaewkorn vd. buradan ilham alarak gıda üretim endüstrisinde kullanılabilecek nesne alıp yerleştirebilen delta robot geliştirmişlerdir. Ancak, delta robot prototipinin hala büyük bir hata oranına sahip olmasından ötürü 0,1 mm'den az hata gerektiren endüstriyel amaçlar için kullanılamayacağını belirtmişlerdir (Kaewkorn vd., 2019).

Gıda endüstrisinde delta robotların bir diğer kullanımına Mojtahedi vd.'nin çalışması örnek olarak verilebilir. Araştırmacılar bu çalışmalarında otonom çikolata paketleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada iki parmaklı tutucuya sahip delta paralel robot ile rastgele konumda bulunan çikolataların bir kutu içerisine yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Nesne tespiti için robot üzerine monte edilen kamera ile alınan görüntüler klasik görüntü işleme yöntemleri (Canny kenar belirleme ve Hough dönüşümleri) kullanılarak işlenmiş, dairesel nesnelerin merkez koordinatları belirlenmiştir. Kamera-robot kalibrasyonu ile görüntü koordinatlarının robot koordinat sistemine aktarılması sağlanmış; robot TCP bağlantısı üzerinden gönderilen hedef noktalara pick-and-place işlemlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda alma yerleştirme için %82 başarı oranı elde ettiklerini rapor etmişlerdir (Mojtahedi vd., 2024).

Delta robotların görüntü işleme yöntemleri ile birleştirildiği bir diğer çalışmaya örnek olarak Öztürk ve Kuncan'ın çalışması verilebilir. Çalışmada lineer bir delta robot tasarlanmıştır. Araştırmacılar robotun kontrolünü endüstride yaygın kullanılan PLC tabanlı bir yapı ile sağlamışlardır. Kamera ile alınan görüntüler işlenerek nesnelerin konum bilgileri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler PLC'ye aktarılmıştır. Görüntü işleme yöntemleri kullanılarak robotun belirlenen noktalara başarıyla hareket etmesinin sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada görüntü işleme ile elde edilen koordinatların kinematik analizle %100 doğrulukla yeniden oluşturulduğu, ancak lineer delta robot tasarımıındaki mekanik kısıtlar nedeniyle bazı noktalarda z-konumu hataları oluştuğu belirtmişlerdir (Öztürk ve Kuncan, 2022).

Delta robotlar paralel robotlar kategorisindedir. Paralel manipülatörler daha yüksek rijitliğe sahiptirler ve istenilen hassasiyeti de koruyarak daha yüksek hızlara ve ivmelere erişebilirler. Bu özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe de ağır yüklerde al yerleştir görevlerinde kullanım alanı bulurlar. Azad vd., geri adımlamalı kayan kip kontrolörü (backstepping-Sliding Mode Ccontrol) tabanlı gürbüz kontrol yaklaşımını, çevrim içi dinamik model seçimi ve takviyeli öğrenme ile birleştirerek delta paralel robotlarda dış yük değişimlerine adaptif, sarsıntısız ve yüksek doğruluklu izleme kontrolü sağlamıştır (Azad vd., 2022).

Moharana vd. delta robotların yapıları gereği hafif olduğundan ve yüksek hız, hassasiyet özelliklerine sahip olduğundan endüstride yüksek hızlı lazer kesim uygulamalarında tercih edildiğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında delta robotların lazer kesim teknolojisindeki öneminden, delta robotun kinematik analizinden bahsetmişlerdir. Paralel kinematik yapıya sahip olan lazer kesim sistemlerinin performansını ve endüstride kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir (Moharana vd., 2014).

4. Delta Robotların Endüstrideki Avantajları, Zorlukları, Sınırları

Delta robotlar yapıları gereği pek çok avantaj barındırdığından farklı endüstriyel alanlarda kullanılırlar. Avantajları maddeler halinde şu şekilde sıralanabilir;

- Yapıları genellikle hafiftir (Chen ve Su, 2025).
- Boyutları küçüktür (Chen ve Su, 2025).
- Yüksek hareket hızına sahiptirler (Chen ve Su, 2025).
- Genellikle düşük maliyetlidirler (Chen ve Su, 2025).
- Yüksek verimliliğe sahiptirler (Wang vd., 2025)
- Yüksek hassasiyetli kavrama yeteneğine sahiptirler (Wang vd., 2025)

- Doğru ve hassas konumlandırma kabiliyetine sahip olabilirler (Wang vd., 2025)

- Her kinematik zincir genellikle yalnızca bir aktüatöre sahip olup tabana monte edildiğinden, bağlantı ağırlıkları azaltılır ve daha ağır nesnelerin taşınması mümkün olabilir (Tamizi vd., 2022).

- Az sayıda bağlantı ve eklem uyumluluğu ile mekanik basitliğe sahiptirler (Bortoff, 2023).

Bunun yanı sıra;

- Kinematik ve dinamik yapılarının karmaşık olması (Wang, 2025),
- Geometrik ve geometrik olmayan hatalardan etkilenmeleri (Wang, 2025),
- Sınırlı çalışma alanına sahip olmaları (Pham ve Kuo, 2023; Dastjerdi, 2020),

Dezavantajları olarak sıralanabilir.

5. Delta Robot Teknolojilerinde Gelişen Eğilimler

Delta robotlar, yüksek hızları, hafiflikleri, hassasiyetleri, doğrulukları gibi nedenleriyle endüstride yaygın olarak kullanılmakla birlikte, gelecekte bu robotların yeteneklerinin daha da genişleyeceği ve kullanım alanlarının daha da artacağı öngörülmektedir. Özellikle yapay zekâ, gelişmiş algılama sistemleri, enerji verimliliği ve işbirlikçi robotik gibi alanlardaki gelişmeler, delta robot teknolojisinin gelecekteki yerine ilişkin fikir vermektedir.

Delta robotlar yapay zekâ destekli kontrol algoritmaları ile geliştirilmektedir. Mevcutta kontrol yapıları çoğunlukla klasik PID ya da model tabanlı yöntemlere dayanırken, derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme gibi yapay zekâ teknikleri robotun çevresine uyum kabiliyetini artırmaktadır. Bu tür algoritmalar sayesinde robot, belirli görevlerde performans optimizasyonu yapabilir, titreşimleri azaltabilir çevresel değişikliklere gerçek zamanlı uyum sağlayabilir. Özellikle al-yerleştir uygulamalarında yol planlamasının yapay zekâ algoritmaları tarafından optimize edilmesiyle, robotun döngü sürelerinin önemli ölçüde kısaltılması mümkündür (Daoud vd., 2014; Angel ve Viola, 2018; Dos Santos Lima vd., 2024). Gelecekte delta robotların, yapay zekaya yönelik gelişmelerde devam ettikçe deneyim biriktiren, kendi hareket stratejilerini iyileştiren, otonom sistemlere dönüşmesi mümkün olabilir.

Delta robotlar ile ilgili bir diğer önemli gelişme alanı ise enerji optimizasyonudur. Yüksek hızda çalışan delta robotların enerji tüketimi, özellikle büyük üretim sektöründe ciddi bir maliyet unsurudur. Yeni nesil sürücüler, akıllı motor kontrol algoritmaları ve minimum enerji profili elde eden optimizasyon yöntemleri sayesinde robotun gereksiz ivmelenme veya ani yavaş-

lamalarının azaltılması mümkün hâle gelmektedir. Ayrıca yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri, robotun görev akışını analiz ederek daha düşük güç tüketen hareket profilleri oluşturabilir (Carabin, 2021; Vodovozov vd., 2024; Portillo-Vélez vd., 2022). Gelecekte, enerji tasarrufu sağlayan hafif malzemelerin, düşük sürtünmeli bağlantı mafsallarının tasarımlarının geliştirilmesi de delta robotlar için sürdürülebilirliği artıracakı düşünülmektedir.

Delta robotların geleceğinde gelişen görsel algılama sistemlerinin de önemli bir rol üstleneceği ortadadır. Kamera tabanlı algılama, derin öğrenme destekli nesne tanıma ve 3D görüş teknolojileri sayesinde robotlar artık yalnızca belirli pozisyonlara değil, dinamik olarak değişen çevrelere de uyum sağlayabilme yeteneği geliştirebilmektedirler. Örneğin, konveyör bant üzerinde rastgele konumlanmış nesnelerin gerçek zamanlı tespiti ve yakalanması, yaban zekâ tabanlı görüntü işleme ile mümkün olmaktadır. Bu sayede delta robotlar, ayrıştırma, kalite kontrol ve montaj görevlerini minimum insan müdahalesiyle yerine getirebilir (Kansal ve Mukherjee, 2019; Elsherbiny vd., 2025; Cong, 2023; Lin vd., 2016). Gelecekte çoklu kamera sistemleri ve derinlik sensörlerinin birleşimiyle, ayrıca geliştirilmesiyle delta robotların zorlu üretim ortamlarında performanslarının artırılacağı düşünülmektedir. Şekil 3'te al-yerleştir görevine sahip bir delta robot örneği verilmiştir.



Şekil 3: Al-yerleştir işlemi yapan delta robot örnek görseli (TOSY Paralel Robot, 2010)

Bir diğer önemli husus ise delta robotların işbirlikçi robot (cobot) sistemlerine entegre edilmesidir. Delta robotlarda yeni nesil cobot teknolojileriyle birlikte güvenli etkileşime dayalı çalışma modelleri geliştirilmektedir. Robotlar çevre ile etkileşime girdiğinde, temas kuvvetleri düzgün bir şekilde kontrol edilmelidir, aksi takdirde bu kuvvet robot manipülatörüne veya robotu çalıştıran insana zarar verebilir. Sensör tabanlı çarpışma algılama, kuvvet-gerilim kontrolü ve insan-robot etkileşim protokolleri sayesinde del-

ta robotlar, operatörlerle aynı çalışma alanında güvenle görev yapabilir hâle gelmektedir (Zhu vd., 2022; Sutthi vd., 2023). Bu tür işbirlikçi yapıların, özellikle paketlenme, ayıklama ve esnek üretim hücrelerinde verimliliği artırması beklenmektedir.

Tüm bu gelişmeler değerlendirildiğinde, delta robotların geleceği yalnızca mekanik ve kinematik iyileştirmelerden ibaret değildir; aksine yapay zekâ, algılama, enerji yönetimi ve işbirlikçi robotik gibi geliştirme alanlarının birleşimiyle şekillenmektedir. Bu teknolojik gelişimler sayesinde delta robotların hız, hassasiyet, güvenlik ve uyum kabiliyetlerinin daha da artması; böylece endüstride daha geniş kullanım alanları bulmaları olasıdır.

6. Sonuç

Bu çalışmada delta robotların yapısı, çalışma prensibi, avantajları, sınırları ve endüstrideki kullanım alanları incelenmiştir. Ayrıca delta robotların mevcut teknolojik gelişmelerle gelecekte üstlenebilecekleri roller değerlendirilmiştir. Hafif yapıları, yüksek hız-ivme kabiliyetleri ve hassas konumlandırma yetenekleri sayesinde delta robotlar, pek çok sektörde verimliliği artıran önemli robotik sistemler olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte gelişmiş algılama yöntemleri, yapay zekâ tabanlı kontrol yapıları, enerji verimliliği çalışmaları ve işbirlikçi robotik altyapısına uyum gibi alanlardaki ilerlemelerin, delta robotları daha akıllı, daha güvenli ve çevresel değişimlere daha hızlı uyum sağlayabilen sistemlere dönüştürmesi beklenmektedir. Tüm bu değerlendirmeler, delta robotların hem günümüz endüstrisinde kritik bir konumda olduğunu hem de geleceğin esnek ve otonom üretim hatlarında daha da önemli bir rol üstleneceğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Angel, L., & Viola, J. (2018). Fractional order PID for tracking control of a parallel robotic manipulator type delta. *ISA transactions*, 79, 172-188.
- Ayyıldız, M., & Ayyıldız, E. A. (2020). Lineer Delta Robotun Doğruluk ve Tekrarlanabilirlik Performansı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 869-879.
- Azad, F. A., Rad, S. A., & Arashpour, M. (2022). Back-stepping control of delta parallel robots with smart dynamic model selection for construction applications. *Automation in construction*, 137, 104211.
- Bortoff, S. A., Sanders, H., & Giridhar, D. (2023). Impedance Control of a Delta Robot. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 1023-1029. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1699>)
- Carabin, G., Scalera, L., Wongratanaphisan, T., & Vidoni, R. (2021). An energy-efficient approach for 3D printing with a Linear Delta Robot equipped with optimal springs. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102045.
- Chen, R., & Su, X. (2025). Study on Optimization of Grasping and Releasing Strategy of Delta Robot Based on Midline Selection Algorithm. *International Journal of Decision Support System Technology (IJDSST)*, 17(1), 1-15. (Doi: <https://doi.org/10.4018/IJDSST.373232>)
- Clavel, R. Device for the movement and positioning of an element in space, 1990, US Patent 4,976,582.
- Cong, V. D. (2023). Design and development of a delta robot system to classify objects using image processing. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 13(3).
- Daoud, S., Chehade, H., Yalaoui, F., & Amodeo, L. (2014). Efficient metaheuristics for pick and place robotic systems optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(1), 27-41.
- Dastjerdi, A. H., Sheikhi, M. M., & Masouleh, M. T. (2020). A complete analytical solution for the dimensional synthesis of 3-DOF delta parallel robot for a prescribed workspace. *Mechanism and Machine Theory*, 153, 103991. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103991>)
- dos Santos Lima, M., Kich, V. A., Steinmetz, R., & Tello Gamarra, D. F. (2024). Delta robot control by learning systems: Harnessing the power of deep reinforcement learning algorithms. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 46(2), 4881-4894.
- El Gezery, M., Abdelaal, M., Osama, M., & Ellassal, A. (2025). Hybrid control strategy using iterative learning and state-dependent Riccati equation for enhanced precision in parallel delta robots. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100915. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pri-me.2025.100915>)
- Ellassal, A., Abdelaal, M., Osama, M., & Elhnydy, H. (2024). Low-cost parallel delta robot for a pick-and-place application with the support of the vision system.

e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 8, 100518.

- Elsherbiny, O., Gao, J., Ma, M., Qureshi, W. A., & Mosha, A. H. (2025). Developing an IoT-driven delta robot to stimulate the growth of mulberry branch cuttings cultivated aeroponically using machine vision technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, 110111. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110111>)
- Gnad, D., Gattringer, H., Müller, A., Höbarth, W., Riepl, R., & Meßner, L. (2024). Identification of physically consistent dynamics parameter of the ABB IRB 360-6/1600 delta robot and its use for time-optimal motion planning under consideration of constraint forces. *Robotics and Autonomous Systems*, 182, 104823. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104823>)
- Haophuong21, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robot-cong-nghiep-the-he-moi.jpg> , erişim: 16.11.2025)
- Huang, J., Yi, F., Cui, Y., Wang, X., Jin, C., & Cheein, F. A. (2025). Design and implementation of a seed potato cutting robot using deep learning and delta robotic system with accuracy and speed for automated processing of agricultural products. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237, 110716.
- Hussmann, S., Knoll, F. J., Meissner, A., & Holtorf, T. (2019, May). Development and evaluation of a low-cost delta robot system for weed control applications in organic farming. In *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1-5). IEEE.
- Javier Enríquez, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robot_soldadura_per_punts.png , erişim: 16.11.2025)
- Kaewkorn, S., Joochim, C., Keeratiwintakorn, P., & Kunapinun, A. (2019, September). Development of pick and place delta robot. In *International Conference on Interactive Collaborative Learning* (pp. 475-486). Cham: Springer International Publishing.
- Kansal, S., & Mukherjee, S. (2019). Automatic single-view monocular camera calibration-based object manipulation using novel dexterous multi-fingered delta robot. *Neural Computing and Applications*, 31(7), 2661-2678.
- Kushwaha, P., Kumar, J., Ajit, D., Chauhan, A., Jain, N., & Verma, A. (2024). Design and fabrication of industrial pick and place delta robot. In *Unraveling New Frontiers and Advances in Bioinformatics* (pp. 409-423). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Laribi, M. A., Romdhane, L., & Zeghloul, S. (2007). Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace. *Mechanism and machine theory*, 42(7), 859-870.
- Lin, C. J., Shaw, J., Tsou, P. C., & Liu, C. C. (2016, March). Vision servo based Delta robot to pick-and-place moving parts. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1626-1631). IEEE.
- Moharana, B., Gupta, R., & Kushwaha, B. K. (2014). Optimization and design of a la-

ser-cutting machine using delta robot. arXiv preprint arXiv:1404.6029.

- Mojtahedi, M. M., Mohammadi, A., & Masouleh, M. T. (2024, May). Experimental study on autonomous food packaging with delta parallel robot and two fingered gripper. In 2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 1-6). IEEE.
- Öztürk, S., & Kuncan, F. (2022). Linear delta robot controlled with PLC based on image processing. *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 5(2), 150-158.
- Öztürk, V. (2019). Doğrusal motor sistemi üzerine 6 serbestlik derecesine sahip platform tasarımının yapılarak uygulanması ve yazılımın eniyileştirilmesi.
- Pham, P. C., & Kuo, Y. L. (2023). Model-based and model-free collision detection and identification for a parallel Delta robot with uncertainties. *Control Engineering Practice*, 139, 105663. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105663>)
- Portillo-Vélez, R. D. J., Burgos-Castro, I. A., Vásquez-Santacruz, J. A., & Marín-Urías, L. F. (2022). Integrated conceptual mechatronic design of a delta robot. *Machines*, 10(3), 186.
- Shen, H., Meng, Q., Li, J., Deng, J., & Wu, G. (2021). Kinematic sensitivity, parameter identification and calibration of a non-fully symmetric parallel Delta robot. *Mechanism and Machine Theory*, 161, 104311. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104311>)
- Šljapah, S., Munić, M., & Mihelj, M. (2023). Mobile robot system for selective asparagus harvesting. *Agronomy*, 13(7), 1766.
- Sutthi, S., Phaiyakarn, A., Prueksakunnatam, S., Khuankrue, I., & Janya-Anurak, C. (2023, September). Designing of Delta Manipulator as Human-Robot Interaction for Collaborative Mobile Robot. In 2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE) (pp. 204-209). IEEE.
- Tamizi, M. G., Kashani, A. A. A., Azad, F. A., Kalhor, A., & Masouleh, M. T. (2022). Experimental study on a novel simultaneous control and identification of a 3-dof delta robot using model reference adaptive control. *European journal of control*, 67, 100715. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2022.100715>)
- TOSY Parallel Robot. (2010). Fotoğraf: Humanrobo. (Creative Commons BY-SA 3.0). Wikimedia Commons.
- Trungdoanhong , Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delta_x_robot_-_vision_module_-_conveyor.jpg , erişim:16.11.2025)
- Vodovozov, V., Lehtla, M., Raud, Z., Semjonova, N., & Petlenkov, E. (2024). Managing Energy Consumption of Linear Delta Robots Using Neural Network Models. *Energies*, 17(16), 4081.
- Wang, H., Liu, H., Zhang, D., Zhang, Z., Yue, Y., & Chen, J. (2025). Obstacle Avoidance Path Planning for Delta Robots Based on Digital Twin and Deep Reinforcement Learning. *Computers, Materials & Continua*, 83(2). (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cmc.2025.101010>)

org/10.32604/cmc.2025.060384)

Wang, Z., Chen, J., San, H., Gong, M., Zhang, X., & Chen, W. (2025). Kinematic calibration of delta robots via model-free PSO-RBF prediction and compensation. *Measurement*, 118828. (Doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118828>)

Zhu, M., Huang, C., Qiu, Z., Zheng, W., & Gong, D. (2022). Parallel image-based visual servoing/force control of a collaborative delta robot. *Frontiers in Neurorobotics*, 16, 922704.



**VERİ ODAKLI ENERJİ YÖNETİMİ: GÜÇ
SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA ENTEGRASYONU VE
UYGULAMALARI**

“ ”

Cihan AYHanci¹

¹ Öğr. Gör.; Harran Üniversitesi Şanlıurfa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü. ayhanci@harran.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5749-0352

1. GİRİŞ

Bir güç sistemi, elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımı ve kullanımı süreçlerini kolaylaştıran elektrikli bileşenlerden oluşan karmaşık bir ağıdır [1-3]. Temel amacı, sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini korurken, tüketicilere makul maliyetlerle yüksek kaliteli elektrik sağlamaktır [1]. Elektrik, merkezi büyük güç santrallerinde veya rüzgar, güneş, biyokütle ve hidroelektrik gibi dağıtık enerji kaynakları (DER) kullanılarak üretilir [4-6]. Geleneksel sistemlerde üretim, jeneratörlerin dönen kütlelerinden gelen bir “atalet” (inertia) ile frekansı dengelerken; modern sistemlerde yenilenebilir kaynakların bazıları (fotovoltaik sistemler) sisteme eviriciler (inverters) aracılığıyla bağlanmaktadır. Üretilen elektrik, kayıpları minimize etmek için yüksek gerilim seviyelerinde iletim hatları üzerinden uzun mesafelere taşınmaktadır. Ardından, transformatörler aracılığıyla voltaj düşürülerek evler, iş yerleri ve sanayi gibi son kullanıcıların ihtiyaç duyduğu güvenli seviyelerde dağıtılır [3, 4, 6]. Bir güç sisteminin en kritik işlevi, arz ve talebin anlık olarak dengelenmesidir [2, 4, 6]. Güç sistemleri, gerilim ve frekansın belirlenmiş limitler dahilinde kalmasını sağlamak zorundadır; aksi takdirde sistem çökmeleri veya ekipman hasarları yaşanabilir [1, 4, 6, 7]. Enerji Yönetim Sistemleri (EMS), büyük veriyi (big data) ve kontrol algoritmalarını kullanarak yük dağıtımını, hata tespitini ve kaynak planlamasını yönetir [1]. Günümüzde güç sistemleri, sadece tek yönlü bir akıştan, hem enerjinin hem de bilginin çift yönlü aktığı “Akıllı Şebekeler” ve “Enerji İnterneti” (EI) vizyonuna evrilmektedir [2]. Bu yeni yapıda, tüketiciler aynı zamanda üretici (prosumer) haline gelir ve yapay zeka (AI) sistemleri, belirsizlikleri yöneterek kendi kendini iyileştiren (self-healing) yapılar oluşturur [2, 5].

Güç sistemlerinin yapay zeka (AI) ile geçirdiği evrim, geleneksel matematiksel modelleme ve kural tabanlı sistemlerden, veri odaklı ve kendi kendine öğrenebilen “Yapay Zeka 2.0” (AI 2.0) dönemine uzanan köklü bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu evrim süreci, sistemlerin sadece karmaşıklığıyla başa çıkmakla kalmamış, aynı zamanda “bilgi otomasyonu” (knowledge automation) seviyesine ulaşmıştır. 1970’lerde AI araştırmaları yazılım mühendisliği yönünde gelişmiş, 1980’lerde ise insan uzmanların bilgisini kurallara döken Uzman Sistemler (Expert Systems) popülerlik kazanmıştır [8, 9]. Ancak bu sistemler, yeni ve plansız durumlara uyum sağlayamamaları ve bakım maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle sınırlı kalmıştır [1, 10]. 1990’larla birlikte, güç sistemlerindeki darboğazları aşmak için Makine Öğrenmesi (ML) aşamasına geçilmiştir [9]. Bu dönemde yapay sinir ağları (ANN) ve destek vektör makineleri (SVM) gibi algoritmalar; yük tahmini, arıza tespiti ve enerji yönetimi alanlarında geleneksel sayısal yöntemlerin (PID, AGC) yerini almaya başlamıştır [1]. Yapay zeka bu aşamada, sistem modelinin tam olarak bilinemediği durumlarda “kara kutu” modelleriyle çözüm üretme yeteneği kazanmıştır [2, 8]. Derin Öğrenme’nin (DL) ve büyük verinin (Big Data) yükselişiyle güç sis-

temleri “Yapay Zeka (AI) 2.0” çağına girmiştir [9]. Geleneksel merkezi kontrol sistemleri, yerini Enerji İnterneti (EI) vizyonu ile uyumlu, yapay zeka tabanlı dağıtık kontrol mimarilerine bırakmıştır [2]. Geleneksel sistemlerin her görevi sıfırdan öğrenme zorunluluğu, Transfer Öğrenme (TL) ile “birikimli öğrenme” modeline evrilmiştir. Güç sistemlerinin evrimindeki son aşama, gerçek dünya ile dijital ikizlerin etkileşime girdiği Paralel Öğrenme (PL) çerçeveleridir. Bu sistemler, gerçek dünyada denenmesi riskli senaryoları sanal evrenlerde simüle ederek sisteme “kendi kendine rehberlik” etme yeteneği kazandırmaktadır [9].

Veri odaklı enerji yönetimi, geleneksel fiziksel modelleme yöntemlerinin modern güç sistemlerinin (özellikle Akıllı Şebekeler ve Enerji İnterneti) artan karmaşıklığı, belirsizliği ve doğrusal olmayan yapısı karşısında yetersiz kalmasıyla kritik bir ihtiyaç haline gelmiştir [1]. Yapay zeka (AI) ve makine öğrenmesi (ML) entegrasyonu; veri yığınlarını işleyerek sistem güvenilirliğini, esnekliğini ve operasyonel verimliliğini artıran stratejik bir dönüşüm sağlamaktadır [4]. Güç sistemlerine entegre edilen yapay zeka modelleri, veriden öğrenme ve karar verme yeteneklerine göre denetli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme olmak üzere üç ana kategoride ele alınmaktadır. Denetimli Öğrenme (Supervised Learning), etiketlenmiş verilerle eğitilen bu modeller (ANN, SVM, Karar Ağaçları), özellikle arıza tespiti ve yük tahmini gibi sınıflandırma ve regresyon görevlerinde yaygındır [8, 11, 12]. Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning), verideki gizli desenleri bulmaya odaklanır (kümeleme, PCA); anomalilerin tespiti ve büyük verilerin boyutunun azaltılması için kullanılır [8, 11]. Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning - RL), bir ajanın çevreyle etkileşime girerek ödül mekanizmasıyla en iyi eylemi öğrenmesidir. Dinamik stabilite kontrolü, enerji ticareti ve mikro-şebeke yönetimi gibi gerçek zamanlı karar süreçlerinde model gerektirmeyen (model-free) yapısıyla öne çıkmaktadır [1]. Veri odaklı enerji yönetim sistemlerinin uygulamaları enerji yaşam döngüsünün her alanına yayılmıştır. Tahminleme (Forecasting); makine öğrenmesi algoritmaları (özellikle LSTM ve BiLSTM), güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve yük talebi gibi değişkenleri geçmiş verilere dayanarak yüksek doğrulukla tahmin etmektedir [1]. Sistem Kararlılığı ve Kontrolü; yapay zeka (AI) tabanlı denetleyiciler, invertersiz yenilenebilir kaynakların eksik olduğu atalet ve sönümlenme özelliklerini sanal olarak sağlayarak voltaj ve frekans regülasyonunu gerçekleştirir [1, 4]. Kestirimci Bakım ve Güvenilir Yönetim; güç elektroniği bileşenlerinin (IGBT’ler, kapasitörler) kalan faydalı ömürleri ve arıza durumları, veri madenciliği ve derin öğrenme ile anlık olarak izlenerek duruş süreleri minimize edilir [4]. Enerji İnterneti ve Mikroşebekeler; çoklu enerji taşıyıcılarının (elektrik, gaz, ısı) ve elektrikli araçların (EV) şebekeye akıllı entegrasyonu, dağıtık kontrol mimarileri ve optimizasyon algoritmalarıyla yönetilmektedir [2]. Veri odaklı enerji yönetimi, pasif güç sistemlerini, kendi kendini iyileştirebilen, öğrenen

ve optimize edebilen aktif organizmalara dönüştürmektedir [5].

2. YAPAY ZEKA VE MAKİNE ÖĞRENMESİ

Yapay Zeka (AI) ve onun en önemli alt dalı olan Makine Öğrenmesi (ML), özellikle elektrik mühendisliği, enerji sistemleri ve güç elektroniği alanlarında devrimsel bir dönüşüm yaratmaktadır [1, 11-13]. Genel bir tanımla yapay zeka, makinelerin ve yazılımların insan benzeri bilişsel süreçleri (muhakeme, deneyimden öğrenme, genelleme yapma) simüle etme yeteneğidir; makine öğrenmesi ise bu sistemlerin veri üzerinden açıkça programlanmadan kendi performanslarını geliştirmelerini sağlayan algoritmalar bütünüdür [1, 10, 12, 14, 15].

Yapay zeka tarihsel olarak üç ana aşamadan geçmiştir: Mantıksal muhakemeye odaklanan ilk dönem (1950-60'lar), uzman sistemlerin yükseldiği ikinci dönem (1970-80'ler) ve veri odaklı makine öğrenmesinin hakim olduğu günümüzün üçüncü dönemi. Günümüzde ise Yapay Zeka (AI) 2.0 (Yeni Nesil Yapay Zeka) kavramı öne çıkmaktadır. Yapay Zeka (AI) 2.0; büyük veri tabanlı bilgi öğrenimi, insan-bilgisayar hibrit zekası ve otonom akıllı sistemler gibi özellikleri bünyesinde barındırır [9].

Güç sistemleri ve mühendislik uygulamalarında yapay zeka dört temel başlık altında toplanmaktadır [1, 11].

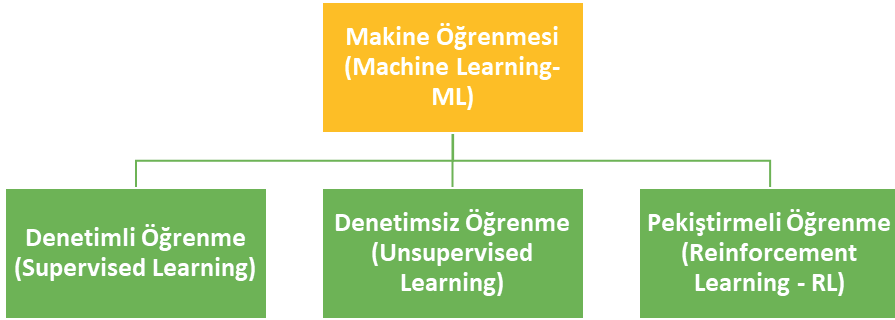
Uzman Sistemler (ES): İnsan uzmanların bilgisini mantıksal kurallara dönüştürerek karar veren, bilgi tabanlı sistemlerdir [1, 11].

Bulanık Mantık (FL): Kesin değerler yerine (0 ile 1 arası derecelerle) belirsiz ve yaklaşık verileri işleyebilen, insan muhakemesine benzer bir mantık çerçevesidir [1, 11, 16].

Evrimsel ve Meta-sezgisel Yöntemler: Doğadaki biyolojik süreçlerden esinlenen (Genetik Algoritmalar, Parçacık Sürü Optimizasyonu vb.), karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan tekniklerdir [1, 11, 17].

Makine Öğrenmesi (ML): Verideki kalıpları tanımak ve tahminler yürütmek için kullanılan matematiksel modellerdir [11, 14].

Makine öğrenmesi, verinin yapısına ve öğrenme biçimine göre şu şekilde sınıflandırılır [9, 11].



Şekil 1 Yapay zeka modellerinin veriden öğrenme ve karar verme yetenekleri [9, 11]

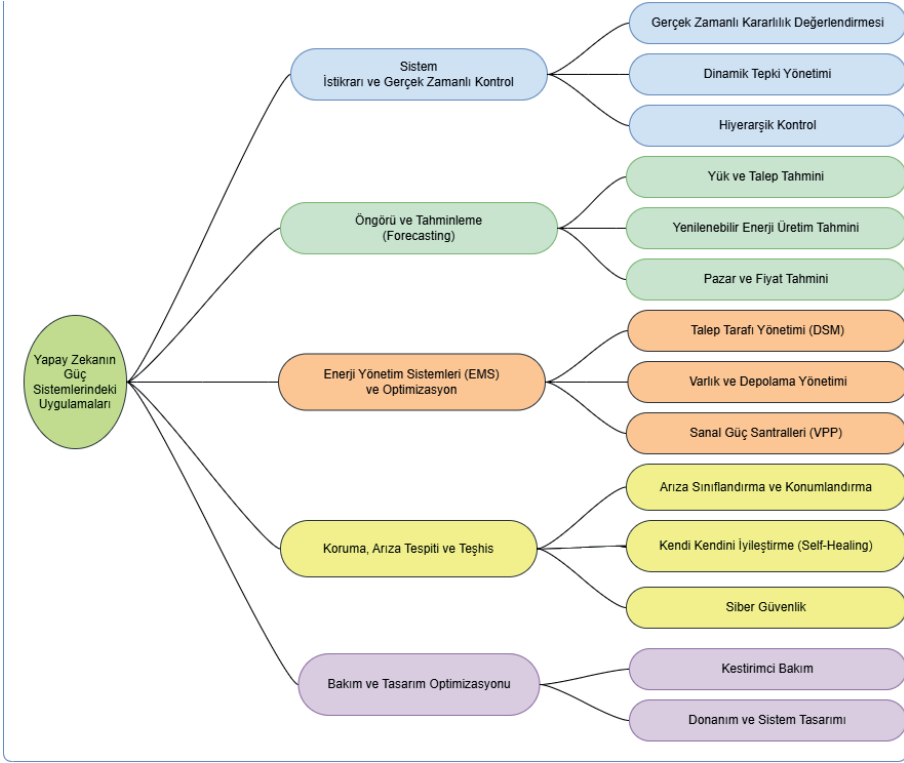
Denetimli Öğrenme (Supervised Learning), etiketlenmiş veri setleri (girdi-çıktı çiftleri) ile eğitilir. Sınıflandırma (arıza teşhisi gibi) ve Regresyon (yük tahmini gibi) görevlerinde kullanılır [4, 8, 11]. Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning), etiketlenmemiş verilerdeki gizli desenleri bulmaya odaklanır. Veri kümeleme (clustering) ve boyut azaltma (PCA gibi) temel işlevleridir [11]. Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning - RL), bir ajanın çevreyle etkileşime girerek ödül mekanizması üzerinden en iyi stratejiyi (deneme-yanılma ile) öğrenmesidir [1]. Derin Öğrenme (Deep Learning - DL) ise kullanılan mimariyle ilgili bir katman olup, çok sayıda gizli katmandan oluşan yapay sinir ağlarını (ANN) kullanarak, veriden yüksek seviyeli soyut özellikler çıkaran ileri bir yöntemdir [14].

Yapay zeka ve makine öğrenmesi entegrasyonu, özellikle akıllı şebekeler, enerji interneti (EI) ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yönetiminde kritik roller üstlenir [1, 2]. Tahminleme yapılarak güneş/rüzgar üretimi ve tüketici yük talebinin yüksek doğrulukla öngörülmesi sağlanmaktadır [1, 2, 4]. Kontrol ve Optimizasyon yöntemleri ile gerçek zamanlı gerilim ve frekans regülasyonu ile sistem kararlılığının korunması sağlanmaktadır [4, 5]. Arıza tespiti, izolasyonu ve kestirimci bakım (ekipman sağlığı izleme) ile güç sisteminin bakım ve koruması etkili bir şekilde yönetilmektedir [1, 4, 12]. Şebeke altyapısına yönelik siber saldırıların tespiti ve engellenmesi sağlanarak güç sisteminin siber güvenliğine katkı sunulmaktadır [1, 2, 9]. Bu teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki engeller arasında veri kalitesi ve gizliliği, modellerde yaşanan açıklanabilirlik sorunu, yüksek hesaplama maliyeti ve mevcut eski altyapılarla entegrasyon zorlukları yer almaktadır [1, 4, 11, 12].

3. YAPAY ZEKANIN GÜÇ SİSTEMLERİNDE UYGULAMA ALANLARI

Yapay zeka (AI) ve makine öğrenmesi (ML), geleneksel yöntemlerin karmaşık ve dinamik modern şebekeleri yönetmede yetersiz kalması nedeniyle güç sistemlerinin tasarımından işletmesine kadar geniş bir yelpazede kritik roller üstlenmektedir [1, 4]. Bu uygulama alanları temel olarak şebeke istikra-

rı, enerji yönetimi, arıza analizi ve stratejik planlama ekseninde toplanmaktadır [1, 5]. Yapay zekanın güç sistemlerindeki temel uygulama alanlarından birisi sistem istikrarı ve gerçek zamanlı control için yapılan gerçek zamanlı kararlılık değerlendirmesidir. Yapay sinir ağları (ANN) ve takviyeli öğrenme (RL), güç sistemlerinin gerilim ve frekans kararlılığını milisaniyeler düzeyinde izlemek ve kontrol etmek için kullanılmaktadır [1, 4]. Dinamik tepki yönetimi konusunda geleneksel PID (Oransal,İntegral,Türevsel) kontrolcülerin aksine yapay zeka (AI) tabanlı denetleyiciler, yenilenebilir enerji kaynaklarının neden olduğu belirsizliklere ve ani yük değişimlerine karşı kendi kendini uyarlayabilen (self-adaptive) çözümler sunmaktadır [1]. Mikroşebekelerde gerilimj regülasyonu ve güç paylaşımı gibi görevler, çoklu ajan sistemleri (MAS) aracılığıyla dağıtık bir yapıda optimize edilerek hiyerarşik control sağlanmaktadır [1]. Yapay Zeka (AI), tüketicilerin kullanım alışkanlıklarını öğrenerek tepe yüklerin tıraşlanmasını ve enerji tasarrufu programlarına aktif katılımı teşvik ederek Talep Tarafı Yönetimi (DSM) sağlamaktadır [1]. Enerji depolama sistemlerinin (ESS) şarj ve deşarj döngüleri, pil ömrünü uzatacak ve maliyetleri düşürecek şekilde yapay zeka (AI) algoritmalarıyla (örneğin Parçacık Sürü Optimizasyonu-PSO, Genetik Algoritma-GA) optimize edilerek varlık ve depolama yönetimi yapılmaktadır [1]. Dağıtık enerji kaynaklarının tek bir varlık gibi yönetilmesi ve enerji piyasalarına katılımı için AI tabanlı karar destek sistemleri olarak Sanal Güç Santrallerinde (VVP) kullanılmaktadır [4, 5].

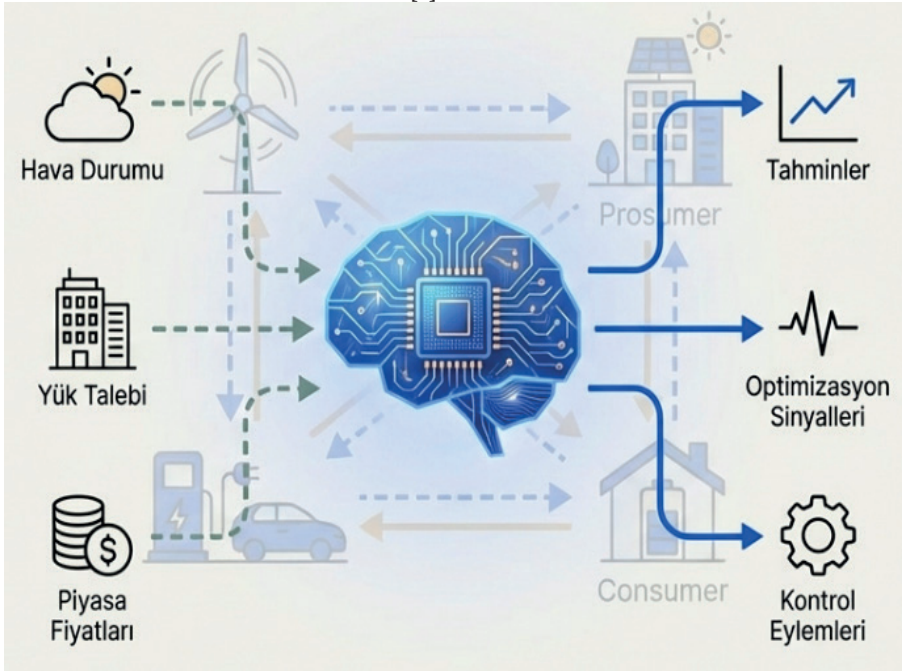


Şekil 2 Yapay Zekanın Güç Sistemlerindeki Uygulamaları

İleri makine öğrenmesi algoritmaları, iletim hatlarındaki arızaları hızla tespit ederek türünü ve tam yerini belirler; bu da restorasyon süresini kısaltmaktadır [1]. Kendi kendini iyileştirme (Self-Healing), arıza durumunda şebeke topolojisinin otomatik olarak yeniden yapılandırılması ve etkilenen bölgenin izole edilmesi yapay zeka (AI) ile gerçekleştirilir [5]. Şebeke altyapısına yönelik veri tahrifatı veya sızma girişimlerini tespit etmek için yapay zeka tabanlı saldırı tespit sistemleri (IDS) devreye alınarak siber güvenlik sağlanmaktadır [1]. Kestirimci bakımda, sensör verilerini analiz eden yapay zeka (AI) modelleri, ekipmanların (trafo, kesici, güç elektroniği bileşenleri) kalan faydalı ömürlerini tahmin ederek arıza oluşmadan müdahale edilmesini sağlamaktadır [11]. Güç elektroniği devrelerinin ve ısı emicilerin tasarımı, genetik algoritmalar ve sürü zekası gibi yöntemlerle en yüksek verimlilik ve en düşük maliyet için optimize edilmektedir [8, 11]. Yapay zeka, güç sistemlerini operatörlerin manuel müdahalesine bağımlı statik yapılardan; otonom karar verebilen, belirsizlikleri yöneten ve siber-fiziksel-sosyal (CPSS) entegrasyona sahip yaşayan bir ekosisteme dönüştürmektedir [1].

Akıllı Şebekeler

Akıllı Şebekeler (Smart Grids); geleneksel elektrik altyapısını ileri bilgi ve iletişim teknolojileri ile birleştiren, çift yönlü hem enerji hem de veri akışına izin veren akıllı ağlar olarak tanımlanmaktadır [1]. Geleneksel şebekelerin aksine akıllı şebekeler, kullanıcıların (üretici-tüketicilerin veya “prosumer”-ların) davranışlarını ve eylemlerini sisteme entegre ederek daha sürdürülebilir, ekonomik ve güvenli bir elektrik arzı sağlamaktadır [5, 10]. Akıllı sensörler ve IoT cihazları aracılığıyla toplanan veriler, güç dağıtımının, gerilim seviyelerinin ve enerji rotalamasının gerçek zamanlı olarak optimize edilmesini sağlar [1]. Fazör Ölçüm Birimleri (PMU), millisaniye hassasiyetinde veri yakalayan bu cihazlar, şebeke dinamiklerinin anlık izlenmesini ve istikrar kontrolünü mümkün kılmaktadır [1].



Şekil 3 Yapay Zeka 2.0: Akıllı Şebekenin Arkasındaki Beyin

Akıllı şebeke, altyapıyı sağlar; ancak onu akıllı yapan şey, yeni nesil Yapay Zeka 2.0 ve makine öğrenmesidir. Yapay Zeka 2.0, büyük veri odaklı, kendi kendine öğrenebilen ve karmaşık sistemleri optimize edebilen bir zeka katmanıdır. Temel işlevi; hava durumu, yük talebi, piyasa fiyatları gibi devasa ve çok boyutlu veri akışlarını analiz ederek şebekeyi gerçek zamanlı olarak tahmin etmek ve kontrol etmektir. Bu reaktif kontrolden proaktif ve öngörüye dayalı yönetime geçişi sağlar. Yapay zeka (AI) algoritmaları, şebeke altyapısından gelen verileri analiz ederek enerji tasarrufu fırsatlarını belirler ve şebeke verimliliğini artırmaktadır [1]. Güneş ve rüzgar gibi kesintili

kaynakların üretim kapasitesini hava durumu verilerine dayanarak tahmin etmek, şebeke istikrarı için kritiktir [5]. Dağıtık enerji kaynaklarının (DER) dinamik kontrolü, şebekenin yenilenebilir enerji barındırma kapasitesini (hosting capacity) artırmaktadır [1, 5]. Yapay zeka (AI) modelleri, enerji depolama sistemlerinin (ESS) şarj ve deşarj döngülerini optimize ederek pil ömrünü uzatır ve maliyetleri düşürmektedir [1, 10]. Elektrikli araçların birer mobil depolama birimi olarak araçtan şebekeye doğru kullanılması (Vehicle-to-Grid) ve şarj süreçlerinin şebeke yüküne göre planlanması, talep yönetimine katkı sağlar [1]. GridSense gibi algoritmalar tüketici davranışlarını öğrenerek ısı pompaları ve ev bataryaları gibi cihazları şebeke performansını maksimize edecek şekilde yönetir [10]. Tüketicilerin elektrik fiyatlarındaki değişimlere göre tüketimlerini kaydırmaları teşvik edilerek tepe yükler (peak loads) tıraşlanır [10]. Akıllı şebekeler, arızaları hızla teşhis ederek etkilenen bölgeleri izole eder ve restorasyon süreçlerini hızlandırır. Sistem, herhangi bir bileşen hatasında otomatik veya yarı otomatik olarak çalışmayı sürdürecektir şekilde yapılandırılmıştır. Yapay zeka (AI) tabanlı saldırı tespit sistemleri, şebeke altyapısına yönelik siber tehditleri (örneğin veri tahrifatı saldırıları) izler ve yanıt verir [1]. Akıllı sensörler, trafolar ve kesiciler gibi kritik varlıkların durumunu analiz ederek potansiyel arızaları gerçekleşmeden tahmin eder. Akıllı şebekeler sadece birer elektrik hattı değil, “Enerjinin İnterneti” (Energy Internet) vizyonu ile uyumlu, dağıtık zekaya sahip karmaşık ekosistemlerdir [5]. Bu sistemlerde yapay zeka (AI), devasa veri yığınlarını işleyerek şebekeyi daha esnek ve dayanıklı hale getiren bir karar verici rolü üstlenmektedir [1].

Enerji İnterneti

Enerji İnterneti (EI) veya diğer adıyla Enerjinin İnterneti, geleneksel enerji altyapısını ileri bilgi ve iletişim teknolojileriyle harmanlayan, yenilenebilir enerjiye dayalı, dağıtık ve açık bir paylaşım ağıdır [2, 9]. Enerji İnterneti (EI), akıllı enerjinin taşıyıcısı olarak görülürken, Akıllı Şebekeler (SG) bu yapının temel taşını oluşturmaktadır [9]. Bilgi internetindeki yönlendiricilere (router) benzer şekilde, enerji interneti (EI) mimarisinde de üretim, depolama ve yükler arasında enerji ve bilgi alışverişini sağlayan enerji yönlendiricileri bulunur [2]. Akıllı şebekelerin aksine enerji interneti (EI), sadece elektrik sistemini değil; doğal gaz, ısıtma, soğutma ve ulaşım sistemlerini de fiziksel varlığına dahil eder [2].



Şekil 4 Enerjinin İnterneti

Enerji interneti (EI), farklı enerji formları arasındaki dönüşümü (örneğin elektrikten gaz üretimi veya atık ısı geri kazanımı) gerçekleştirerek sistem verimliliğini artırmayı hedeflemektedir [2]. Bu bağlamda, rüzgar, güneş, nükleer ve biyoenerji gibi düşük karbonlu kaynakların kullanıcılarla koordineli bir şekilde planlanması ve yönetilmesi temel bir uygulama alanıdır [2, 9]. Enerji interneti (EI), enerjinin ve bilginin her iki yönde de aktığı bir ekosistem sunmaktadır. [2, 5]. Bu yapıda kullanıcılar sadece enerji tüketmekle kalmaz, aynı zamanda enerji üreticisi konumuna geçerler [2, 9]. Bu durum, eşler arası (P2P) enerji ticareti ve değer katan hizmetlerin gelişmesini sağlamaktadır [9]. Makine öğrenmesi ve oyun teorisi gibi AI yöntemleri, bu karmaşık pazar yapısında kullanıcıların teklif stratejilerini optimize etmek ve arz-talep dengesini kurmak için kullanılmaktadır [9]. Enerji interneti (EI) mimarisi, akıllı evlerin ve binaların enerji yönetimini derinlemesine kontrol ederek kullanıcı konforunu ve enerji tasarrufunu aynı anda sağlamaktadır [9]. Ulaşım sektörünün dekarbonizasyonu için kritik olan elektrikli araçların (EV) şebekeye entegrasyonu, enerji internetinin (EI) en dinamik alanlarından biridir [2, 4]. Yapay zeka (AI) tabanlı denetleyiciler, elektrikli araç (EV) şarj süreçlerini şebeke yüküne göre planlayarak tepe yükleri tıraşlar ve sistem istikrarını

korumaktadır [4, 9]. Dağıtık enerji kaynaklarının (DER) büyük ölçekli katılımı, enerji interneti (EI) sistemini karmaşık, doğrusal olmayan ve belirsiz bir yapıya dönüştürür [2]. Bu zorlukları aşmak için geleneksel merkezi yöntemler yerine; servis odaklı mimariler (SoA), çoklu ajan sistemleri ve pekiştirmeli öğrenme (RL) gibi dağıtık kontrol teknolojileri kullanılmaktadır [2]. Ayrıca, enerji internetinin (EI) siber-fiziksel-sosyal (CPSS) yapısı, ağ güvenliği ve saldırı tespiti uygulamalarını zorunlu kılmaktadır [9]. Enerji interneti (EI), üretimden tüketime kadar her aşamada devasa boyutlarda (petabayt seviyelerinde) veri üretmektedir [9]. Bu büyük verinin analizi; arıza teşhisi, yük tahmini ve varlık yönetimi gibi alanlarda operasyonel riskleri minimize etmektedir [4, 9]. Yapay zeka (AI) 2.0, özellikle derin pekiştirmeli öğrenme ve paralel öğrenme gibi yöntemlerle, Enerji internetinin (EI) daha zeki, güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Enerji İnterneti, enerjiyi bir mal olarak gören, geniş alan koordinasyonuna dayalı ve çok sayıda katılımcının yer aldığı devasa bir kompleks sistemdir [2, 9].

4. SONUÇ

Bu çalışmada, modern güç sistemlerinin dijital dönüşüm sürecinde veri odaklı enerji yönetiminin ve yapay zeka entegrasyonunun oynadığı kritik rol kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye artan katılımı ve sistemlerin daha merkeziyetsiz bir yapıya evrilmesi, geleneksel kontrol ve yönetim mekanizmalarının sınırlarını zorlamaktadır. Yapılan incelemeler, bu karmaşıklığın yönetilmesinde yapay zeka ve makine öğrenmesi teknolojilerinin bir seçenektan öte, teknik bir zorunluluk haline geldiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında ele alınan Akıllı Şebekeler ve Enerji İnterneti (EI) uygulamaları, yapay zekanın sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmadığını, aynı zamanda şebeke esnekliğini ve güvenilirliğini de en üst düzeye çıkardığını göstermiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları; yük tahmini, arıza tespiti ve enerji akışı optimizasyonu gibi alanlarda yüksek doğruluk oranları sunarak sistem operatörlerine gerçek zamanlı karar destek mekanizmaları sağlamaktadır. Özellikle Enerji İnterneti kavramı çerçevesinde, farklı enerji katmanlarının birbiriyle entegre şekilde yönetilmesi, veri odaklı yaklaşımların sunduğu analitik yetenekler sayesinde mümkün olmaktadır.

Ancak, yapay zekanın güç sistemlerine tam entegrasyonu yolunda aşılması gereken önemli zorluklar bulunmaktadır. Veri kalitesi ve standardizasyonu, modellerin açıklanabilirliği, siber güvenlik riskleri ve büyük ölçekli sistemlerdeki hesaplama maliyetleri bu alanın gelecekteki araştırma odaklarını oluşturacaktır. Özellikle siber-fiziksel sistemler olan güç şebekelerinde, yapay zeka modellerinin güvenli ve dayanıklı bir yapıda kurgulanması stratejik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak; veri odaklı enerji yönetimi, sürdürülebilir bir enerji gele-

ceği için temel yapı taşıdır. Yapay zeka teknolojilerindeki gelişim, güç sistemlerini daha “zeki”, “kendi kendini iyileştiren” ve “tüketici odaklı” bir yapıya dönüştürmeye devam edecektir. Gelecekteki çalışmaların, derin pekiştirmeli öğrenme ve federatif öğrenme gibi ileri seviye tekniklerin şebeke yönetimine adaptasyonu üzerine yoğunlaşması, enerji sektöründeki dijital devrimi bir üst seviyeye taşıyacaktır.

5. REFERANSLAR

1. Alhamrouni, I., et al., *A comprehensive review on the role of artificial intelligence in power system stability, control, and protection: Insights and future directions*. Applied Sciences, 2024. **14**(14): p. 6214.
2. Hua, H., et al., *Review of distributed control and optimization in energy internet: From traditional methods to artificial intelligence-based methods*. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2021. **6**(2): p. 63-79.
3. Ayhanci, C., B.Y. Yoldas, and B. Kekezoglu, PressAcademia Procedia, 2017. **5**(1): p. 190-197.
4. Safari, A., M. Daneshvar, and A. Anvari-Moghaddam, *Energy intelligence: A systematic review of artificial intelligence for energy management*. Applied Sciences, 2024. **14**(23): p. 11112.
5. Strasser, T., et al., *A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. **62**(4): p. 2424-2438.
6. Ayhancı, C. and B. Kekezoğlu, *Güç Sisteminin Tam Çökmesi Sonrasında Yeniden Başlatma Özellikli Güç Üretim Santrallerinin Sistem Restorasyonundaki Önemi*. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 2022. **7**(2): p. 99-112.
7. Ayhancı, C., M.E. Deniz, and Ö. Henek. *The Role of Protection Relays in Power Systems and an Overview of Their Operation System: A Sample Experimental Setup Design*. in *5th International Conference on Scientific and Innovative Studies (ICISIS 2025)*. 2025.
8. Behara, R.K. and A.K. Saha, *Artificial intelligence methodologies in smart grid-integrated doubly fed induction generator design optimization and reliability assessment: A review*. Energies, 2022. **15**(19): p. 7164.
9. Cheng, L. and T. Yu, *A new generation of AI: A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems*. International Journal of Energy Research, 2019. **43**(6): p. 1928-1973.
10. Mnkandla, E., *A Theoretical Artificial Intelligence Framework for Electricity Generation Life Cycle*. The Indonesian Journal of Computer Science, 2022. **11**(2).
11. Zhao, S., F. Blaabjerg, and H. Wang, *An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021. **36**(4): p. 4633-4658.
12. Baloch, S.K., et al., *The Impact of Artificial Intelligence on Electrical Engineering: A Review of Current Applications and Future Prospects*. The Asian Bulletin of Big Data Management, 2025. **5**(3): p. 95-121.
13. Akinci, R., E. Akdogan, and M.E. Aktan, *Comparison of machine learning algorithms for recognizing drowsiness in drivers using electroencephalogram (EEG) signals*. 2022.

14. Abdolrasol, M.G., et al., *Artificial neural networks based optimization techniques: A review*. Electronics, 2021. **10**(21): p. 2689.
15. Akıncı, R., E. Akdoğan, and M.E. Aktan, *Comparison of Machine Learning Algorithms for Recognizing Drowsiness in Drivers using Electroencephalogram (EEG) Signals*. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2022. **10**(1): p. 44-51.
16. Talaat, M., et al., *Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources*. Artificial Intelligence Review, 2023. **56**(9): p. 10557-10611.
17. Núñez, I., et al. *Key technologies applied to the optimization of smart grid systems based on the Internet of Things: A Review*. in 2022 V Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software y Salud Electrónica y Móvil (AmI-TIC). 2022. IEEE.



**KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA (PMSM)
ALAN YÖNELİMLİ KONTROL (FOC) İÇİN UZAY VEKTÖR
MODÜLASYONU (SVM) ENTEGRASYONU**

“ ”

*M. Murat TEZCAN¹
Ömer Furkan YANIK²*

1 ORCID ID: 0000-0002-5390-4527, murat.tezcan@dpu.edu.tr Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü. (Ph.D)

2 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü. ORCID ID: 0000-0001-6081-9462, omer.yanik@ogr.dpu.edu.tr (Bs.C.)

1. GİRİŞ

Sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), yüksek verimlilik, kompakt yapı ve hassas tork kontrolü gibi avantajları nedeniyle modern elektrik tahrik sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçlar ve endüstriyel otomasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan PMSM'ler, enerji verimliliği ve performans optimizasyonu açısından öne çıkmaktadır [1]. Bu motorların dinamik davranışları, manyetik akı ve elektromanyetik tork bileşenlerinin etkin biçimde kontrol edilmesiyle doğrudan ilişkilidir; bu durum ise gelişmiş kontrol algoritmalarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır [4].

Alan Yönelimli Kontrol (FOC – Field Oriented Control), PMSM'lerin vektör tabanlı kontrolünde en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmekte olup, stator akımlarının d-q eksenlerinde ayrıştırılması sayesinde tork ve akı bileşenlerinin bağımsız olarak kontrol edilmesini mümkün kılar [9]. İlk olarak Blaschke tarafından AC motorlar için önerilen bu yöntem, PMSM uygulamalarında yüksek dinamik performans ve geniş hız aralığında etkin kontrol sağlaması nedeniyle yaygınlaşmıştır [3], [13].

FOC'un temelini Clarke ve Park dönüşümleri oluşturmaktadır; bu dönüşümler sayesinde üç fazlı akım ve gerilim büyüklükleri iki eksenli referans sistemlerine dönüştürülerek kontrol problemi sadeleştirilir [7]. d-q referans çerçevesinde tork, doğrudan q-ekseni akımı ile ilişkilendirilirken, d-ekseni akımı manyetik akının kontrolünü sağlar. Bu yapı, düşük hızlarda dahi yüksek tork üretimini mümkün kılar ve sensörsüz kontrol uygulamalarında kestirim tabanlı algoritmalarla birleştirilerek donanımsal karmaşıklığı azaltır [12], [17]. Ayrıca FOC, motor akımlarının etkin yönetimi sayesinde termal stresleri azaltarak uzun süreli çalışmalarda sistem güvenilirliğini artırır ve değişken yük koşullarında yüksek verimlilik sunar [4].

FOC'un pratik uygulanabilirliğini artıran temel tamamlayıcı yöntemlerden biri Uzak Vektör Modülasyonu (SVM – Space Vector Modulation) olup, inverter anahtarlama durumlarının optimize edilmesiyle

düşük harmonikli gerilim vektörleri üretilmesini sağlar [6]. FOC ile birlikte kullanıldığında SVM, tork dalgalanmalarını azaltır ve inverter-motor sisteminin genel verimliliğini artırır. Bu entegrasyon, modern motor sürücü sistemlerinde standart hâle gelmiş olup, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda belirgin avantajlar sunmaktadır [8], [10], [14].

SVM tekniği, üç fazlı inverterin sekiz olası anahtarlama durumuna dayanmaktadır; bunlar aktif ve sıfır vektörler olarak sınıflandırılır ve referans gerilim vektörü, bu vektörlerin zaman ağırlıklı kombinasyonu ile sentezlenir. Bu yaklaşım, klasik sinüzoidal PWM yöntemlerine kıyasla daha yüksek DC bara gerilim kullanım oranı sağlar. PMSM sürücülerinde SVM'in over-modülasyon bölgelerinde dahi kararlı çalışmayı desteklemesi, yüksek hız uygulamaları açısından önemli bir avantajdır [13], [15]. Ayrıca harmonik içeriğin azalması, elektromanyetik girişimlerin ve akustik gürültünün düşürülmesine katkı sağlamaktadır [14].

Bu bölümde, PMSM'lere yönelik FOC algoritmasının teorik temelleri ve SVM ile entegrasyonu matematiksel modeller üzerinden ele alınmaktadır. PMSM'nin d-q eksenindeki modeli; stator gerilimleri, akımları, endüktansları ve kalıcı mıknatıs akısı gibi parametreler cinsinden ifade edilmekte olup, elektromanyetik tork bu büyüklüklerin etkileşimiyle tanımlanmaktadır.

FOC yaklaşımıyla uygun akım bileşenleri kontrol edilerek maksimum tork/akım oranı elde edilebilmektedir. Bu modelin SVM ile birlikte kullanılması, kestirimli akım kontrolü gibi gelişmiş yöntemlerin uygulanmasına olanak tanır; örneğin sonlu durumlu kestirimli kontrol yaklaşımları ile akım dalgalanmaları ve harmonikler azaltılabilir [15], [16]. Sensörsüz FOC uygulamalarında ise geri elektromotor kuvveti (back-EMF) tabanlı gözlemciler veya adaptif filtreler yardımıyla rotor konumu tahmin edilmekte, böylece mekanik konum sensörlerine olan ihtiyaç ortadan kaldırılmaktadır [3], [17].

Sonuç olarak, FOC ve SVM'in birlikte kullanımı, PMSM sürücülerinde yüksek dinamik performans, düşük harmonik bozulma ve etkin tork kontrolü

sağlayarak ileri seviye elektrik tahrik sistemlerinin temelini oluşturmaktadır [10], [17].

2. ALAN YÖNELİMLİ KONTROL (FIELD ORIENTED CONTROL) YAPISI VE TEORİK TEMELLERİ

Daha yüksek dinamik performans, kararlı hız kontrolü ve hassas tork üretimi elde edebilmek için, modern elektrik makinelerinin kontrolünde gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Özellikle sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM ,Permanent Magnet Synchronous Motor), yüksek güç yoğunluğu ve verimlilikleri nedeniyle günümüzde endüstriyel otomasyon, elektrikli araçlar ve tahrik sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. PMSM'lerin yapısal özellikleri gereği, tork üretim mekanizmalarının etkin bir şekilde yönetilebilmesi için yalnızca klasik anahtarlamalara veya trapezoidal kontrol algoritmalarına dayalı yöntemler yeterli olmamaktadır.

Mikrodenetleyicilerde ve sayısal sinyal işleyicilerde (DSP) kaydedilen hesaplama gücü artışı sayesinde, AC motorlarının kontrolünde uzun yıllardır kullanılan ileri matematiksel yöntemlerin gerçek zamanlı olarak uygulanması mümkün hâle gelmiştir. Üç fazlı PMSM'nin stator akımları, manyetik akı bileşenleri ve tork üretim mekanizmaları matematiksel dönüşümler aracılığıyla yeni bir koordinat sistemine taşınarak daha kolay ve fiziksel olarak anlamlı bir biçimde kontrol edilebilmektedir. Bu yaklaşım, temelde Clarke ve Park dönüşümlerine dayanmakta olup, motorun üç fazlı zamanla değişen akım bileşenlerinin iki eksenli (d-q) döner bir referans çerçevesine dönüştürülmesini mümkün kılar.

Bu dönüşümler sonucunda elde edilen d eksenli akımı (akı bileşeni) ve q eksenli akımı (tork bileşeni), PMSM'nin elektromanyetik tork üretiminde ayrı roller üstlenir. Böylece akı ve tork üretiminin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi sağlanır; bu durum klasik DC makinelere benzer bir kontrol yapısının senkron motorlarda da uygulanmasına olanak tanır.

Literatürde bu yöntem Alan Yönelimli Kontrol (FOC, Field Oriented Control) olarak adlandırılmaktadır.

FOC'un temel amacı, PMSM'nin manyetik yapısını referans olarak motor akılarının yönlendirilmesi ve stator akımlarının vektörel olarak kontrol edilmesidir. Bu sayede:

- Motor torku doğrusal bir yapıya kavuşur,
- Hız ve konum kontrolünde yüksek hassasiyet elde edilir,
- Ani yük değişimlerine karşı hızlı yanıt sağlanır,
- Enerji verimliliği artırılır,
- Düşük dalgalı tork (ripple minimizasyonu) elde edilir.

Bu yönüyle FOC, PMSM kontrolünde günümüzde endüstri standardı haline gelmiş olup, yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen en gelişmiş yöntemlerden biridir. PMSM'nin matematiksel modelinin döner referans sistemine dönüştürülmesi sayesinde, kontrol algoritmaları doğrusal hâle gelir ve klasik PI denetleyiciler ile akım ve tork kontrolü kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

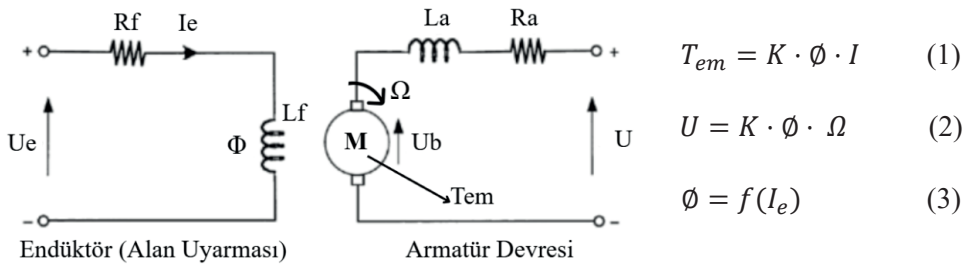
2.1Field Oriented Control'un (Alan Yönelimli Kontrol) Temel Mantığı

FOC (Field Oriented Control) yönteminin mantığını kavrayabilmek için, öncelikle serbest uyarmalı doğru akım (DC) motorlarının çalışma prensiplerine bakmak faydalı olmaktadır. Serbest uyarmalı DC motorlarda tork, armatür akımı ile stator manyetik akısının vektörel çarpımı ile elde edilir.

Bu motor tipinde armatür akımı ve stator akısı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmekte, böylece manyetik akı ve tork üretimi ayrı ayrı

yönetilebilmektedir. Stator manyetik akısı, alan sargılarından geçen uyarım akımının büyüklüğü ile belirlenirken, bu akı sabit tutulduğunda rotor sargılarından geçen akım üretilen tork miktarını doğrudan belirler.

Komütatör, rotor sargılarını stator alanına uygun açılarda devreye alarak maksimum tork elde edilmesini sağlar. Bu mekanizma sayesinde motorun tork üretimi, çalışma süresince her zaman optimuma yakın bir seviyede gerçekleşir. Buradaki temel prensip, rotor sargılarının ürettiği manyetik akının stator alanına dik olacak şekilde yönetilmesidir.



Şekil 1. Serbest Uyarmalı DC Motor Eşdeğer Devresi

- Ayırık uyarmalı motorlarda üretilen tork, rotorun manyetik akısı (Φ) ile armatür sargısından geçen akımın (I) çarpımıyla doğru orantılıdır (1. formüle göre). Yani akım artırıldığında tork artar, rotor manyetik akısı güçlüyse aynı akımda daha fazla tork (T_{em}) elde edilir. Bu denklem, tork kontrolünde temel referans olarak kullanılır ve FOC algoritmalarında i_q akımıyla ilişkilendirilir.

- Rotor döndükçe armatür sargılarında bir gerilim indüklenir. Bu gerilim, rotor hızına (Ω) ve rotor manyetik akısına (Φ) bağlıdır. Yani motor ne kadar hızlı dönerse, Back-EMF o kadar büyük olur. Bu parametre, sensörsüz FOC uygulamalarında rotor konumunun tahmininin temelidir (2. Formül).

- Manyetik akı, armatür sargılarına uygulanan akım ile doğru orantılıdır. Bu ilişki doğrusal olabileceği gibi bazı durumlarda doygunluk etkisi nedeniyle

nonlineer olabilir. FOC ve akım kontrol algoritmalarında bu ilişki temel alınarak, tork ve hız kontrolü için doğru akı referansı belirlenir (3. Formül).

PMSM tipi makineler, DC motorlarındaki bazı temel özelliklere sahip değildir. PMSM makinelerde, akı (flux) ve tork üreten akımlar mutlaka dik değildir. PMSM makinelerde, rotor uyarımı, kalıcı mıknatıslar aracılığıyla sağlanırken, stator tork üreten akımı taşır. Bu nedenle, akı ve tork üreten akım bileşenleri DC makinelerdeki gibi bağımsız değil, birbirlerine bağımlıdır.

Alan yönelimli kontrol tekniğinin amacı, daimi mıknatıslı senkron makineleri, tıpkı yabancı uyarmalı bir DC motor gibi kontrol edebilmektir; yani akı üreten ve tork üreten akımların ayrı ayrı kontrol edilebilmesini sağlamaktır. Başka bir deyişle, FOC ile PMSM makineler DC motor gibi “izole edilmiş” bir şekilde kontrol edilebilir. FOC, akı ve tork üreten akımları birbirinden ayırarak bağımsız şekilde kontrol edilmesine olanak verir.

Bu akımları birbirinden ayırmak için çeşitli matematiksel dönüşümler uygulanması gerekir ve bunun için yüksek hızda işlem yapabilen mikrodenetleyicilere ihtiyaç duyulur. Mikrodenetleyicilerin sağladığı işlem gücü, bu matematiksel dönüşümlerin çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine imkan tanır. Bu da motoru kontrol eden algoritmanın yüksek hızda çalıştırılabilmesini sağlar ve motorun dinamik performansını artırır.

Ayrıca, FOC ile artık motorun dinamik modeli kullanılarak rotor akı açısı ve rotor hızı gibi pek çok büyüklük hesaplanabilir. Bu sayede bu büyüklüklerin etkisi kontrol sürecine dahil edilmiş olur ve genel kontrol kalitesi önemli ölçüde artar.

$$T_{em} = \bar{B}_{stator} \times \bar{B}_{Rotor} = \bar{I}_{stator} \times \bar{B}_{Rotor} \quad (4)$$

Bu ifade, herhangi bir stator ve rotor manyetik alanı için torkun maksimum olduğunu gösterir; ancak bunun sağlanabilmesi için alanların birbirine dik (orthogonal) olması gerekir. Eğer bu koşulu her zaman sağlayabilirsek ve akıyı doğru şekilde yönlendirebilirsek, Alan Yönelimli

Kontrol (FOC) ile tork dalgalanmalarını azaltabilir ve motorun dinamik çalışmasını iyileştirebiliriz.

Bununla birlikte, bu kontrol yaklaşımının temel kısıtı rotor konumunu bilmektir. Rotor pozisyonu, bir pozisyon sensörü kullanılarak tespit edilebilir; örneğin, Hall Effect ve Manyetik Enkoder sensörleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Düşük maliyetli uygulamalarda veya rotorun doğrudan erişilemediği durumlarda, rotor pozisyon sensörünü kullanmadan tahmin yapmak için farklı rotor pozisyon gözlemleyici (observer) yapıları uygulanabilir.

Üç fazlı bir PMSM makine, senkron DQ referans çerçevesinde bir DC motor gibi temsil edilebilir. Burada D-ekseni rotor manyetik akısı boyunca, Q-ekseni ise D-eksene dik olarak tanımlanır. D-ekseni boyunca akan akıma doğru akım bileşeni (direct component) denir ve bu akım manyetik alanın şiddetini etkiler. Q-ekseni boyunca akan akım ise kuadratur akım (quadrature current) olarak adlandırılır ve D-ekseni manyetik akısıyla etkileşime girerek tork üretir.

Kısaca, bir PMSM motor için amaç, PMSM motoru mikrodenetleyiciye sanki alan uyarmalı bir doğru akım motoruymuş gibi tanıtarak d-ekseni akımını sıfırda tutmak ve q-ekseni akımının büyüklüğünü ayarlayarak istenen torku üretmektir.

2.2PMSM Makineler İçin FOC Yapısı

Alan Yönelimli Kontrol (FOC), motorun stator akımlarını bir vektör olarak kontrol etme yöntemidir. FOC'un temel mantığı, üç fazlı, zaman ve hız bağımlı sistemi, zamanla değişmeyen iki koordinatlı bir sisteme (d ve q eksenleri) dönüştüren matematiksel projeksiyonlar kullanmaktır. Bu dönüşüm, PMSM motorun kontrol açısından bir DC motor gibi davranmasını sağlar.

FOC'ta motor kontrolü için iki referans sabiti giriş olarak gereklidir:

- Tork bileşeni (q eksenine göre hizalı)
- Akı bileşeni (d eksenine göre hizalı)

Alan Yönelimli Kontrol, projeksiyonlara dayandığı için anlık elektriksel büyüklükleri doğrudan işleyebilir. Bu sayede kontrol, hem kararlı durumlarda hem de geçici durumlarda yüksek doğruluk sağlar ve sınırlı genişliğe sahip matematiksel modellerden bağımsız çalışır.

FOC klasik kontrol yapılarının (Trapezoidal vs.) karşılaştığı bazı sorunları şu şekilde çözer:

- Stator akımının tork ve akı bileşenlerinin belirlenen referans değerlerine kolayca ulaşabilmesi
- Doğrudan tork kontrolünün kolay uygulanabilmesi, çünkü d-q referans çerçevesinde tork ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$m \propto \psi_R i_{sq} \quad (5)$$

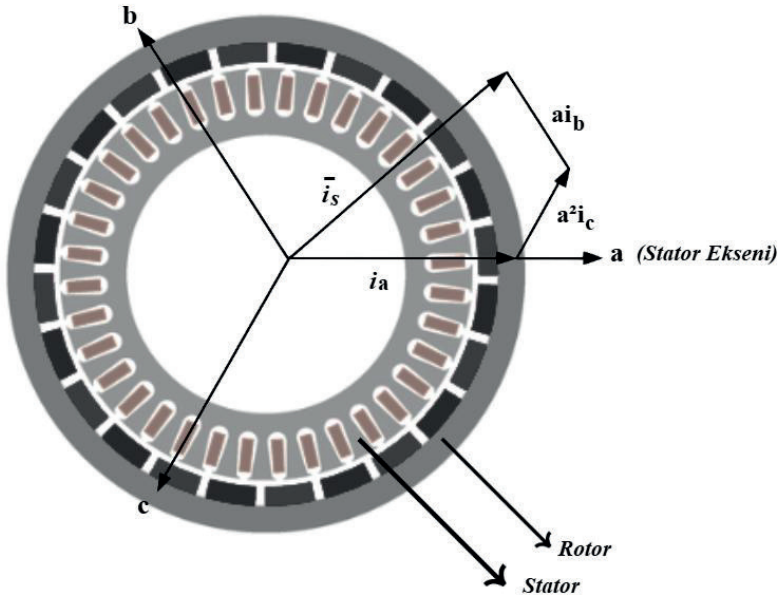
Burada rotor akısının (ψ_R) genliğini sabit tutarak, tork (m) ile stator akım vektörünün tork bileşeni (i_{sq}) arasında doğrusal bir ilişki elde edilir. Böylece tork, stator akım vektörünün tork bileşeni kontrol edilerek kolayca yönetilebilir.

2.3 Stator Akım Vektörü Tanımı ve Projeksiyon

PMSM motorlarının üç fazlı gerilimleri, akımları ve manyetik akıları, ancak karmaşık uzay vektörleri cinsinden analiz edilebilir. Akımlar açısından bakıldığında, uzay vektörü şu şekilde tanımlanabilir:

$$\vec{i}_s = i_a + ai_b + a^2 i_c \quad (6)$$

Burada $a = e^{j\theta}$ yani rotor pozisyonunun teta (θ) cinsinden değerinin uzaysal ortama aktarılmış halidir. Örneğin $a = 120^\circ$ için $a = e^{j(\frac{2\pi}{3})}$, $a^2 = e^{j(\frac{4\pi}{3})}$ yazılabilir.



Şekil 2. Akım Uzak Vektör Bileşenleri ve Eksen Takımı (a,b,c)

Burada a,b ve c üç fazlı sistem eksenlerini temsil etmektedir. Bu stator akım uzak vektörü, üç fazlı sinüzoidal sistemi gösterir. Ancak, kontrol algoritmasında bu bileşenlerin işlenebilmesi için bu vektörün iki koordinatlı ve zamanla değişmeyen bir forma dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşüm iki adımda yapılır:

- (a,b,c) $\Rightarrow$ (α,β) (Clarke dönüşümü): Bu adım, üç fazlı sistemi iki koordinatlı, zamanla değişen bir sisteme çevirir.

• $(\alpha, \beta) \Rightarrow (d, q)$ (Park dönüşümü): Bu adım, α - β düzlemindeki sistemi iki koordinatlı, zamanla değişmeyen bir sisteme dönüştürür

2.4(a,b,c) $\Rightarrow$ (α, β) Clarke Dönüşümü CLARKE İLE İLGİLİ KISA BİLGİ

Clarke dönüşümü, üç fazlı bir elektrik makinesindeki (a-b-c) akım veya gerilim bileşenlerini, fazlar arasındaki bağıntılar kullanarak iki eksenli bir stator referans düzlemine (α - β) aktaran temel bir matematiksel dönüşümdür. Üç fazın tamamında taşınan akım bilgisi kayıpsız bir şekilde iki koordinata indirgenir ve böylece sistem tek bir uzay vektörü ile temsil edilebilir. Bu dönüşüm, motorun manyetik alanını tanımlayan akı/akım vektörünün geometrik olarak sadeleştirilmesini sağlar.

Üç fazlı sistemin (a, b, c eksenleri) uzay vektörü, yalnızca iki dik eksen den oluşan bir referans çerçevesine aktarılabilir; bu eksenler α ve β olarak adlandırılır. Bu dönüşüm, üç fazlı sinüzoidal akımların iki boyutlu bir düzlemde tek bir vektör olarak ifade edilmesini mümkün kılar.

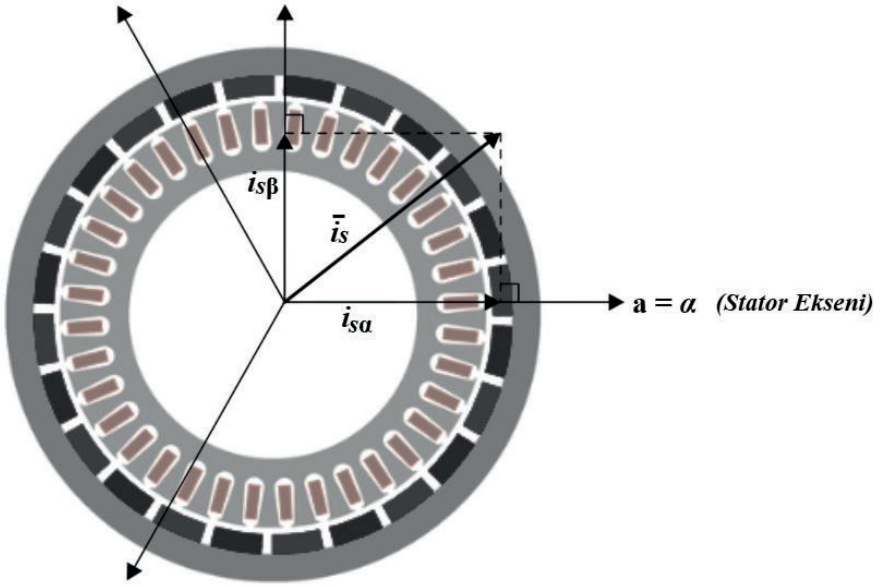
Eğer a fazı eksenini ile α eksenini aynı yönde kabul edilirse:

• α eksenini, faz a'nın yönünü takip eder ve bu eksen boyunca a fazının katkısı alınır.

• β eksenini, α eksenine dik bir eksenidir ve b ve c fazlarının α eksenine dik bileşenlerini temsil eder.

Bu dönüşüm sayesinde:

- Üç fazlı sistemin tüm akım bilgisi iki koordinatlı α - β düzlemine taşınır.
- Sistem hâlâ zamanla değişken (time-variant) bir yapıda olsa da, kontrol için daha basit bir yapı elde edilir.



Şekil 3. Clarke Dönüşümü Bileşenleri ve Eksenleri (α , β)

Üç fazlı sistemi (α, β) iki boyutlu dik eksen sistemine dönüştüren denklem aşağıda verilmiştir.

$$i_{s\alpha} = i_a \quad (7)$$

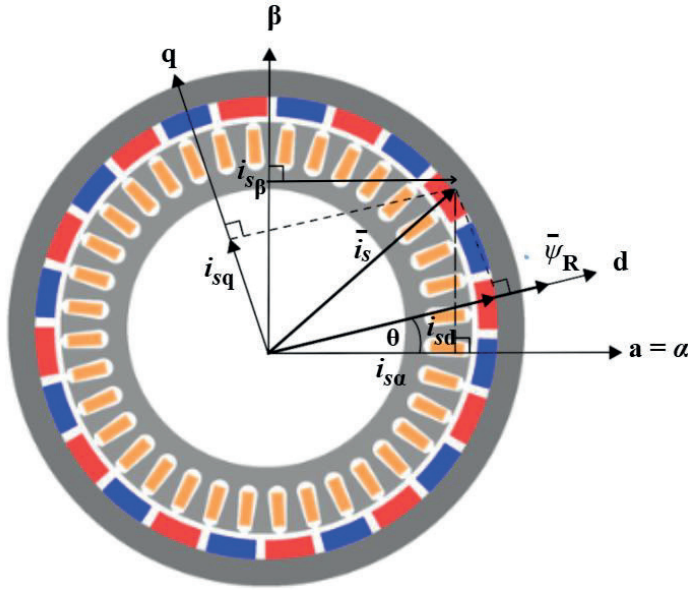
$$i_{s\beta} = \frac{1 \cdot i_a}{\sqrt{3}} + \frac{2 \cdot i_b}{\sqrt{3}}$$

2.5(α, β) $\Rightarrow$ (d,q) Park Dönüşümü

Park dönüşümü, α - β stator referans düzlemindeki iki fazlı bileşenleri, rotorla birlikte dönen d-q senkron referans çerçevesine aktaran temel bir matematiksel dönüşümdür. Bu dönüşüm ile motor akısı ve tork üreten bileşenler sabit değerlere indirgenir; böylece PMSM motorlarda kontrol yapısı, DC motor kontrolüne benzer şekilde büyük ölçüde sadeleşir.

Park dönüşümü, FOC algoritmasının en önemli dönüşümüdür çünkü akı (d eksen) ve tork (q eksen) bileşenlerinin birbirinden ayrılmasını ve bağımsız kontrol edilebilmesini sağlar.

Kısaca, bu dönüşüm iki fazlı dik eksenli (α - β) sistemini, rotorla birlikte dönen d-q referans çerçevesine aktarır. d ekseninin rotor akısı ile hizalı kabul edilmesi durumunda, bir sonraki şekil akım vektörünün bu iki referans çerçevesi arasındaki konum ilişkisini göstermektedir.



Şekil 4. Stator akımının uzay vektörü ve bileşenleri ((α , β) eksenlerinde ve d-q dönen referans çerçevesinde gösterilmektedir)

Yukarıdaki vektör grafiğinde (θ), rotor akısının pozisyonunu göstermektedir. Akım vektörünün akı ve tork bileşenleri aşağıdaki denklemlerle belirlenir:

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta \quad (8)$$

$$i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta \quad (9)$$

Bu bileşenler, akım vektörünün (α, β) bileşenlerine ve rotor akısının pozisyonuna bağlıdır; eğer rotor akısının doğru pozisyonunu bilirsek, bu projeksiyon sayesinde d-q bileşenleri sabit hâle gelir.

Böylece aşağıdaki özelliklere sahip iki koordinatlı (i_{sd}^{sd}) bir sistem elde edilir:

- İki koordinatlı ve zamanla değişmeyen bir sistem
- i_{sd} (akı bileşeni) ve i_{sq} (tork bileşeni) sayesinde doğrudan tork kontrolü mümkün ve kolay hâle gelir

2.6(d,q) $\Rightarrow$ (α, β) Ters Park Dönüşümü

Faz akımları Park – Clarke dönüşümünden geçtikten sonra sıra hesaplanan faz akımlarını elde etmek için gereken faz sargılarına uygulanan voltajdadır. Çünkü inverter yapısı gereği PMSM sargılarına doğrudan bir akım basmak mümkün değildir. Bunun yerine fazlara bir gerilim uygulanır ve bu gerilim faz endüktansı ve rezistansından geçerek i_{sd} ve i_{sq} değerlerini oluşturur. Burada referans faz gerilimleri Ters Park dönüşümüne girer;

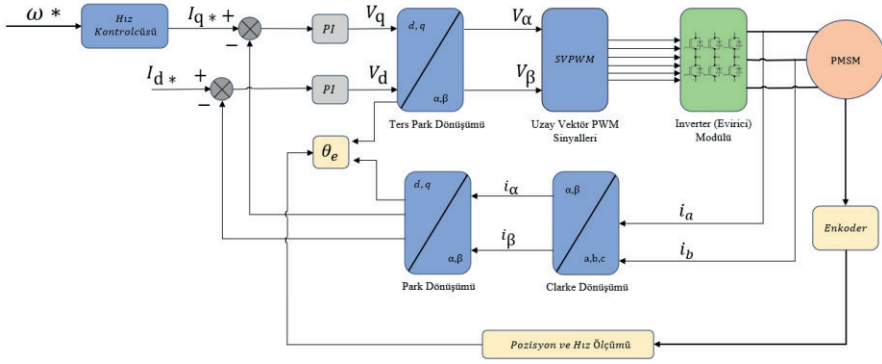
$$v_{s\alpha_{ref}} = v_{sd_{ref}} \cos\theta - v_{sq_{ref}} \sin\theta \quad (10)$$

$$v_{s\beta_{ref}} = v_{sd_{ref}} \sin\theta + v_{sq_{ref}} \cos\theta \quad (11)$$

Bu dönüşümünün çıktısı referans faz voltajı vektörüdür. Bu referans faz voltajı vektörü $\vec{V}_r$ olarak adlandırılır.

2.7 Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC, Field Oriented Control) Blok Yapısı

Yukarıda 2.1 alt başlıkları altında yapılan tüm formülizasyonlar ve işlemler aşağıdaki blok diyagramda daha net gösterilmiştir.



Şekil 5. FOC Kontrol Blok Diyagramı [1]

Field Oriented Control (FOC) yönteminde amaç, motorun üreteceği torku hassas ve hızlı bir şekilde kontrol etmektir. Bu yöntemin temelinde, motorun üç fazlı ve zamana bağlı değişen akım yapısı, Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak iki eksenli (d-q) durağan bir yapıya dönüştürülür. Böylece motor, tıpkı bir doğru akım motoru gibi kontrol edilebilir hâle gelir. d eksenini manyetik akıyı, q eksenini ise tork üretimini temsil eder. Bu eksenlerdeki akımlar bağımsız olarak kontrol edilebilir.

Kontrol döngüsünde önce hız veya tork referansı belirlenir. Hız kontrolcüsü varsa, bu kontrolcü istenen hız ile gerçek hız arasındaki farktan bir tork akımı referansı (i_{sq}^*) üretir. Manyetik akı genellikle sabit tutulduğundan (i_{sd}^*) çoğu uygulamada sıfırdır. i_{sd}^* ve i_{sq}^* referansları, PI akım kontrolörlerine girerek motorun ihtiyaç duyduğu referans voltaj vektörünü ($\bar{V}_r$) üretir. Bu referans voltaj vektörü, motor fazlarına uygulanacak gerilimlerin yönünü ve genliğini tanımlar. Elde edilen $\bar{V}_r$ daha sonra ters Park ve ters Clarke dönüşümlerinden geçirilerek üç fazlı sistemdeki gerilimlere dönüştürülür ve bu gerilimler PWM modülü üzerinden inverttere uygulanır.

Bu yapı sayesinde motorun torku, manyetik akısı ve hız değişimleri çok daha hızlı, kararlı ve doğrusal şekilde kontrol edilebilir.

2.7.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC, Field Oriented Control) Temel Girdileri

Şekil 5'deki blok diyagrama göre FOC için temel gereksinimler şunlardır:

- İki faz akımının bilinmesi (motor yıldız bağlı olduğundan üçüncü faz akımı da bilinir, çünkü $i_a + i_b + i_c = 0$ 'dır.

- Rotor akısı pozisyonunun bilinmesi

2.7.1.1 Akım Örneklemesi

Ölçülen faz akımları i_a ve i_b örneklenir ve bir A/D çevirici ile dijital forma dönüştürülür. FOC'un doğru çalışması, bu akımların gerçek ve doğru bir şekilde ölçülmesine bağlıdır.

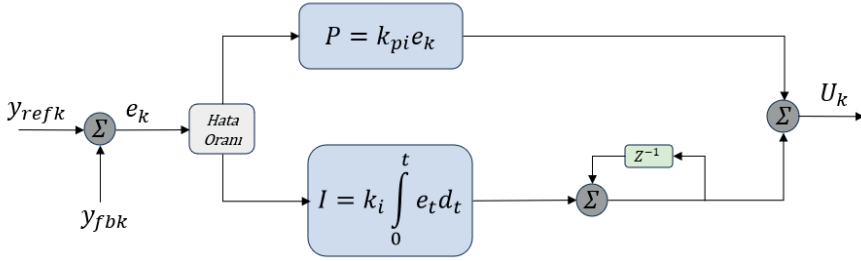
2.7.1.2 Rotor Akısı Pozisyonu

FOC'un temelini oluşturur. Aslında, eğer bu değişkende bir hata varsa, rotor akısı d eksenine hizalanmaz ve i_{sd} ve i_{sq} stator akımının yanlış akı ve tork bileşenleri olur. Aşağıdaki diyagram, (a,b,c), (α,β) ve (d,q) referans çerçevelerini, rotor akısının ψ_r doğru pozisyonunu, stator akımını ve d,q referans çerçevesiyle senkron hızda dönen stator gerilim uzay vektörünü göstermektedir.

- **I terimi (K_i):** kararlı durum hatasını ortadan kaldırır.

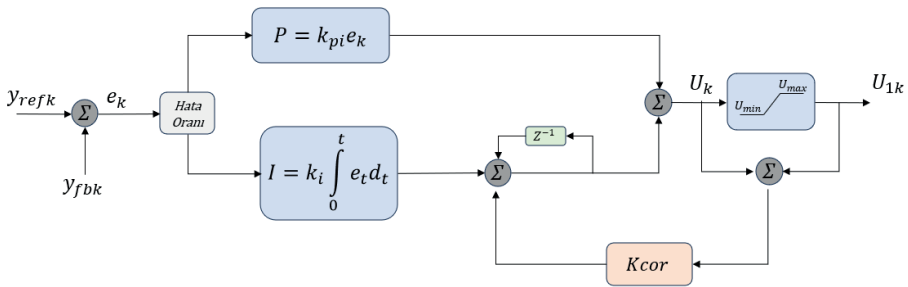
Sayısal PI regülatörün matematiksel ifadesi şöyle verilir:

$$U_k = K_{p_i}e_k + K_i e_k + \sum_{n=0}^{k-1} e_n \quad (13)$$



Şekil 7. Klasik PI Kontrolcü (Sınırsız Çıkış İhtimali) [1]

Normal çalışma sırasında veya testler esnasında sınırlar belirlenmezse, büyük referans değer değişimleri veya büyük bozulmalar meydana gelebilir. Bu durum, regülatör değişkenlerinde ve çıkışında doyma (saturation) ve taşma (overflow) oluşmasına yol açar. Eğer kontrol edilmezse, bu tür doğrusal olmayan davranışlar sistemin dinamik performansını olumsuz etkiler (Şekil7-8)..



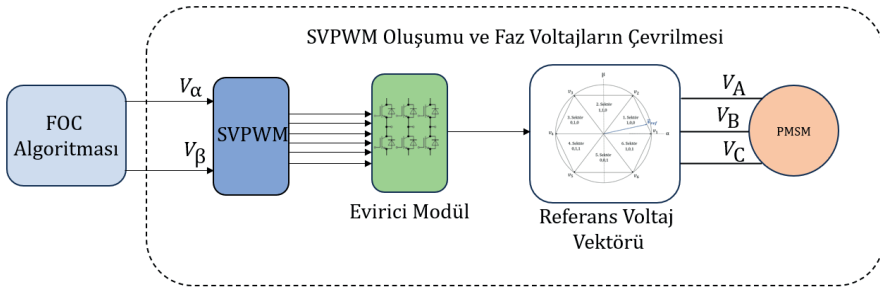
Şekil 8. Klasik PI Kontrolcü ve Basit Algoritması (Sınırlı Çıkış (U_k ve U_{1k}) [1]

3. UZAY VEKTÖR MODÜLASYONU (SPACE VECTOR MODULATION) YAPISI VE TEORİK TEMELLERİ

3.1 Uzak Vektör Modülasyonu Temel Yapısı

Uzak Vektör Modülasyonu (SVM, Space Vector Modulation), üç fazlı inverterlerde kullanılan gelişmiş bir darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniğidir. Bu yöntem, referans gerilim vektörünü inverterin üretebileceği sekiz anahtarlama durumuna (altı aktif vektör ve iki sıfır vektör) dayanarak üreterek, düşük harmonik bozulma ve düzgün akım dalga şekilleri sağlar. SVM, PMSM sürücülerinde FOC ile entegre edildiğinde, tork dalgalanmalarını minimize eder ve sistem verimliliğini artırır.

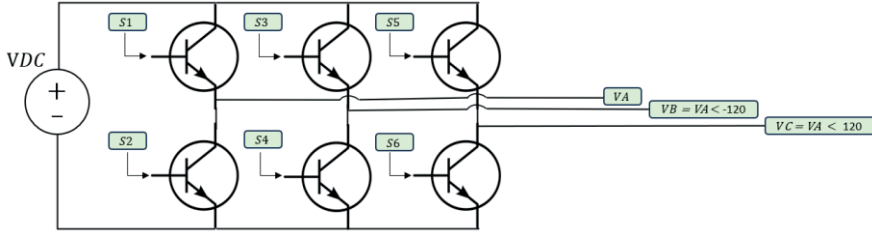
SVM'nin temel yapısı, üç fazlı sistemin alfa-beta (α - β) düzleminde temsiline dayanır. Üç fazlı inverter, her bir bacağına iki anahtar (IGBT veya MOSFET) içeren bir yapıya sahiptir ve bu anahtarların kombinasyonları ile sekiz olası vektör üretir: V_0 (000) ve V_7 (111) sıfır vektörler, V_1 (100), V_2 (110), V_3 (010), V_4 (011), V_5 (001) ve V_6 (101) aktif vektörler. Bu vektörler, α - β düzleminde 60° 'lik altı sektöre ayrılmış bir heksagon oluşturur. Referans gerilim vektörü (V_{ref}), bulunduğu sektöre göre iki bitişik aktif vektör ve sıfır vektörler kullanılarak bir anahtarlama periyodu içinde üretilir.



Şekil 9. SVPWM ve FOC ilişkisi Blok Diyagramı

3.2 Üç Fazlı Evirici Yapısı Ve Uzak Vektör Modülasyonu Adaptasyonu

Tipik bir üç fazlı güç inverterinin yapısı şekil 10'da gösterilmiştir; burada V_A, V_B, V_C yıldız bağlı motor sargılarına uygulanan gerilimlerdir ve V_{DC} sürekli (doğru akım) inverter giriş gerilimidir.



Şekil 10. Basit Bir Evirici Devresi [2]

Altı anahtar güç BJT, GTO, IGBT, MOSFET vb. olabilir. Tüm bu cihazların Açık-Kapalı (ON-OFF) dizilimi aşağıdaki koşullara uymalıdır:

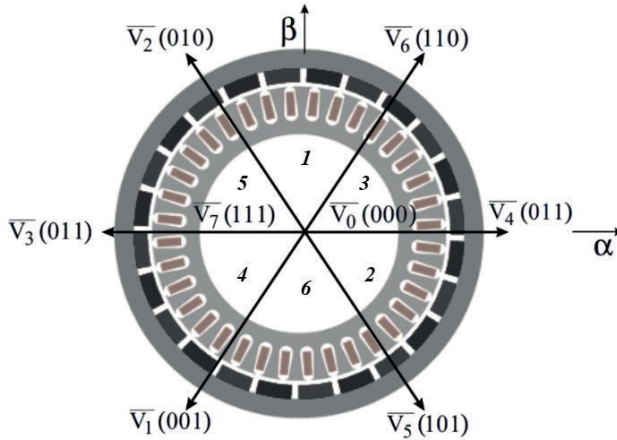
- Anahtarlardan sadece 2'si aynı anda açık olmalıdır ve aynı bacağına ait iki anahtar aynı anda açık olmamalıdır.
- Aynı bacağın üst ve alt anahtarları, birbirini tamamlayan iki darbe sinyaliyle sürülür. Bu sayede dikey iletim mümkün olmaz; güç anahtarlarının geçişlerinde üst üste binme olmamasına dikkat edilmelidir.

3.3 Uzak Vektör PWM Modülasyonlu Inverter

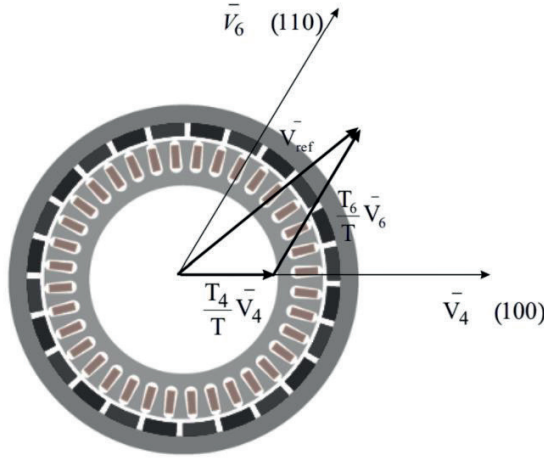
Uzak Vektör PWM, PMSM makineye FOC algoritması çıktısına göre faz voltajları sağlar. SVPWM yöntemi, yukarıda belirtilen koşulları karşılayan darbe sinyallerini üretir ve harmonik içeriği minimize eder. Harmonikler, makinenin bakır kayıplarını belirler ve bu kayıplar makinenin toplam kayıplarının büyük bir kısmını oluşturur.

Yukarıda belirtilen iki kısıt dikkate alındığında, anahtar komutları için sekiz olası kombinasyon vardır. Bu sekiz anahtar kombinasyonu, sekiz farklı

faz gerilimi konfigürasyonunu belirler. Aşağıdaki diyagram bu kombinasyonları göstermektedir.



Şekil 11. SVPWM Vektörleri ve Sektörleri (Kombinasyonları)



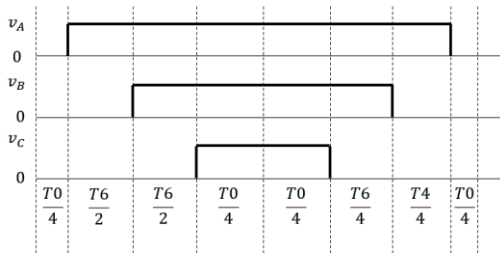
Şekil 12. Referans vektörün, bitişik vektörlerin bir kombinasyonu olarak ifadesi

Burada T_4 ve T_6 sırasıyla V_4 ve V_6 vektörlerinin uygulandığı sürelerdir; T_0 ise sıfır vektörlerinin uygulandığı süredir.

Referans gerilim (ters Park dönüşümünün çıktısı) ve örnekleme periyotları bilindiğinde, aşağıdaki sistem T_4 , T_6 ve T_0 değerlerini belirlemeyi sağlar.

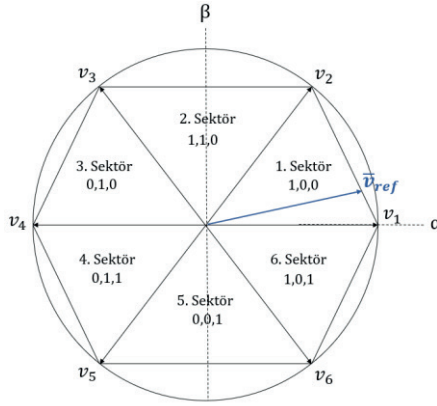
$$T = T_4 + T_6 + T_0 \quad (14)$$

$$\bar{V}_{ref} = \frac{T_4}{T} \bar{V}_4 + \frac{T_6}{T} \bar{V}_6 \quad (15)$$



Şekil 13. Sektör 3'deki Örnekleme Süreleri [1]

Aşağıdaki görselde, Uzak Vektör Modülasyonu (SVM) tekniğinde üç fazlı inverterlerin α - β düzlemindeki uzak vektör diyagramı gösterilmiştir. Altı aktif vektör (V_1 'den V_6 'ya) 60° 'lik sektörlerle ayrılmış bir heksagon oluşturmuştur; her sektördeki anahtarlama durumları (örneğin, 1. Sektör: 1.0.0) belirtilmiştir. Mavi ok (V_{ref}), referans gerilim vektörünü göstermiş olup, referans vektörünün oluşturulması için ilgili sektördeki bitişik vektörler kullanılmıştır.



Şekil 14. Eksenlerin ve Sektörlerin Bir Arada Gösterimi [1]

4. SONUÇ

Bu bölümde, PMSM motorların matematiksel modeli temel alınarak Alan Yönelimli Kontrol (FOC) yönteminin teorik altyapısı ayrıntılı biçimde ele alınmış, akı ve tork bileşenlerinin d-q ekseninde bağımsız şekilde kontrol edilmesini mümkün kılan koordinat dönüşümleri, akım modeli ve gerilim denklemleri açıklanmıştır.

FOC'un karmaşık yapısını oluşturan bu teorik temel, yüksek performanslı motor kontrolünün sağlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, inverter çıkışında uygulanacak gerilimlerin doğru şekilde üretilmesi için kullanılan Uzak Vektör Modülasyonu (SVM) tekniği incelenmiş ve SVM'nin FOC algoritmasıyla olan yapısal ilişkisi açıklanmıştır.

SVM'nin uzay vektörü düzleminde referans gerilim vektörünü en uygun biçimde oluşturan gelişmiş bir PWM yöntemi olduğu, bu nedenle FOC'un öngördüğü gerilim komutlarını yüksek doğrulukla uygulayarak motorun dinamik performansını doğrudan iyileştirdiği gösterilmiştir.

FOC ve SVM, teorik açıdan gelişmiş matematiksel modellere, doğru parametre tahminlerine ve yüksek işlemci performansına (DSP vs.) ihtiyaç duydukları için uygulama bakımından nispeten zorlayıcı kontrol yöntemleri olarak değerlendirilmektedir. Buna rağmen, tork üretiminde sağladıkları hassasiyet, düşük harmonik içerik, yüksek verim ve geniş hız aralığında kararlı kontrol kabiliyeti sayesinde modern endüstriyel sürücülerin büyük çoğunluğunda standart çözüm haline gelmişlerdir.

Özellikle elektrikli araç tahrik sistemleri, robotik uygulamalar, yüksek hassasiyet gerektiren tahrik sistemleri ve enerji verimliliğinin kritik olduğu endüstriyel süreçlerde FOC-SVM tabanlı kontrol mimarileri önemli avantajlar sunmaktadır.

REFERANSLAR

- [1] N. P. Quang and J.-A. Dittrich, Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice, Springer.
- [2] A. C. Oliveira, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima and E. R. C. da Silva, "Modelling the Field Oriented Control applied to a 3-phase Permanent Magnet Synchronous Machine," Heliyon, vol. 9, no. 3, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665963823000167>
- [3] P. Pillay and R. Krishnan, "Sensorless Field Oriented Control of Synchronous Machines for Low Speed Operation," Electronics, vol. 12, no. 6, p. 1382, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/6/1382>
- [4] L. Wang and J. Li, "Predictive field-oriented control of PMSM with space vector modulation technique," Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China, vol. 5, pp. 82-90, 2010. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/225916992_Predictive_field-oriented_control_of_PMSM_with_space_vector_modulation_technique (Updated reference from 2025 search)
- [5] A. D. B. Paes and R. M. Stephan, "Sliding-Mode Control Strategies for PMSM speed control," arXiv preprint arXiv:2510.18420, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/html/2510.18420v1>
- [6] S. Dwivedi and B. Singh, "Performance Analysis of Vector controlled PMSM Drive modulated with Sinusoidal PWM and Space Vector PWM," 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), pp. 1-6, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9315210>
- [7] T. Ramesh and J. A. Reddy, "Field Oriented Control for Space Vector Modulation based Brushless DC Motor Drive," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 3, no. 1, 2014. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Field-Oriented-Control-for-Space-Vector-Modulation-Ramesh-Amarnath/3fa0b2edc0e5903871ada6cff7c8aa50f5876722> (Recent analysis from 2025)

- [8] V. S. Kumar and S. S. Rao, "Field Oriented Control of PMSM Drive using SVPWM Technique," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 4, no. 10, 2015. [Online]. Available:
- [9] D. Zellouma, Y. Bekakra and H. Benboughenni, "Field-oriented control based on parallel proportional–integral controllers of induction motor drive," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 4846–4860, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723003682>
- [10] Z. Zhang, Y. Liu and Q. Wang, "Design of a Real-Time Control System for PMSM Based on x86+ Xenomai Platform," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 11, pp. 131-136, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896325021706>
- [11] S. Kumar and R. K. Tripathi, "Application of fuzzy logic control for enhanced speed control and efficiency in PMSM drives using FOC and SVPWM," *Physica Scripta*, vol. 99, no. 8, Jul. 2025. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1402-4896/aded49>
- [12] Texas Instruments, BPRA073: Sensorless Brushless Motor Control. Erişim Tarihi: Kasım. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/bpra073/bpra073.pdf>
- [13] W. Wang, H. Yan, Y. Xu, J. Zou, X. Zhang, W. Zhao, G. Buticchi ve C. Gerada, "New Three-Phase Current Reconstruction for PMSM Drive with Hybrid Space Vector Pulsewidth Modulation Technique," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 662–673, Jan. 2021. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2997986.
- [14] H. Hu, H. Wang, K. Liu, J. Wei ve X. Shen, "A Simplified Space Vector Pulse Width Modulation Algorithm of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine Drive for a Flywheel Energy Storage System," *Energies*, vol. 15, no. 11, art. 4065, 2022. DOI: 10.3390/en15114065.
- [15] Q. Chen, W. Wu ve Q. He, "Characteristic Analysis and Error Compensation Method of Space Vector Pulse Width Modulation-Based Driver for Permanent

Magnet Synchronous Motors,” *Sensors*, vol. 24, no. 24, art. 7945, Dec. 2024. DOI: 10.3390/s24247945.

- [16] F. Yu, K. Li, Z. Zhu ve X. Liu, “An Over-Modulated Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motors,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40391–40401, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3166511.
- [17] H. Ghanayem, M. Alathamneh ve R. M. Nelms, “Performance of a Vector Controlled PMSM Drive Based on Proportional–Resonance Control under Single-Phase Open Circuit Fault,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 755–763, 2023.



**OGR SİSTEMİ DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİNDE FARKLI AMAÇ FONKSİYONLARININ
ETKİSİ**

“ ”

Muhammet DEMİRBAŞ¹

M. Kenan DÖŞOĞLU²

¹ Öğr. Gör.; Kastamonu Üniversitesi Tosya Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü,
muhammetdemirbas@kastamonu.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-5223-1279

² Prof. Dr.; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
kenandosoglu@duzce.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-8804-7070

1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemleri, modern yaşamın ve endüstriyel faaliyetlerin sürdürülebilirliği için temel bir altyapıdır. Bu sistemlerin kararlı, güvenilir ve verimli bir şekilde çalışması, sistemdeki gerilim ve frekans gibi temel parametrelerin sürekli olarak kontrol altında tutulmasını gerektirir. Özellikle sistem geriliminin nominal değerler etrafında sıkı toleranslar içinde kalması, hem tüketici ekipmanlarının ömrü hem de güç sisteminin genel kararlılığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Senkron generatörler, güç sistemlerinin ana üretim birimleri olarak bu gerilim kontrolünün merkezinde yer alır ve bu kontrol, generatörlerin uyarım sistemleri aracılığıyla sağlanır (Ekinci, Demiröğren, Zeynelgil & Kaya, 2019; Bendjeghaba, 2014).

Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR), senkron generatörün terminal gerilimini sürekli olarak izleyerek, uyarım sargılarına giden akımı ayarlayan ve böylece terminal gerilimini istenen referans değerde tutan denetleyicidir. OGR'nin dinamik performansı, güç sisteminde meydana gelen yük değişimleri, kısa devre arızaları veya hat açmaları gibi geçici olaylar sırasında sistemin kararlılığını koruma ve gerilim profilini hızla normale döndürme kabiliyeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, OGR sisteminde kullanılan denetleyicinin parametrelerinin en uygun şekilde ayarlanması, sistem performansını iyileştirmek için hayati bir adımdır (Duman, Yörükeren & Altaş, 2016).

Geleneksel olarak, OGR denetleyici parametreleri deneme-yanılma veya Ziegler-Nichols gibi klasik yöntemlerle belirlenmekteydi (Gaing, 2004). Ancak bu yöntemler, karmaşık ve doğrusal olmayan dinamiklere sahip modern güç sistemleri için her zaman en iyi performansı sunamamaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla son yıllarda, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) (Sahib & Ahmed, 2016), Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon (AEO) (Çalasan, Micev, Djurovic & Mageed, 2020) ve Jaya Optimizasyon Algoritması (JOA) (Jumani vd., 2020) gibi meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, denetleyici parametrelerinin ayarlanmasında

yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmalar gibi literatürde sunulan birçok algoritma belirli bir performans ölçütünü iyileştirmeyi hedefleyen bir amaç fonksiyonunu minimize ederek en uygun parametreleri arar. Ancak literatüre sunulan metasezgisel optimizasyon algoritmaları birçoğu problemleri çözme konusunda benzer sonuçlar verirler. Algoritmaların erken yakınsama problemini çözmek ve çözüm çeşitliliğini artırmak amacıyla literatüre Uygunluk Mesafe Dengesi (FDB) yöntemi sunulmuştur (Kahraman, Aras & Gedikli, 2020). İlk kez Simbiyotik Arama Algoritması (SOS) (Kahraman vd., 2020; Cheng & Prayogo, 2014) üzerinde uygulanan bu yöntem literatürde kabul görerek çeşitli algoritmalar üzerinde uygulanmıştır. Zaman içerisinde FDB yönteminin de performansının iyileştirilmesi amacıyla Dinamik FDB (Kahraman vd., 2022), Bulanık Mantık Tabanlı FDB (Demirbas vd., 2025) gibi yeni yöntemler literatüre sunulmuştur. 2025 yılında literatüre sunulan Doğrusal Popülasyon Boyutu Azaltmalı, Dinamik Uygunluk-Mesafe Dengesi ve Başarı Geçmişine Dayalı Uyarlamalı Diferansiyel Evrim Algoritması (dFDB-LSHADE) da bu yöntemler ile geliştirilen algoritmalardandır (Yildirim, Bozkurt, Kahraman & Aras, 2025).

Optimizasyon sürecinin başarısı, seçilen amaç fonksiyonuna büyük ölçüde bağlıdır. Amaç fonksiyonu, denetleyicinin istenen davranışını matematiksel olarak tanımlar ve optimizasyon algoritmasına yol gösterir. Literatürde, sistemin adım cevabındaki hatayı temel alan Hatanın Karesinin İntegrali (ISE) (Pradhan, Majhi & Pati, 2018), Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali (IAE) (Li vd., 2017), Zaman Ağırlıklı Karesel Hatanın İntegrali (ITSE) (Gozde & Taplamacioglu, 2011), Zamanın İntegrali ile Çarpılan Mutlak Hata (ITAE) (Panda & Sahu, 2012), OF1 (Bakir, Guvenc, Kahraman & Duman, 2022), OF2 (Bakir, Guvenc, Kahraman & Duman, 2022), OF3 (Rajinikanth & Satapathy, 2015) ve ZLG (Gaing, 2004) gibi farklı amaç fonksiyonları kullanılmaktadır. Her bir amaç fonksiyonu, sistem cevabının aşım değeri, oturma süresi, kalıcı durum hatası gibi farklı özelliklerine öncelik verir. Bu farklı amaç fonksiyonlarının seçilmesinin, OGR denetleyici parametreleri ve sonuç olarak sistemin dinamik performansı üzerindeki karşılaştırmalı etkileri üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışmanın temel amacı, OGR sistemi için PID ve PIDD² denetleyicilerinin parametrelerinin belirlenmesinde farklı amaç fonksiyonlarının kullanımının, sistemin performans kriterleri üzerindeki etkisini incelemek ve karşılaştırmaktır. Çalışmanın literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- dFDB-LSHADE algoritması ile 8 farklı amaç fonksiyonu kullanılarak OGR sistemi için PID ve PIDD² denetleyicilerinin parametreleri ayarlanmıştır.
- Literatürde önerilen metasezgisel optimizasyon algoritmalarının karmaşık mühendislik problemlerinde test edilmesi ve performanslarının analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda dFDB-LSHADE algoritmasının OGR sisteminde kullanılan denetleyicilerin parametrelerini ayarlama konusundaki performansı ilk kez değerlendirilmiştir.
- Önerilen dFDB-LSHADE algoritmasının performansı literatürde yapılan diğer çalışmalarla kıyaslanarak etkinliği gösterilmiştir.

Çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir; Bölüm 2, dFDB-LSHADE algoritmasının matematiksel tanımı ile OGR sisteminin matematiksel tanımını içermektedir. Bölüm 3, yapılan çalışmanın Adım Yanıtı ve Kutup-Sıfır Analizi ile değerlendirilmesi ve bulguların analiz edilmesini içermektedir. Bölüm 4 ise, farklı amaç fonksiyonları ile elde edilen denetleyici performanslarının karşılaştırılması ve elde edilen bulguların değerlendirilmesini içermektedir.

2. MATERYEL VE METOD

2.1. dFDB-LSHADE Algoritması

Doğrusal Popülasyon Boyutu Azaltımlı SHADE algoritması (L-SHADE) (Tanabe & Fukunaga, 2014), parametrelerini dinamik olarak ayarlaması ve popülasyon boyutunu arama ilerledikçe azaltması gibi adaptif mekanizmaları sayesinde oldukça başarılı bir evrimsel optimizasyon algoritmasıdır. Ancak,

algoritmanın temel zayıflığı, yeni aday çözümleri yönlendirecek bireyleri seçerken yalnızca uygunluk değerine dayalı bir yaklaşım sergilemesidir. Bu durum, arama uzayının farklı bölgelerini keşfetmek yerine, en iyi çözümlerin toplandığı dar bir alana hızla odaklanmasına neden olmaktadır. Bu durum popülasyon çeşitliliğinin yetersiz düzeyde olmasına ve algoritmanın yerel optimum tuzaklarına kolayca düşmesine yol açmaktadır.

dFDB-LSHADE algoritması, LSHADE'in bu temel eksikliğini gidermek amacıyla dFDB adı verilen mekanizmayı önermektedir. Bu mekanizma, çözüm adayı seçiminde tek kriterli yaklaşımı terk ederek, çözümün kalitesini temsil eden uygunluk (sömürü) ve mevcut en iyi çözümden ne kadar farklı olduğunu gösteren mesafe (keşif) faktörlerini aynı anda değerlendiren akıllı bir denge kurmaktadır. Optimizasyon sürecinin başında algoritma, daha çeşitli çözümler bulmak için mesafesi yüksek bireyleri ödüllendirerek keşfi önceliklendirmektedir. Arama ilerledikçe ağırlığı uygunluğa kaydırarak en iyi bulunan çözümü hassaslaştırmaya, yani sömürüye odaklanmaktadır. Bu dinamik denge sayesinde, algoritma popülasyon çeşitliliğini daha etkin bir şekilde korumakta ve erken yakınsama riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylece zorlu arama uzaylarında daha sağlam ve güvenilir bir performans sergilemektedir. dFDB-LSHADE algoritmasının sözde kodu Algoritma 1'de verilmiştir (Yildirim vd., 2025).

Algoritma 1. dFDB-LSHADE algoritmasının sözde kodu.

1.	Başla
2.	$G=1$, $N_G=N_{init}$, Arşiv $A=\emptyset$;
3.	P: Başlangıç popülasyonu rasgele belirlenir.
4.	M_{CR} ve M_F kümelerinin tüm değerleri 0,5 ayarlanarak oluşturulur.
5.	While ($FE < MaxFEs$) (arama uzayı yaşam döngüsü)
6.	for ($i=1:N$)
7.	$ri = [1,H]$ aralığında rastgele oluşturulur.
8.	if ($M_{CR,ri} = -1$) then $CR_{i,G} = 0$; else $CR_{i,G} = rand_{ri}(M_{CR,ri}, 0,1)$; end

9.	$F_{i,G} = \text{randc}_j(M_{F,rb}, 0, 1);$
10.	dFDB mutasyon aşamasına uygulanır.
11.	end for
12.	for (i=1:N)
13.	P güncellenir.
14.	end for
15.	M_{CR} ve M_F güncellenerek arşivlenir.
16.	LPSR aşaması
17.	N_{G+1} hesaplanır.
18.	if ($N_{G+1} > N_G$)
19.	then
20.	Popülasyondaki çözüm adayları uygunluk değerine göre sıralanır. En düşük $N_G - N_{G+1}$ değerine sahip çözüm adayı elenir.
21.	Popülasyonun yeni boyutuna göre arşiv boyutlandırılır.
22.	end if
23.	$G++$
24.	end while

2.2. Otomatik Gerilim Regülatörü

Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR), modern güç sistemlerinin kararlılığı ve güvenilirliği için hayati öneme sahip bir kontrol sistemidir. Senkron jeneratörlerin en temel bileşenlerinden biri olan OGR'nin ana görevi, jeneratörün ürettiği terminal gerilimini, sistemdeki yük değişimleri ve diğer bozucu etkilere rağmen önceden belirlenmiş bir referans değerinde sabit tutmaktır. Güç sistemine bağlı olan hassas elektronik cihazların ve endüstriyel ekipmanların sağlıklı çalışabilmesi için gerilimin belirli sınırlar içinde kalması zorunludur. Gerilimdeki aşırı düşüşler veya yükselmeler, hem tüketici tarafındaki cihazlara zarar verebilir hem de güç sisteminin genel kararlılığını bozarak senkronizasyon kayıplarına ve hatta geniş çaplı kesintilere yol açabilir. Bu nedenle OGR, güç kalitesini ve sistem kararlılığını sağlayan birincil savunma hattı olarak kabul edilir.

OGR sistemleri üzerine yapılan denetleyici tasarım çalışmalarında, sistemin dinamik davranışını analiz etmek için genellikle doğrusallaştırılmış bir transfer fonksiyonu modeli kullanılır. Bu model, OGR sistemini oluşturan dört ana bileşenin etkileşimini matematiksel olarak ifade eder. Bu bileşenler ve görevleri şunlardır:

- **Yükselteç:** Bu bileşen, generatörün anlık terminal gerilimi ile olması gereken referans gerilim arasındaki hata sinyalini alır. Bu küçük hata sinyalini, uyarım sistemini harekete geçirebilecek daha yüksek bir seviyeye yükseltir. Transfer fonksiyonu bir kazanç sabiti (K_a) ve bir zaman sabiti ile (T_a) ile modellenir. Kazanç sabiti (K_a) 10 ile 40 arasında, zaman sabiti (T_a) ise 0,02 ile 0,1 arasında bir değer alabilir. Bu çalışmada K_a 10, T_a 0,1 olarak belirlenmiştir (Gozde & Taplamacioglu, 2011).

- **Uyarma:** Yükselteçten gelen sinyali kullanarak generatörün sargılarına uygulanacak olan uyarım gerilimini üretir. Bu gerilim, generatörün rotorundaki manyetik alanın gücünü kontrol ederek dolaylı olarak terminal gerilimini ayarlar. Uyarma devresinin transfer fonksiyonu bir kazanç sabiti (K_e) ve bir zaman sabiti (T_e) ile modellenir. Kazanç sabiti (K_e) 1 ile 10 arasında, zaman sabiti (T_e) ise 0,4 ile 1 arasında bir değer alabilir. Bu çalışmada K_e 1, T_e 0,4 olarak belirlenmiştir (Gozde & Taplamacioglu, 2011).

- **Senkron Generatör:** Uyarım sargılarından gelen manyetik alan ile dönen rotorun etkileşimi sonucu terminal gerilimini üretir. Generatörün terminal gerilimi ile uyarım gerilimi arasındaki ilişki, bir kazanç sabiti (K_g) ve bir zaman sabiti (T_g) içeren transfer fonksiyonu ile modellenir. Kazanç sabiti (K_g) 0,7 ile 1 arasında, zaman sabiti (T_g) ise 1 ile 2 arasında bir değer alabilir. Bu çalışmada K_g 1, T_g 1 olarak belirlenmiştir (Gozde & Taplamacioglu, 2011).

- **Gerilim Sensörü:** Generatörün terminal gerilimini sürekli olarak ölçerek geri besleme sinyali üreten bileşendir. Bu sinyal, referans gerilimle karşılaştırılarak hata sinyalinin oluşturulmasını sağlar. Gerilim sensörünü modelleyen transfer fonksiyonu bir kazanç sabiti (K_s) ve bir zaman sabiti (T_s) ile modellenir. Kazanç sabiti (K_s) 1 olarak belirlenirken, zaman sabiti (T_s) ise 0,001 ile 0,06 arasında bir değer alabilir. Bu çalışmada K_s 1, T_s 0,01 olarak belirlenmiştir (Gozde & Taplamacioglu, 2011).

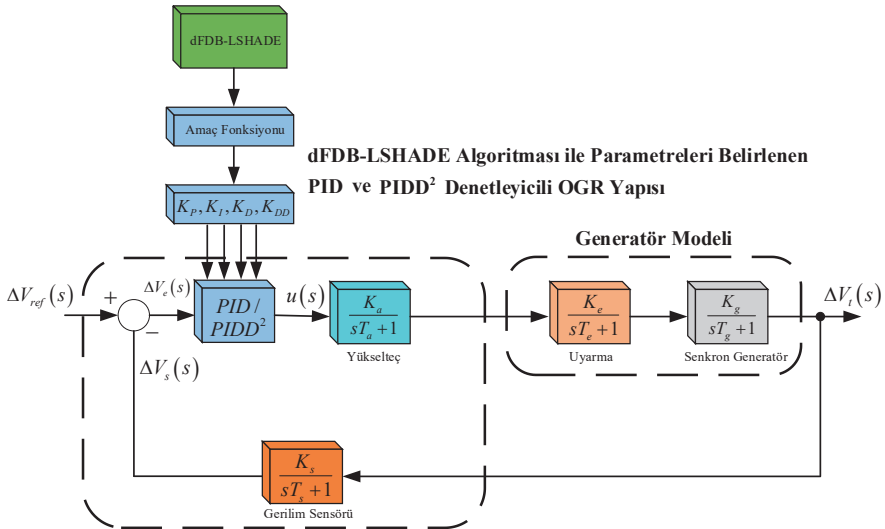
OGR sisteminin kontrol mekanizması genellikle PID denetleyicisi ile sağlanmaktadır. Orantısal Kazanç (K_P), İntegral Kazancı (K_I) ve Türev Kazancı (K_D) kontrol parametrelerini içeren PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu Denklem 1’de verilmiştir (Gozde & Taplamacioglu, 2011).

$$C_{PID} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

PID denetleyicisinin performansını iyileştirmek için ikinci bir türev kazancının (K_{DD}) eklenmesiyle oluşturulan PIDD² denetleyicisinin transfer fonksiyonu Denklem 2’de verilmiştir. PIDD² denetleyicisinin uygulandığı kontrol sistemlerinde kararlılık ve hız tepkisinin iyileştiği gözlemlenmiştir (Dai & Gao, 2024).

$$C_{PIDD^2} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s + K_{DD} s^2 \quad (2)$$

Bu çalışmada önerilen sistemde PID ve PIDD² denetleyicilerinin kontrol parametreleri dFDB-LSHADE algoritması ile ayarlanmaktadır. Önerilen OGR sistemini modelleyen kapalı çevrim transfer fonksiyonu Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Önerilen OGR sisteminin kapalı çevrim transfer konksiyonu.

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Bu çalışmada PID ve PIDD² denetleyicileri ile kontrol edilen OGR sisteminin kontrol parametrelerinin 8 farklı amaç fonksiyonu ile belirlenerek performans analizinin yapılması amaçlanmaktadır. Çalışma Intel Core i7-11370H, 3.30GHz CPU ve 64 GB RAM'e sahip bilgisayarda çalıştırılan Matlab 2022a ile gerçekleştirilmiştir. dFDB-LSHADE algoritması ekosistem boyutu 100 olarak belirlenirken sonlandırma kriteri olarak kullanılan amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı ise 3060 olarak belirlenmiştir. 3060 amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı dFDB-LSHADE algoritması için 100 iterasyona denk gelmektedir. dFDB-LSHADE algoritmasının PID ve PIDD² denetleyicilerinin kontrol parametrelerini arama sınırları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. PID ve PIDD² denetleyicilerine ait kontrol parametrelerinin arama sınırları.

Denetleyici	Kontrol Parametreleri			
	K _P	K _I	K _D	K _{DD}
PID	[0, 2]	[0, 2]	[0, 2]	-
PIDD²	[0, 4]	[0, 4]	[0, 4]	[0,4]

Bu çalışmada kullanılan IAE (Pradhan vd., 2018), ISE (Li vd., 2017), ITAE (Gozde & Taplamacioglu, 2011), ITSE (Panda & Sahu, 2012), OF1 (Bakir vd., 2022), OF2 (Bakir vd., 2022), OF3 (Rajinikanth & Satapathy, 2015) ve ZLG (Gaing, 2004) amaç fonksiyonları Denklem 3 ile Denklem 10 arasında gösterilmiştir.

$$IAE = \int_0^{\infty} |E(t)| dt \quad (3)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} |E^2(t)| dt \quad (4)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |E(t)| dt \quad (5)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t |E^2(t)| dt \quad (6)$$

$$OF1 = \left(1 - e^{-\beta}\right) \times \left(\frac{OS}{\alpha} + E_{ss}\right) + e^{-\beta} (t_s - t_r) \quad (7)$$

$$OF2 = W_1 \times ITAE + W_2 \times OS + W_3 \times E_{ss} + W_4 \times t_s \quad (8)$$

$$OF3 = W_5 \times M_p + W_6 \times t_s + W_7 \times ITAE + W_8 \times ITSE \quad (9)$$

$$ZLG = (1 - e^{-\lambda}) \cdot (OS + E_{ss}) + e^{-\lambda} (t_s - t_r) \quad (10)$$

Burada; E kalıcı durum hatası, OS maksimum yüzde aşım değeri, t_s yerleşme zamanı, t_r yükselme zamanı, $\alpha=90$, $\beta=1$, $W_1= 1$, $W_2= 0,02$, $W_3= 1$, $W_4= 5$, $W_5= 2$, $W_6= 2$, $W_7= 5$, $W_8= 5$, $\lambda=0,65$ 'tir.

dFDB-LSHADE algoritması arama işlemini 20 döngü boyunca gerçekleştirmiştir. 20 döngüde en iyi sonucu veren kontrol parametreleri çözüm olarak belirlenmiştir. 20 döngü boyunca PID ve PIDD² denetleyicileri için 8 farklı amaç fonksiyonu ile elde edilen en düşük, ortalama değer, en yüksek değer ve standart sapma ile birlikte en iyi döngü Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. dFDB-LSHADE algoritmasının 8 farklı amaç fonksiyonu için 20 döngü boyunca aldığı değerler ve en iyi döngü.

PID					
Amaç Fonksiyonu	En düşük	Ortalama	En yüksek	Standart sapma	En iyi döngü
IAE	0.15786	0.15786	0.15786	4.7175e-10	4
ISE	0.065822	0.065822	0.065822	3.9151e-15	1
ITAE	0.032804	0.032804	0.032804	8.1447e-09	5
ITSE	0.0055312	0.0055312	0.0055312	9.6468e-14	18
OF1	0.058993	0.058997	0.05901	4.0338e-06	3
OF2	2.0022	2.6788	3.5019	0.68655	7
OF3	1.3707	1.3708	1.3711	0.00011634	19
ZLG	0.095491	0.095539	0.095789	7.631e-05	16
PIDD ²					
Amaç Fonksiyonu	En düşük	Ortalama	En yüksek	Standart sapma	En iyi döngü
IAE	0.028003	0.028003	0.028006	8.3301e-07	17
ISE	0.0054877	0.0054877	0.0054877	1.8292e-13	14
ITAE	0.00065647	0.00066049	0.00069875	9.3252e-06	3
ITSE	0.00013121	0.00013121	0.00013121	1.398e-12	5
OF1	0.0062409	0.0062429	0.0062545	3.3833e-06	8
OF2	0.26319	0.26321	0.26327	2.0571e-05	18
OF3	0.16771	0.16772	0.16783	2.8526e-05	4
ZLG	0.0088596	0.0092495	0.014158	0.0011883	12

En iyi döngülerde elde edilen kontrol parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

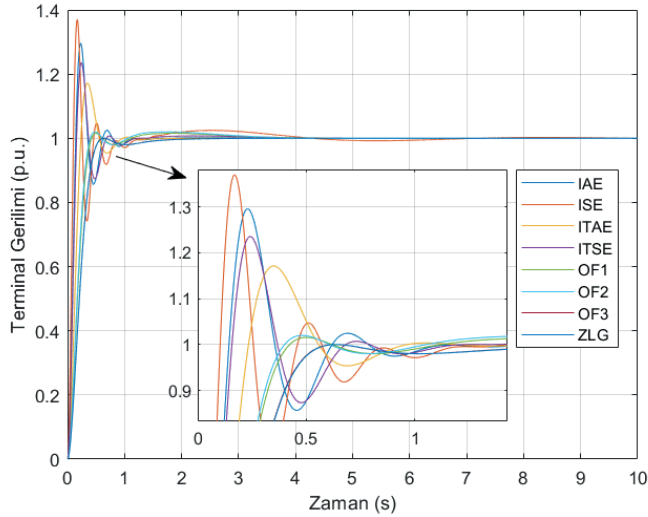
Tablo 3. dFDB-LSHADE algoritmasının ile en iyi döngülerde elde edilen kontrol parametreleri.

Amaç Fonksiyonu	PID Kontrol Parametreleri			
	K _P	K _I	K _D	K _{DD}
IAE	1.8581	1.3028	0.8119	-
ISE	1.1535	2.0000	1.4036	-
ITAE	1.2672	0.8718	0.4064	-
ITSE	1.4381	1.2204	0.7361	-

OF1	0.6704	0.5827	0.2587	-
OF2	0.6834	0.6331	0.2723	-
OF3	0.5959	0.4023	0.1967	-
ZLG	0.5946	0.3997	0.1955	-
Amaç Fonksiyonu	PIDD ² Kontrol Parametreleri			
	K _P	K _I	K _D	K _{DD}
IAE	4.0000	2.6666	1.4400	0.1067
ISE	4.0000	4.0000	3.4311	0.4351
ITAE	3.9999	2.6666	1.4400	0.1067
ITSE	4.0000	2.7940	1.7579	0.1603
OF1	4.0000	2.2381	1.9425	0.1508
OF2	4.0000	2.6571	2.0664	0.1578
OF3	4.0000	2.3514	1.8353	0.1451
ZLG	4.0000	2.2155	1.9422	0.1507

3.1. Adım Yanıtı

dFDB-LSHADE algoritması ile farklı amaç fonksiyonları kullanılarak tasarlanan PID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı Şekil 2’de, adım yanıtı sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.



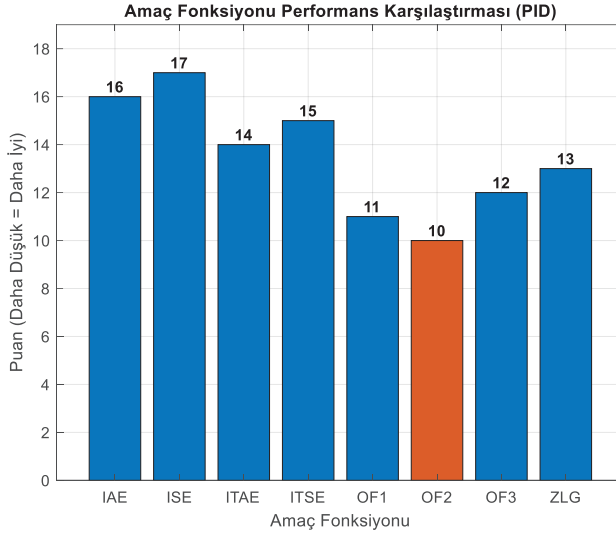
Şekil 2. Farklı amaç fonksiyonları ile tasarlanan PID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı.

Tablo 4. dFDB-LSHADE algoritması ile farklı amaç fonksiyonları kullanılarak tasarlanan PID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı sonuçları.

Amaç Fonksiyonu	Tr (0.1 → 0.9)	Ts ($\pm 2\%$)	OS%	Puan
IAE	0.0970 (2p)	0.9716 (7p)	29.5987 (7p)	16
ISE	0.0693 (1p)	3.0887 (8p)	36.9877 (8p)	17
ITAE	0.1582 (4p)	0.8421 (5p)	17.1428 (5p)	14
ITSE	0.1064 (3p)	0.9584 (6p)	23.5580 (6p)	15
OF1	0.2603 (6p)	0.3910 (2p)	1.5550 (3p)	11
OF2	0.2492 (5p)	0.3721 (1p)	1.9975 (4p)	10
OF3	0.3279 (7p)	0.5098 (3p)	0.0036 (2p)	12
ZLG	0.3293 (8p)	0.5122 (4p)	1.1062e-04 (1p)	13

OGR sistemlerinde terminal geriliminin referans değerini aşması, sistem sistem kararlılığını ve ekipmanların güvenliğini olumsuz yönde etkilediği için istenmeyen bir durumdur. Referans gerilim, sistemin güvenli çalışması için belirlenen bir hedef değerdir. Terminal gerilimi bu değeri aşarsa, elektronik devreler ve yükler zarar görebilir. Sistemde oluşan salınımlar sonucunda kararsızlık yaşanabilir. Tablo 4'te sunulan verilere göre, ISE ve IAE amaç fonksiyonları ile %36,9877 ve %29,5987 olmak üzere çok yüksek aşım değerleri elde edilmiştir. Buna karşın, ZLG ve OF3 amaç fonksiyonları neredeyse sıfır aşım ile sistemi referansa ulaştırmıştır. OF2 ise %1.9975 gibi kabul edilebilir, çok düşük bir aşım değeri sergilemiştir. Sistemin kararlılığa ulaşma hızı açısından OF2 amaç fonksiyonu, 0.3721 saniye ($\pm 2\%$) ile en üstün performansı göstermiştir. Buna karşın, yüksek aşım sahip olan ISE, salınımların sönümlenmesindeki gecikme nedeniyle 3.0887 saniye ile en kötü yerleşme zamanına sahiptir. Bu durum, OF2'nin sönümleme karakteristiğinin diğer fonksiyonlara göre başarılı olduğunu kanıtlamaktadır. Sistemin tepki hızı incelendiğinde, ISE, 0.0693 saniye ve IAE, 0.0970 saniye ile en hızlı tepkiyi vermişlerdir. Ancak bu hız, yukarıda belirtildiği gibi yüksek aşım ve uzun yerleşme süresine neden olarak sistem kararlılığından ödün verilmesine sebep olmuştur. OF2, 0.2492 saniyelik yükselme zamanı ile hız ve kararlılık arasında en dengeli sonucu sunmaktadır. Sistem performansının değerlendirildiği yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve yüzde aşım değerlerinden yola çıkılarak

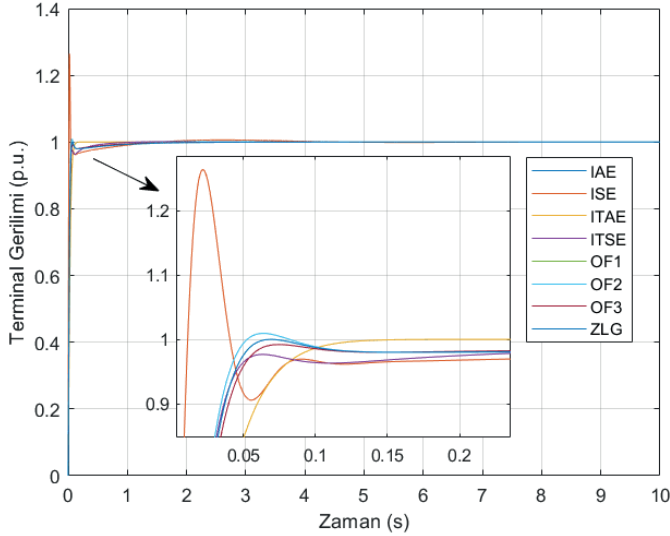
amaç fonksiyonları sıralamaya tabii tutulmuştur. Her performans kriteri için en iyi değerden en kötü değere doğru bir sıralama yapılarak en iyi performans kriterine 1 puan, en kötü performans kriterine 8 puan verilmiştir. Toplam puanlar hesaplandığında en düşük puanı elde eden amaç fonksiyonunun en yüksek performansı sergilediği değerlendirilmiştir. Amaç fonksiyonlarının elde ettiği toplam puanlar Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. PID denetleyici tasarımında amaç fonksiyonlarının elde ettiği toplam puanlar.

OF2, toplam 10 puan ile en başarılı amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Özellikle yerleşme zamanındaki liderliği (1p) ve diğer parametrelerdeki tutarlı başarısı (4p ve 5p), onu en başarılı seçenek yapmaktadır. OF1 (11 puan) ve OF3 (12 puan) sırasıyla ikinci ve üçüncü en iyi performansı göstermiştir. Klasik fonksiyonlardan ISE (17 puan) ve IAE (16 puan), hızlı tepki vermelerine rağmen yüksek aşım ve uzun yerleşme süreleri nedeniyle genel sıralamada en sonda yer almışlardır.

dfFDB-LSHADE algoritması ile farklı amaç fonksiyonları kullanılarak tasarlanan PIDD² denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı Şekil 4'te, adım yanıtı sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.



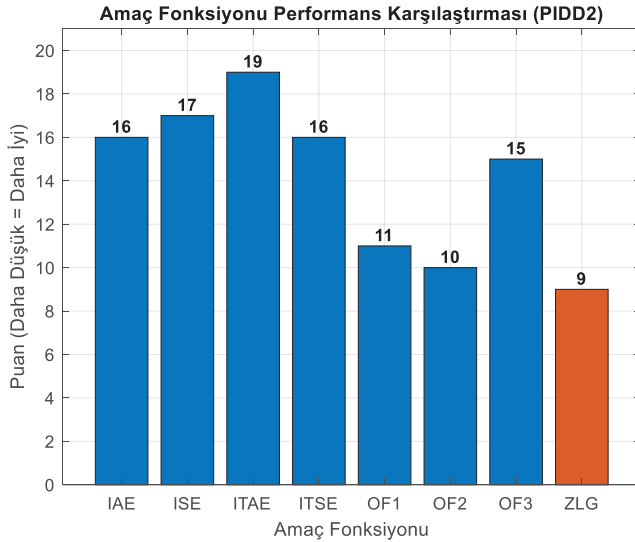
Şekil 4. Farklı amaç fonksiyonları ile tasarlanan PIDD² denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı.

Tablo 5. dfFDB-LSHADE algoritması ile farklı amaç fonksiyonları kullanılarak tasarlanan PIDD² denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı sonuçları.

Amaç Fonksiyonu	Tr (0.1 → 0.9)	Ts (± 2%)	OS%	Puan
IAE	0.0559 (8p)	0.0926 (6p)	3.2900e-05 (2p)	16
ISE	0.0089 (1p)	0.5515 (8p)	26.4115 (8p)	17
ITAE	0.0559 (8p)	0.0926 (6p)	0.0010 (5p)	19
ITSE	0.0341 (3p)	0.2541 (7p)	0.1209 (6p)	16
OF1	0.0346 (5p)	0.0515 (3p)	1.6449e-04 (3p)	11
OF2	0.0320 (2p)	0.0460 (1p)	0.9424 (7p)	10
OF3	0.0370 (6p)	0.0580 (4p)	0.0010 (5p)	15
ZLG	0.0346 (5p)	0.0515 (3p)	6.1943e-08 (1p)	9

Tablo 5'te sunulan verilere göre PIDD² denetleyicili OGR sisteminin tasarımında, amaç fonksiyonları arasında ZLG, OF1, OF3 ve ITAE neredeyse

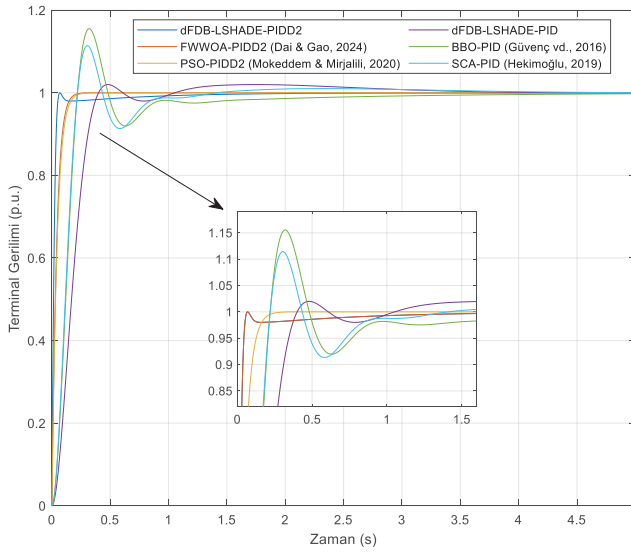
“sıfır aşım” davranışı sergilemişlerdir. Özellikle ZLG, 6.19×10^{-8} gibi ihmal edilebilir düzeyde bir aşım değeri ile sistemin referans değerini aşmadan hedefe ulaşmasını sağlamıştır. Buna karşın ISE, agresif bir kontrol sinyali üretmiş, bu da sistemin %26.4115 oranında çok yüksek bir aşım yapmasına neden olmuştur. Bu durum, ISE'nin PIDD² yapısında kararlılık açısından riskli bir seçenek olduğunu göstermektedir. Sistemin kararlı hale gelme hızı açısından OF2, 0.0460 saniye ile en iyi yerleşme zamanını sunmuştur. Ancak OF2, bu hızı sağlarken %0.9424 oranında bir aşım oluşturmıştır. Bu aşım değeri kabul edilebilir olsa da diğer amaç fonksiyonlarına göre yüksek olduğu için sıralamada düşmesine neden olmuştur. Buna karşın ZLG; hem aşımı pratik olarak sıfıra indirmiş hem de 0.0515 saniyelik rekabetçi bir yerleşme süresi sunarak hız ve sönümlleme arasında mükemmel bir denge kurmuştur. Klasik amaç fonksiyonlarından ITAE ve IAE, çok düşük aşımlar sunsalar da yerleşme sürelerinin diğer amaç fonksiyonlarına göre daha uzun olması nedeniyle toplam performans sıralamasında geride kalmışlardır. Amaç fonksiyonlarının PIDD² tasarımında elde ettiği toplam puanlar Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. PIDD² denetleyici tasarımında amaç fonksiyonlarının elde ettiği toplam puanlar.

Amaç fonksiyonlarının aldığı toplam puanlar incelendiğinde; ZLG, toplam 9 puan ile PIDD² denetleyicisi için en başarılı amaç fonksiyonu olmuştur. ZLG'nin başarısı, aşımı en aza indirgerken (1p), yükselme ve yerleşme sürelerinde de üst sıralarda (sırasıyla 5p ve 3p) yer alarak tutarlı bir profil çizmesinden kaynaklanmaktadır. OF2, toplam 10 puan ile ikinci sırada yer almıştır. En hızlı yerleşen sistem olmasına rağmen, aşım miktarının ZLG ve OF1'e göre nispeten yüksek olması, liderliği kaçırmamasına neden olmuştur. OF1, 11 puan ile üçüncü en iyi performansı göstermiştir. 19 puan ile ITAE ve 17 puan ile ISE listenin sonlarında yer almıştır.

dFDB-LSHADE algoritması ile PID ve PIDD² denetleyicileri kullanılarak tasarlanan en iyi OGR sistemleri literatürde sunulan diğer güçlü yöntemlerle kıyaslanmıştır. Literatürde önerilen güçlü algoritmaların adım yanıtları ile dFDB-LSHADE algoritması ile elde edilen adım yanıtı Şekil 6'da sunulurken, adım yanıtı sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. dFDB-LSHADE algoritması ile PID ve PIDD² denetleyicileri kullanılarak tasarlanan OGR sistemlerinin adım yanıtlarının literatürde sunulan yöntemlerle kıyaslanması.

Tablo 6. Önerilen OGR sistemlerinin adım yanıtı sonuçlarının literatürle kıyaslanması.

Algoritma-Denetleyici	Amaç Fonksiyonu	Tr (0.1 → 0.9)	Ts (± 2%)	OS%
dFDB-LSHADE-PIDD ² (Önerilen yöntem)	ZLG	0.0346	0.0515	6.1943e-08
FWWOA-PIDD2 (Dai & Gao, 2024)	ITAE	0.0848	0.1484	0.0033
PSO-PIDD2 (Mokeddem & Mirjalili, 2020)	Diğer	0.0930	0.1635	0.0023
dFDB-LSHADE-PID (Önerilen yöntem)	OF2	0.2492	0.3721	1.9975
BBO-PID (Güvenç, Işık, Yiğit & Akkaya, 2016)	ITSE	0.149	1.4407	15.5580
SCA-PID (Hekimoğlu, 2019)	ZLG	0.1481	0.8415	11.4244

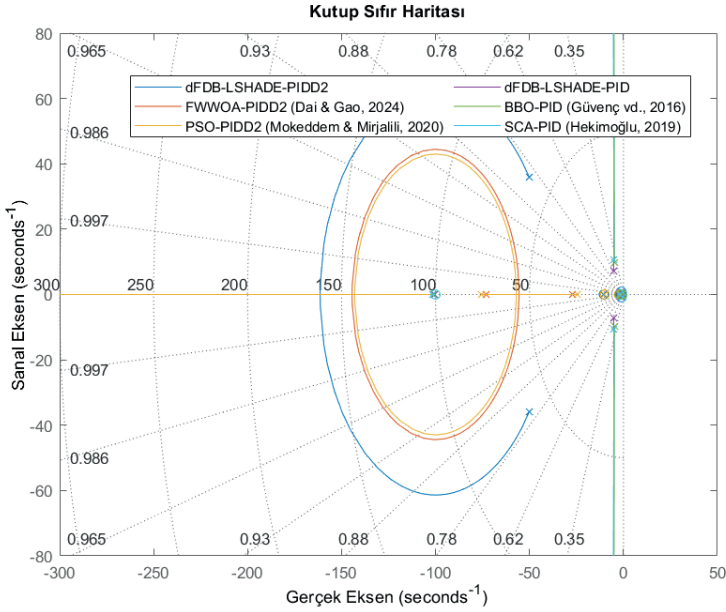
Adım yanıtları incelendiğinde, önerilen dFDB-LSHADE-PIDD2 (ZLG) sisteminin, literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla olağanüstü bir performans sergilediği görülmektedir. Önerilen yöntem, 0.0515 saniye gibi son derece kısa bir sürede kararlı hale gelmiştir. Bu değer, en yakın rakibi olan FWWOA-PIDD2 (0.1484 s) yönteminden yaklaşık 3 kat, PSO-PIDD2 (0.1635 s) yönteminden ise 3.1 kat daha hızlıdır. Bu durum, önerilen algoritmanın arama uzayında global optimuma ulaşma yeteneğinin ve yakınsama hızının diğer algoritmalarla göre çok daha üstün olduğunu kanıtlamaktadır. Grafik üzerindeki büyütülmüş pencerede net bir şekilde görüldüğü üzere, önerilen yöntem 6.19×10^{-8} aşım ile sisteme referansı takip ettirirken, literatürdeki diğer yöntemler daha yüksek aşım sergilemişlerdir.

Klasik PID yapısı için önerilen dFDB-LSHADE-PID (OF2) sistemi, literatürdeki BBO-PID (Güvenç, Işık, Yiğit & Akkaya, 2016) ve SCA-PID (Hekimoğlu, 2019) sistemleri ile kıyaslanmıştır. BBO (Güvenç, Işık, Yiğit & Akkaya, 2016) ve SCA (Hekimoğlu, 2019) algoritmaları ile optimize edilen sistemlerin yükselme zamanları görece düşük olsa da, bu sistemlerin %11.4244

ve %15.5580 gibi çok yüksek aşımara sahip oldukları görülmektedir. Önerilen yöntem, %1.9975 gibi kabul edilebilir minimal bir aşım ve 0.3721 saniye yerleşme süresi ile rakiplerine göre çok daha kararlı ve gürbüz bir kontrol sağlamıştır. Önerilen yöntem, rakiplerinin aksine, gereksiz salınımları elimine ederek sistemin yıpranmasını önleyecek bir karakteristik sunmaktadır.

3.2. Kutup-Sıfır Analizi

Tasarlanan denetleyicilerin dinamik kararlılığını ve sönümleme karakteristiklerini doğrulamak amacıyla kutup sıfır analizi yapılmıştır. Önerilen dFDB-LSHADE algoritması ile tasarlanan OGR sisteminin ve literatürdeki diğer yöntemlerin karmaşık düzlemdeki konumları Şekil 7’de, elde ettiği kutup noktaları Tablo 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Önerilen dFDB-LSHADE algoritması ile tasarlanan OGR sisteminin ve literatürdeki diğer yöntemlerin karmaşık düzlemdeki konumları

Tablo 7. dFDB-LSHADE algoritması ile PID ve PIDD² denetleyicileri kullanılarak tasarlanan OGR sistemlerinin kutup sıfır analizi ile literatürde sunulan yöntemlerle kıyaslanması.

dFDB-LSHADE-PIDD² (ZLG)	FWFOA-PIDD² (Dai & Gao, 2024)	PSO-PIDD² (Mokeddem & Mirjalili, 2020)
-1.01	-1.00	-0.999
-1.34	-2.50	-2.50
-10.6	-10.1	-10.0
-50.3+ 36.0i	-27.0	-24.4
-0.492-3.232i	-72.9	-75.5
-50.3- 36.0i		
dFDB-LSHADE-PID	BBO-PID (Güvenç vd., 2016)	SCA-PID (Hekimoğlu, 2019)
-1.10+0.897i	-0.585	-0.909+0.820i
-1.10-0.897i	-2.06	-0.909-0.820i
-5.27+7.08i	-4.80+9.89i	-5.16+10.5i
-5.27- 7.08i	-4.80-9.89i	-5.16-10.5i
-101	-101	-101

Tablo 7’de sunulan tüm yöntemler için elde edilen karakteristik kutupların reel kısımlarının negatif ($\sigma < 0$) olduğu görülmektedir. Kontrol teorisine göre, tüm kutupların karmaşık düzlemin sol yarı düzleminde yer alması, tasarlanan tüm sistemlerin asimptotik olarak kararlı olduğunu göstermektedir. Literatürdeki BBO-PID (Güvenç vd., 2016), SCA-PID (Hekimoğlu, 2019) yöntemleri incelendiğinde, bu sistemlerin baskın kutuplarının sanal kısımlarının oldukça büyük olduğu görülmektedir. Büyük sanal bileşenler, sistemin doğal frekansının yüksek olmasına ve adım yanıtında yüksek genlikli salınımlara neden olmaktadır. Buna karşın, önerilen yöntemle elde edilen baskın kutuplarda sanal kısmın küçüklüğü salınım frekansının düşük tutulduğunu; reel kısmın büyüklüğü sönümlemenin daha güçlü olduğunu gösterir. Bu matematiksel yerleşim, zaman domenindeki düşük aşım ve hızlı yerleşme performansının temel nedenidir. Önerilen dFDB-LSHADE-PIDD² (ZLG) yöntemi, kutupları kararlılık bölgesinin daha güvenli noktalarına yerleştirmiştir. Özellikle $-50.3 \pm 36.0i$ gibi reel eksenden oldukça uzakta yer alan kutuplar, sistemin geçici hal

tepkisinin çok hızlı sönümlenmesini sağlamaktadır. Literatürdeki yöntemler (FWWOA ve PSO), kutupları genellikle reel eksene yakın dizmiştir. Ancak önerilen yöntem, kutupları s-düzleminde daha geniş bir alana yayarak, hem hızlı yükselme zamanını hem de “sıfır aşım” hedefini sağlayacak optimum sönümlenme oranına (ζ) ulaşmıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, güç sistemlerinde senkron generatörlerin terminal gerilimini kararlı ve hızlı bir şekilde kontrol etmek amacıyla, Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) sistemleri için dFDB-LSHADE algoritması tabanlı gürbüz bir PID ve PIDD2 denetleyici tasarım yaklaşımı sunulmuştur. Çalışmanın kapsamını genişletmek ve denetleyici performansını maksimize etmek adına, literatürde sıkça kullanılan toplam 8 farklı amaç fonksiyonunun (IAE, ISE, ITAE, ITSE, OF1, OF2, OF3 ve ZLG) sistem dinamiğine etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Elde edilen simülasyon sonuçları ve performans analizleri ışığında varılan temel çıkarımlar şunlardır:

1. Denetleyici tasarımında tek bir amaç fonksiyonunun her yapı için ideal olmadığı gözlemlenmiştir. Klasik PID yapısı için hız ve sönümlenme arasında en iyi dengiyi sağlayan OF2 amaç fonksiyonu öne çıkarken; daha karmaşık dinamiklere sahip PIDD² yapısında, aşımı pratik olarak sıfıra indiren ve kararlılığı artıran ZLG amaç fonksiyonu en üstün performansı sergilemiştir. Puanlama temelli analiz, ISE ve IAE gibi geleneksel amaç fonksiyonlarının OGR sistemlerinde yüksek aşım neden olduğunu ve kararlılık açısından risk oluşturabileceğini ortaya koymuştur.

2. dFDB-LSHADE algoritması ile optimize edilen PIDD²-ZLG yapısı, literatürdeki güncel optimizasyon teknikleriyle (FWWOA-PIDD² (Dai & Gao, 2024), PSO-PIDD² (Mokeddem & Mirjalili, 2020), BBO-PID (Güvenç vd., 2016), SCA-PID (Hekimoğlu, 2019) tasarlanan denetleyicilere kıyasla belirgin bir performans farkı yaratmıştır. Önerilen yöntem, literatürdeki en yakın

rakibine göre yerleşme zamanını yaklaşık 3 kat kısaltarak 0.0515 saniye seviyesine indirmiş ve 6.19×10^{-8} gibi ihmal edilebilir bir aşım değeri ile sisteme referansı mükemmel bir şekilde takip ettirmiştir.

3. Gerçekleştirilen kutup-sıfır analizi, zaman domenindeki bu başarının matematiksel temelini doğrulamıştır. Önerilen algoritmanın, sistem kutuplarını s-düzleminde sanal eksenden uzaklaştırarak daha güçlü bir sönümleme sağladığı ve böylece sistemin bağıl kararlılığını artırdığı kanıtlanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada önerilen dFDB-LSHADE algoritması ile PIDD²-ZLG ve PID-OF2 amaç fonksiyonu kombinasyonu; yüksek hassasiyet, hızlı tepki ve minimum salınım gerektiren OGR sistemleri için güvenilir ve yüksek performanslı bir kontrol stratejisi olarak önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Bakir, H., Guvenc, U., Kahraman, H. T., & Duman, S. (2022). Improved Lévy flight distribution algorithm with FDB-based guiding mechanism for AVR system optimal design. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108032. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108032>
- Bendjeghaba, O. (2014). Continuous firefly algorithm for optimal tuning of PID controller in AVR system. *Journal of Electrical Engineering*, 65(1), 44-49.
- Cheng, M.-Y., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Computers & Structures*, 139, 98-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>
- Çalasan, M., Micev, M., Djurovic, Ž., & Mageed, H. M. A. (2020). Artificial ecosystem-based optimization for optimal tuning of robust PID controllers in AVR systems with limited value of excitation voltage. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*. doi: <https://doi.org/10.1177/0020720920940605>
- Dai, F., & Gao, S. (2024). Optimal design of a PID2 controller for an AVR system using hybrid whale optimization algorithm. *IEEE Access*. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454107>
- Demirbas, M., Duman, S., Ozkaya, B., Balci, Y., Ersoy, D., Döşoğlu, M. K., Guvenc, U., Altun, B. E., Uzel, H., Kaymaz, E. (2025). Fuzzy-based fitness-distance balance snow ablation optimizer algorithm for optimal generation planning in power systems. *Energies*, 18(12), 3048. doi: <https://doi.org/10.3390/en18123048>
- Duman, S., Yörükeren, N., & Altaş, İ. H. (2016). Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(4), 2387-2400. doi:10.3906/elk-1404-14. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1404-14>
- Ekinci, S., Demiröğren, A., Zeynelgil, H. L., & Kaya, S. (2019). Böbrek-ilhamlı algoritma ile otomatik gerilim regülatör sistemi için PID kontrolör tasarımı. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(2), 383-398. doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.516424>

- Gaing, Z. L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.821821>
- Gozde, H., & Taplamacioglu, M. C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348(8), 1927–1946. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2011.05.012>
- Güvenç, U., Işık, A. H., Yiğit, T., & Akkaya, I. (2016). Performance analysis of biogeography-based optimization for automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1150-1162. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1311-111>
- Hekimoğlu, B. (2019). Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1761-1771. doi: <https://doi.org/10.1177/0142331218811453>
- Jumani, T. A., Mustafa, M. W., Hussain, Z., Rasid, M. M., Saeed, M. S., Memon, M. M., Khan, I., Nisar, K. S. (2020). Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system. *Alexandria Engineering Journal*, 59(4), 2429-2440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.005>
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105169>
- 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, 4873–4908. doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02629-3>
- Li, X., Wang, Y., Li, N., Han, M., Tang, Y., & Liu, F. (2017). Optimal fractional order PID controller design for automatic voltage regulator system based on reference model using particle swarm optimization. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 8(5), 1595–1605. doi: <https://doi.org/10.1007/s13042-016-0530-2>

- Mokeddem, D., & Mirjalili, S. (2020). Improved whale optimization algorithm applied to design PID plus second-order derivative controller for automatic voltage regulator system. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 43(6), 541-552. doi: <https://doi.org/10.1080/02533839.2020.1771205>
- Panda, S., & Sahu, B. K. (2012). Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349(8), 2609–2625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2012.06.008>
- Pradhan, R., Majhi, S. K., & Pati, B. B. (2018). Design of PID controller for automatic voltage regulator system using Ant Lion Optimizer. *World Journal of Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1108/WJE-05-2017-0102>
- Rajinikanth, V., & Satapathy, S. C. (2015). Design of controller for automatic voltage regulator using teaching learning based optimization. *Procedia Technology*, 21, 295-302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.10.032>
- Sahib, M. A., & Ahmed, B. S. (2016). A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms. *Journal of Advanced Research*, 7(1), 125–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.004>
- Tanabe, R., & Fukunaga, A. S. (2014, July). Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction. *2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* içinde (s. 1658-1665). Beijing, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.2014.6900380>
- Yildirim, İ., Bozkurt, M. H., Kahraman, H. T., & Aras, S. (2025). Dental X-Ray image enhancement using a novel evolutionary optimization algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 142, 109879. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109879>



**GÜNEŞ ENERJİSİ: TEK DİYOTLU PV PANEL MODELİ,
YÜKSELTİCİ (BOOST) DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE MPPT
ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ**

“ ”

Selami KARAKAŞ¹

¹ Öğr. Gör. , Kastamonu Üniversitesi, Bozkurt Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon
Bölümü, ORCID ID: 0009-0007-2718-6115

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi; sürekliliği, çevre dostu, gürültüsüz çalışma, bakım masraflarının az olması, kurulu gücünün sürekli artış göstermesi nedeniyle tesislerde en çok kullanılan temiz enerji kaynağı olmuştur. Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. PV paneldeki sıcaklık ve ışıyım değerleri üretilen elektrik enerjisinin gücünü önemli derecede etkilemektedir. Bundan dolayı çevresel koşullar panelin çıkış gücünü anlık olarak değiştirmektedir. Çıkıştaki yüke maksimum seviyedeki gücün aktarılması için MPPT algoritmalarının kullanılması gerekmektedir (Yılmaz 2024). PV panellerin modellenmesi enerjinin verimliliği açısından oldukça önemlidir. DA-DA dönüştürücülerin kullanılması sebebi ise değişken sıcaklık, güneş ışıyımı ve kısmi gölgelenme gibi PV panelin çıkışında sürekli olarak sabit gerilim olmamasıdır. Bundan dolayı panelin çıkış gerilimini sabit bir referans gerilimine ayarlamak için DA-DA dönüştürücüler kullanılır.

2. Güneş Enerjisi

Tükenmeyen ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi dünyada var olan diğer enerji kaynaklarının da temelini oluşturmaktadır. Yaygın olarak kullanılan ve en potansiyelli temiz enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında güneş enerjisi çevreye olumsuz etkisi en az olan enerji kaynağıdır. Dünyada her yerde bulunabilen güneş, ülkelerin enerji bağımlılıklarını az da olsa giderebilmektedir (Kaya M. and Yıldırım B. 2023).

Günümüzde güneş enerjisi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar;

- Tarlaları sulama yapmak amacıyla güneş enerjisi ile çalışan su pompalarında
- Güneş enerjili çatı su ısıtıcı sistemlerinde
- Akıllı sera sistemleri ısıtma ve soğutmada

- Güneş enerjisi ile çalışan cadde ve sokak aydınlatmalarında
- PV panel ile elektrik üretiminde
- PV panel ile çalışan trafik levhalarında

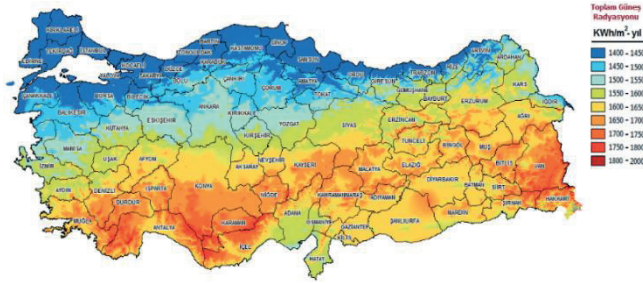
PV panellerle güneş enerjisinden elektrik üretmenin birçok avantajı vardır. Bunlar aşağıdaki gibidir (Sampaio and González 2017; Silveira, Tuna, and Lamas 2013).

- Yağmur, buz, kar, rüzgâr vs. olumsuz çevre koşullarına karşı oldukça dayanıklıdır.
- Elektrik enerjisi üretimi güneşten sağlandığı için herhangi bir yakıt masrafı yoktur.
- Elektrik üretiminde herhangi bir gürültü oluşmamaktadır.
- Çevre dostu olduğundan kirliliğe sebep olmaz.
- Teknolojinin gelişmesiyle birlikte PV panellerin verimleri ve kullanımları artırılıp maliyetleri bir o kadar da azaltılmaktadır.
- Bakım masrafları düşüktür.

PV panellerin birçok avantajının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir (Sampaio and González 2017; Silveira et al. 2013).

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- İhtiyaç fazlası enerji için depolama sistemlerine ihtiyaç duyarlar.
- Sadece gündüz enerji üretimi gerçekleşir. Yağışlı ve bulutlu havalarda üretim düşer ve gece elektrik üretimi olmaz.
- PV panellerin güneş enerjisinden tam olarak yararlanabilmesi için daha fazla alana ihtiyaç duyarlar.

Ülkemizin coğrafi konumundan dolayı güneş enerji potansiyeli diğer birçok ülkeye göre oldukça avantajlı durumdadır. Türkiye, şekil 1’de görülen güneşlenme haritasına göre 2.741 saat/yıl güneşlenme süresine sahiptir. Bu süreye göre 1.527,46 kWh/m² ortalama yıllık ışıınım değeri hesaplanmıştır (Öztürk İ., Öğretmek B., and Karapınar F. S. n.d.).



Şekil 1. Türkiye güneşlenme haritası (Öztürk İ. et al. n.d.).

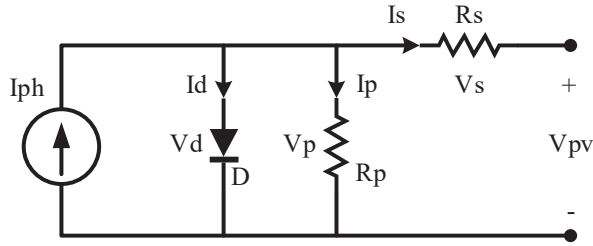
Türkiye’de en uzun yıllık güneşlenme süresi 3.045 saat/yıl olarak Güneydoğu Anadolu bölgesinde olmasına rağmen, metre kare başına düşen en yüksek toplam güneş enerjisi değeri 1.650 kWh/m²-yıl ile Akdeniz bölgesindedir. Tablo 1’de Coğrafi bölgelere göre ışıınım değerleri verilmiştir (Öztürk İ. et al. n.d.).

Tablo 1. Coğrafi bölgelere göre ışıınım değerleri

Coğrafi Bölgeler	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (saat/yıl)
Karadeniz	1.338	2.317
Marmara	1.324	2.632
İç Anadolu	1.582	2.892
Akdeniz	1.650	3.014
Ege	1.561	3.017
Doğu Anadolu	1.573	2.741
Güneydoğu Anadolu	1.590	3.045

3. Tek Diyotlu PV Panel Modeli

Hücreler genel olarak tek ve iki diyotlu olarak modellenir. Fotovoltaik hücrelerde en çok kullanılan ve en basit model tek diyotlu olanıdır. Basitleştirilmiş olan bu tek diyotlu model akım kaynağı, diyot ve iki tane dirençten meydana gelir. Akım kaynağı; sıcaklık, güneş ışınması, PV hücre çıkış gerilimi ve akımı ile orantılı olarak fotoakımı üretir. Şekil 2’ de Tek diyotlu PV hücre eşdeğer devresi verilmiştir (İşen E 2019; Yılmaz 2024).



Şekil 2. Tek diyotlu Pv hücrenin eşdeğer devresi (İşen E 2019)

Kirchoff akım kanunu ile tek diyotlu model için çıkış akımı (1)’deki eşitlik ile elde edilir (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_s = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1)$$

I_d diyot akımı, I_{ph} üretilen fotoakım, I_s ve I_p sırasıyla seri ve paralel direnç üzerindeki akımı, R_s ve R_p dirençleri ifade etmektedir. Üretilen fotoakım (2)’de verilen eşitlik ile bulunur (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_{ph} = (I_{sc,x} + K_i dT) \frac{G}{G_x} \quad (2)$$

Burada, $(I_{sc,x})$ 1000 W/m² güneş ışınması ve 25 °C sıcaklıkta üretilen akım, (T) kelvin cinsinden çalışma sıcaklığı, (T_x) nominal sıcaklık ve (T, T_x) arasındaki fark ise (dT) , (G) güneş aşınması ve (G_x) nominal güneş ışınmasıdır.

Bunların ardından diyot akımı (3) eşitliği ile hesaplanabilir (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{V_t \alpha} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

İfadede, I_0 diyottaki doyma akımını, fotovoltaik hücrenin I akımı ve V gerilimini ifade eder. α diyodun 1,2 arasında değişen idealite faktörüdür.

$V_T = \frac{kT}{q}$ formülü ile verilen V_T ise termal gerilim değeridir. $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ olan bir elektronun yük miktarına q ve $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ise Boltzmann sabiti k değerini gösterir. Çalışma sırasındaki diyodun doyma akımı (4) eşitliği ile elde edilir (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_0 = I_{0,x} \left(\frac{T_x}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{\alpha k} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

Eşitlikte, P-N jonksiyonu arasındaki bant aralığı enerjisi E_g ile gösterilmektedir. Nominal durumdaki diyot doyma akımı ise eşitlik (5)' teki ifade ile hesaplanabilir (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_{0,x} = \frac{I_{sc,x}}{\exp \left(\frac{V_{oc,x}}{\alpha V_{t,x}} \right) - 1} \quad (5)$$

Normal şartlar altında fotovoltaik hücre açık devre iken çıkışta ölçülen gerilim $V_{oc,x}$, termal gerilim değeri ise $V_{t,x}$ ile gösterilir. Devredeki paralel direnç üzerine düşen akımda eşitlik (6) ile elde edilir (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_p = \frac{V_s + R_s I_s}{R_p} \quad (6)$$

Bulunan eşitliklerden çıkış akımı (7) 'deki denklem ile elde edilir (Anand 2020; Bilgin 2021; Seyedmahmoudian et al. 2013).

$$I_s = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I_s}{\alpha V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I_s}{R_p} \quad (7)$$

4. DA-DA Dönüştürücüler

Herhangi bir gerilim seviyesini uygun kontrol yöntemleri ile başka bir gerilim seviyesine çeviren elektronik güç devrelerine DA-DA dönüştürücüler denir. Yükün ihtiyacı olan uygun ve doğru gerilimi elde etmek, yüksek verimlilik sağlamak ve güç kayıplarını azaltmak temel amaçtır. Günümüzde; PV sistemlerinde, elektrikli araçlarda, orta ve yüksek gerilim sistemlerinde, otomasyon ve haberleşme sistemlerinde, sarj aletleri ve powerbank gibi taşınabilir elektronik cihazlarda vs. birçok alanda bu dönüştürücüler sıklıkla kullanılmaktadır (Hossain, Rahim, and Selvaraj 2018; Yılmaz 2024).

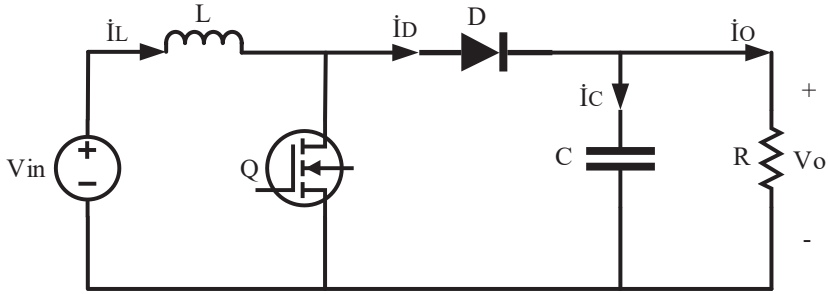
PV paneller için en çok kullanılan DA-DA dönüştürücü topolojileri ise aşağıdaki gibidir (Öztürk G. and Çorapsız M. R. 2024; Sutikno et al. 2022).

- Buck (alçaltan) dönüştürücü
- Boost (yükselten) dönüştürücü
- Buck-Boost (alçaltan-yükselten) dönüştürücü
- Cuk dönüştürücü
- SEPIC dönüştürücü

4.1. Yükseltici (Boost) DA-DA Dönüştürücü

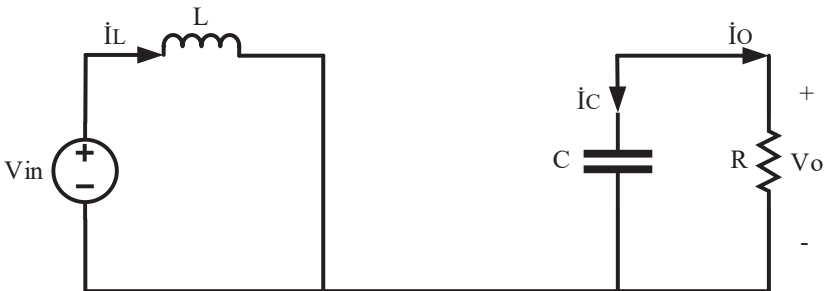
Yükseltici (boost) tip dönüştürücü topolojileri, girişe uygulanan DA gerilim seviyesini uygun kontrol yöntemleriyle daha yüksek bir DA çıkış gerilim seviyelerine dönüştüren güç elektroniği devre topolojileridir (Tofoli et al. 2015). PV sistemlerde çıkıştaki yükün istediği gerilim seviyesini elde etmek amacıyla yükseltici tip dönüştürücü topolojileri sıklıkla kullanılmaktadır. DA-DA yükseltici tip dönüştürücü topolojileri temel olarak bir adet giriş kaynağı

(V_{in}), bir adet yarıiletken anahtarlama güç anahtarı (Q), bir adet bobin (L), bir adet diyot (D) ve kondansatörden (C) meydana gelmektedir. Bu dönüştürücüler “Step up” dönüştürücü olarak da bilinmektedir. Şekil 3’te yükseltici tip dönüştürücü devre topolojisi verilmiştir (Bilgin 2021; K. S. Tunay 2022).



Şekil 3. Yükseltici tip dönüştürücü devre topolojisi

Temel olarak çalışması anahtarlama elemanının iletim veya kesim durumuna göre belirlenmektedir. Anahtarlama elemanı iletim durumunda iken; diyot ters yönde kutuplanmakta ve açık devre olmaktadır. Böylece giriş gerilimi bobine doğrudan aktarılmaktadır. Çıkıştaki kondansatör üzerinde depolanan enerji ile de yüke enerji sağlanmaktadır. Anahtarlama elemanı iletim durumu devre topolojisi şekil 4’te gösterilmiştir (Bilgin 2021; K. S. Tunay 2022).



Şekil 4. Anahtarlama elemanı iletim durumu devre topolojisi

Devreye ait durum değişkenleri aşağıdaki gibidir.

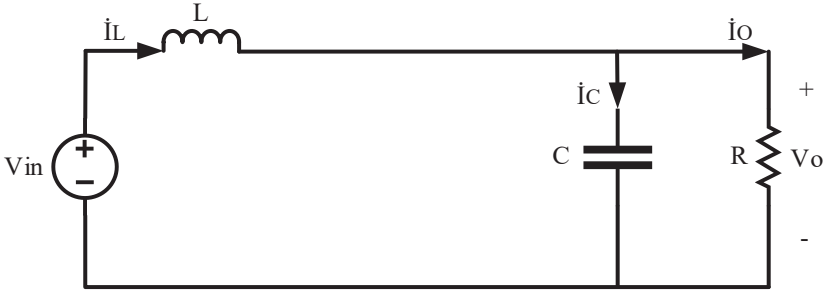
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (8)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (9)$$

(8) ve (9)' daki matematiksel ifadeler matrise aktarılırsa (10)' da gösterilen durum uzay formu elde edilir (Bilgin 2021).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (10)$$

Anahtarlama elemanı kesim durumunda iken; diyot iletme geçmekte ve kısa devre özelliği göstermektedir. Anahtarlama elemanı kesim konumunda olup açık devre olmaktadır. Çıkıştaki yük, giriş gerilimi ve bobin ile beslenmektedir. Anahtarlama elemanı kesim durumu devre topolojisi şekil 5'de gösterilmiştir (Bilgin 2021; K. S. Tunay 2022).



Şekil 5. Anahtarlama elemanı kesim durumu devre topolojisi

Devreye ait durum değişkenleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (11)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{\dot{I}_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad (12)$$

(11) ve (12)' deki matematiksel ifadeler matrisle aktarılırsa (13)' de gösterilen durum uzay formu elde edilir (Bilgin 2021).

$$\begin{bmatrix} \frac{d\dot{I}_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (13)$$

5. MPPT Algoritmaları

MPPT algoritmaları güneş enerjisi gibi değişken hava koşullarının olduğu tesislerde elektrik enerjisi üretimini optimize etmek için kullanılan algoritmalar. PV panele gelen ışınım miktarı, sıcaklık ve gölge durumuna göre panelde üretilen gerilim ve akım değerleri değişmektedir. Temel amaç farklı bütün koşullarda sistemin maksimum gücün elde edilmesini sağlayacak çalışma noktasını belirlemektir. Yani algoritma paneldeki değerleri sürekli olarak izlemektedir. Böylece elde edilen gücün en yüksek seviyede olması sağlanmaktadır. Bu sistem enerji maliyetini azaltırken panelin verimliliğini de artırmaktadır. Bu algoritmaların başlıca kullanım alanları aşağıda verilmiştir (Öztürk G. and Çorapsız M. R. 2024).

- Güneş enerji sistemleri
- Rüzgâr enerji sistemleri
- Tarım, sulama ve endüstriyel uygulamalar

MPPT algoritmaların en önemli avantajları aşağıda verilmiştir (Bollipo, Mikkili, and Bonthagorla 2020; Öztürk G. and Çorapsız M. R. 2024).

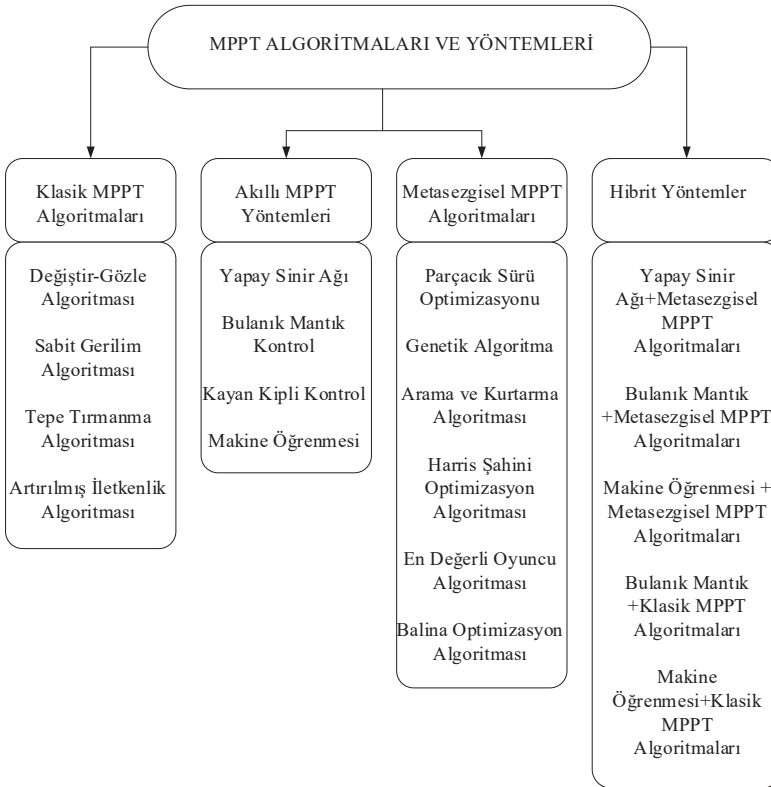
- Çevre koşullarına göre sürekli olarak değişen paneldeki akım ve gerilim değerleri algoritma sayesinde dinamik olarak izlenir ve mümkün olan en fazla enerjinin elde edilmesi sağlanır.

- Klasik gölgeleme gibi dünya koşullarında birden fazla maksimum güç noktasının olması mümkündür. Böyle durumda klasik algoritmalar yetersiz kalır. Gelişmiş MPPT teknikleri maksimum güç noktasını daha iyi takip eder ve daha iyi sonuç verir.

- Enerji depolama sistemlerine daha yüksek ve optimum güç aktarımı sağlanır. Bu sayede hem depolama süreci daha hızlı olur hem de bataryanın ömrü daha uzun olur.

- Enerji verimliliğinden dolayı daha kısa sürede kurulum maliyeti amorti edilir.

MPPT algoritmalarının sistemi karmaşık hale getirmesi, ilave donanımlar ve yazılım gerektirmesi gibi dezavantajları da vardır. Şekil 6'da MPPT algoritmaları ve yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 6. MPPT Algoritmaları ve Yöntemleri (Bollipo et al. 2020)

Daha sade bir yapısı ve basit hesaplama gereksinimi olmasından dolayı klasik MPPT algoritmaları PV sistemlerde kolaylıkla kullanılmaktadır. Eşit ışınım ve sıcaklığın olduğu durumlarda maksimum güç noktası takibinde oldukça verimlidir. Klasik algoritmaların yetersiz kaldığı durumlarda metasezgisel MPPT algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır. Karmaşık yapıların çözümünde tercih edilmektedir. Geniş çapta tarama yaparak problemin kaynağına inip değişken çevre koşullarında bile yüksek verimde enerji elde edilmektedir. Hesaplamaları klasik yöntemle göre daha karmaşıktır (Öztürk G. and Çorapsız M. R. 2024).

Akıllı MPPT yöntemleri küresel maksimum güç noktasını tespit etmede ve değişken hava şartlarında oldukça verimlidir. Takip etme süresi ve verimleri yüksektir (Öztürk G. and Çorapsız M. R. 2024).

Hibrit yöntemler ise bütün bu algoritma ve yöntemlerin birleşiminden oluşmaktadır. İki ya da daha fazla tekniğin birlikte kullanılmasıyla geliştirilmiş yaklaşımlardır. Temel olarak amaç yakınsama süresinin hızlı, yüksek kararlılık ve kısmi gölgeleme altında küresel maksimum güç noktasının en uygun ve doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktır. Bir algoritma veya yöntemin zayıf yönlerini diğerinin güçlü yönleriyle kapatacak şekilde tasarlanırlar. En yaygın kullanılan hibrit yaklaşımlarından biri klasik algoritmalar ile optimizasyon tabanlı olan yöntemlerin birlikte kullanılmasıdır (Li et al. 2018; Öztürk G. and Çorapsız M. R. 2024; Reza Reisi, Hassan Moradi, and Jamasb 2013).

Bütün bu MPPT algoritma ve yöntemlerin temel amacı PV sistemlerin tüm çevresel koşullar altında maksimum seviyede gücün en verimli şekilde elde edilmesini sağlamaktır.

6. Sonuç

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisine olan ilgi birçok avantajından dolayı artış göstermektedir. Güneş enerjisinde elde edilen elektrik enerjisi genel olarak PV panel, DA-DA dönüştürücü ve

MPPT algoritmasından meydana gelmektedir. Dönüştürücüler istenilen seviyedeki düşük/yüksek gerilim değerini yüke aktarmak için kullanılmaktadır. PV panellerle elde edilen enerji DA-DA dönüştürücülerin doluluk oranları MPPT algoritması ile kontrol edilerek tüm çevresel şartlar altında maksimum gücün elde edilmesi temel hedeftir.

KAYNAKLAR

- Anand, R. ., D, S. ., Kumar, B. 2020. "Global Maximum Power Point Tracking for PV Array under Partial Shading Using Cuckoo Search." Pp. 1–6 in. IEEE.
- Bilgin, N. 2021. "Fotovoltaik Sistemlerde Kısmi Gölgeleme Koşullarında Maksimum Güç Takibi." Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.
- Bollipo, Ratnakar Babu, Suresh Mikkili, and Praveen Kumar Bonthagorla. 2020. "Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation." *IET Renewable Power Generation* 14(9):1433–52.
- Hossain, M. Z., N. A. Rahim, and Jeyraj a/l Selvaraj. 2018. "Recent Progress and Development on Power DC-DC Converter Topology, Control, Design and Applications: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:205–30.
- İşen E, Koçan Ö. 2019. "Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Modellenmesi." *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*.
- K. S. Tunay, Yayla. 2022. "Anfis İle Modellenen PV Panelin Maksimum Güç Noktasının PI Kontrolör İle Takibi." Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Malatya., Malatya.
- Kaya M., and Yıldırım B. 2023. *Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi.
- Li, Xingshuo, Huiqing Wen, Yihua Hu, Lin Jiang, and Weidong Xiao. 2018. "Modified Beta Algorithm for GMPPT and Partial Shading Detection in Photovoltaic Systems." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33(3):2172–86. doi:10.1109/TPEL.2017.2697459.
- Öztürk G., and Çorapsız M. R. 2024. *Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar Ve Uygulamalar*. Ankara: Bidge Yayınları.

Öztürk İ., Öğretmek B., and Karapınar F. S. n.d. “Yüzer Güneş Enerjisi Santrallerinin Yeşil Enerjiye Geçişteki Rolü ve Türkiye Potansiyeli.”

Reza Reisi, Ali, Mohammad Hassan Moradi, and Shahriar Jamasb. 2013. “Classification and Comparison of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic System: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19:433–43.

Sampaio, Priscila Gonçalves Vasconcelos, and Mario Orestes Aguirre González. 2017. “Photovoltaic Solar Energy: Conceptual Framework.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74:590–601.

Seyedmahmoudian, Mohammadmehdi, Saad Mekhilef, Rasoul Rahmani, Rubiyah Yusof, and Ehsan Taslimi Renani. 2013. “Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems.” *Energies* 6(1):128–44. doi:10.3390/en6010128.

Silveira, Jose Luz, Celso Eduardo Tuna, and Wendell De Queiroz Lamas. 2013. “The Need of Subsidy for the Implementation of Photovoltaic Solar Energy as Supporting of Decentralized Electrical Power Generation in Brazil.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20:133–41.

Sutikno, Tole, Hendril Satrian Purnama, Rizky Ajie Aprilianto, Awang Jusoh, Nuryono Satya Widodo, and Budi Santosa. 2022. “Modernisation of DC-DC Converter Topologies for Solar Energy Harvesting Applications: A Review.” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 28(3):1845–72.

Tofoli, Fernando Lessa, Dênis de Castro Pereira, Wesley Josias de Paula, and Demercil de Sousa Oliveira Júnior. 2015. “Survey on Non-Isolated High-Voltage Step-up Dc-Dc Topologies Based on the Boost Converter.” *IET Power Electronics* 8(10):2044–57. doi:10.1049/iet-pel.2014.0605.

Yılmaz, M. 2024. “Güneş Enerji Sistemleri İçin Yeni Bir Hibrit MPPT Yönteminin Geliştirilmesi Ve Gerçek Zamanlı Uygulanması.” Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.



İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİN VERİMLİLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

“ ”

Hande DEMİRÖZ¹

Koray ÜLGEN²

1 YL Öğrencisi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi A.B.D. İzmir, TÜRKİYE Orcid No: 0000-0001-9011-5167, handedemiroz@gmail.com

2 Doç. Dr., Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE Orcid No: 0000-0002-9560-1727, koray.ulgen@ege.edu.tr

Not: Bu kitap bölümü künyesi aşağıda verilen yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

DEMİRÖZ, Hande. “İki Eksenli Güneş Takip Sistemlerinin Verimliliğinin Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir, 2023. (Danışman: Doç. Dr. Koray ÜLGEN)

1. GİRİŞ

Enerji, günümüz dünyasında ekonomik büyümenin, toplumsal refahın ve teknolojik ilerlemenin en temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. Artan nüfus, kentleşme, sanayileşme ve dijitalleşme süreçleri, enerji talebini her geçen gün artırmaktadır. Ancak bu artışın büyük bir kısmı hâlen fosil yakıtlara dayalı üretim sistemleriyle karşılanmakta, bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi riskler doğurmaktadır (IEA, 2023). Fosil kökenli enerji kaynaklarının kullanılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit ve diğer kirletici gazlar, küresel ısınmayı hızlandırmakta ve iklim değişikliğinin etkilerini derinleştirmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artık yalnızca ekonomik bir tercih değil, aynı zamanda ekolojik bir zorunluluk hâline gelmiştir (Liu ve ark., 2022).

Bu bağlamda, güneş enerjisi — tükenmeyen, çevreye zarar vermeyen ve dünya yüzeyine gelen toplam enerji akısı bakımından diğer kaynaklara kıyasla çok daha yüksek potansiyele sahip bir kaynak olarak — enerji dönüşümünde öncü bir role sahiptir (Markvart, 2000). Dünya yüzeyine ulaşan yıllık toplam güneş enerjisi miktarının, insanlığın yıllık enerji tüketiminin yaklaşık 10.000 katı olduğu tahmin edilmektedir (NREL, 2024). Bu potansiyelin yalnızca küçük bir kısmının bile etkin biçimde kullanılması, enerji arz güvenliği açısından büyük bir kazanım anlamına gelmektedir.

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan teknoloji fotovoltaik (FV) sistemlerdir. Fotovoltaik sistemler, yarı iletken malzemelerden üretilen güneş pillerinin (solar cell) yüzeyine düşen ışıınım enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır. Bu dönüşüm, p-n eklemi adı verilen bölgede fotonların elektronları serbest bırakması sonucu gerçekleşir. FV teknolojileri; monokristal, polikristal ve ince film gibi farklı malzeme türlerine göre çeşitlenmekte olup, her birinin verimlilik, maliyet ve dayanıklılık açısından kendine özgü avantaj ve sınırlılıkları bulunmaktadır (Green ve ark., 2023).

Fotovoltaik teknolojiler son on yılda büyük bir gelişme göstermiştir. 2010 yılında ortalama %13 olan ticari panel verimleri, 2024 itibarıyla %22 seviyelerine ulaşmıştır (IEA PVPS, 2024). Bununla birlikte, sistem performansını etkileyen unsurlar yalnızca hücre verimiyle sınırlı değildir. Panel eğim açısı, yönelimi, çevresel sıcaklık, tozlanma, gölgeleme ve özellikle **güneş ışınının panel yüzeyine geliş açısı** (θ) FV sistemlerin toplam enerji üretiminde belirleyici faktörlerdir. Panel yüzeyine gelen ışığın diklik açısı azaldığında, ışıının etkin bileşeni $G_{eff} = G \cos(\theta)$ ilişkisine göre azalır. Dolayısıyla, panelin gün boyunca güneşe dik kalması, enerji üretimini doğrudan artırır.

Panelin güneş ışınlarına dik kalmasını sağlamak amacıyla geliştirilen **güneş takip sistemleri (GTS)**, FV sistemlerde verimliliği artıran en önem-

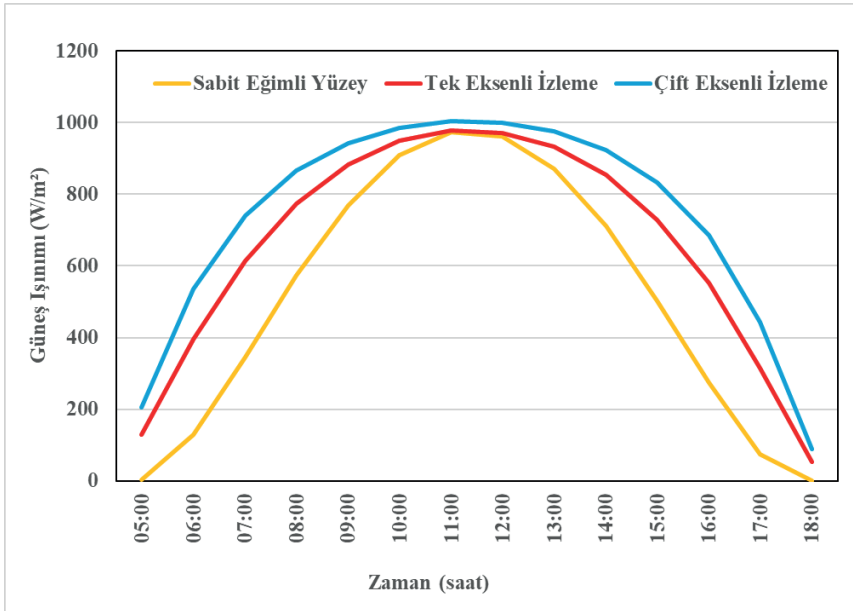
li mekanik-elektronik çözümlerden biridir. Güneş takip sistemleri, panelin konumunu güneşin günlük (doğu-batı) ve yıllık (yükseklik) hareketine göre ayarlayarak, ışıınım kaybını en aza indirmeyi hedefler. Eksen sayısına göre iki temel türden söz edilir:

1. Tek eksenli sistemler (single-axis trackers) — panelin yalnızca bir ekseninde (genellikle doğu-batı doğrultusunda) hareket ettiği sistemlerdir.

2. İki eksenli sistemler (dual-axis trackers) — hem yatay (azimut) hem de dikey (yükseklik) ekseninde hareket ederek panelin gün boyunca güneşe dik kalmasını sağlayan sistemlerdir (Chong & Wong, 2010).

İki eksenli sistemlerin teknik olarak daha karmaşık olduğu bilinse de sabit sistemlere göre enerji üretiminde %30–45 arasında artış sağladıkları farklı çalışmalarda rapor edilmiştir (Beyoğlu, 2011; Garg, 2015; Nsengiyumva ve ark., 2018). Özellikle, güneşlenme süresi uzun ve ışıınım şiddeti yüksek bölgelerde (örneğin Türkiye'nin Ege ve İç Anadolu bölgelerinde), iki eksenli sistemlerin performans avantajı daha belirgindir.

Şekil 1'de, sabit açılı, tek eksenli ve iki eksenli sistemlerin tipik ışıınım eğrileri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, iki eksenli sistemler özellikle sabah ve akşam saatlerinde güneşin geliş açısını daha iyi izlediği için, gün boyunca elde edilen toplam enerji miktarını artırmaktadır.



Şekil 1. Sabit eğimli, tek ve iki eksenli güneş takip sistemlerinde ışıınım eğrileri karşılaştırması

Güneş takip sistemlerinin başarımı, büyük ölçüde kullanılan kontrol stratejisine bağlıdır. Literatürde kontrol yaklaşımları genellikle açık (open-loop) ve kapalı (closed-loop) döngülü sistem olarak ikiye ayrılmaktadır.

• **Açık döngü kontrol sistemlerinde**, güneşin konumu astronomik formüllerle hesaplanır. Güneşin azimut (ψ) ve yükseklik (α) açıları belirlenerek sistemin motorlarına önceden tanımlanmış zaman programı çerçevesinde komut gönderilir. Reda ve Andreas (2004) tarafından geliştirilen *Solar Position Algorithm (SPA)*, bu alanda referans alınan en yaygın algoritmadır. Açık döngü sistemlerin avantajı, sensör gerektirmemesi ve düşük maliyetli olmasıdır. Ancak, bulutluluk, mekanik sürüklenme ve gölgeleme gibi dış etkiler karşısında performans düşebilir (Nadia, Isa & Desa, 2018).

• **Kapalı döngü kontrol sistemlerinde** ise, LDR (Light Dependent Resistor) veya fotodiyot gibi sensörlerden alınan ışık yoğunluğu verileri kullanılarak sistem sürekli geri besleme ile güncellenir. Bu sayede panel yönelimi gerçek zamanlı olarak güneş ışığına göre ayarlanır. Melo ve ark. (2017), kapalı döngü sistemlerin bulut geçişleri sırasında dahi optimum pozisyonu koruyabildiğini, böylece izleme hatasını %0,2'ye kadar düşürdüğünü belirtmiştir.

Son yıllarda her iki yöntemin avantajlarını birleştiren hibrit kontrol sistemleri de geliştirilmiştir. Bu sistemlerde, güneşin teorik konumu açık döngü algoritmasıyla hesaplanırken, sensör verileriyle anlık düzeltme yapılmaktadır. Böylece hem enerji tüketimi azaltılmakta hem de izleme doğruluğu artırılmaktadır (Zemmit ve ark., 2025).

Güneş takip sistemlerinin performansı üzerine yapılan çalışmaların çoğu, sabit panellerle izleyici sistemleri karşılaştırmaya yöneliktir. Örneğin, Yao ve arkadaşları (2014), Çin'de yürüttükleri deneysel çalışmada, tek eksenli sistemlerin sabit panellere göre %20, iki eksenli sistemlerin ise %40 oranında daha fazla enerji ürettiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Polatçı ve Yıldız (2016) tarafından geliştirilen güneş takipli pişirme sisteminde de %17'lik performans artışı gözlenmiştir.

Türkiye özelinde yapılan araştırmalar, güneş takip sistemlerinin önemli bir enerji kazancı sağladığını ortaya koymuştur. Beyoğlu (2011), Balıkesir koşullarında yaptığı ölçümlerde iki eksenli sistemin sabit panele göre yıllık ortalama %36'dan daha fazla performansla sahip olduğunu tespit etmiştir. Etc (2022) ise PVSys yazılımı kullanarak Konya ve Van illerinde yaptığı simülasyonlarda, iki eksenli sistemlerin sabit sistemlere göre ortalama %38 oranında enerji kazancı sağladığını göstermiştir.

Yukarıda verilen literatürün dışında, farklı çalışmalarda izleme sistemlerinin maliyet-etkinlik analizlerine dikkat çekmektedir. Özellikle küçük ölçekli uygulamalarda motor, sensör ve kontrol birimlerinin ek maliyetleri yatırım geri dönüş süresini uzatabilmektedir. Ancak enerji fiyatlarının yük-

sek olduğu ülkelerde ve büyük ölçekli santrallerde bu fark, genellikle birkaç yıl içinde kendini amorti etmektedir (Okafor ve ark., 2025).

2. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİNİN KURAMSAL TEMELLERİ

Güneş takip sistemleri (GTS), güneş ışınlarının güneşin var olduğu süreç boyunca fotovoltaik panel yüzeyine dik gelecek şekilde yönlendirilmesini sağlayan mekanik, elektronik ve yazılımsal bileşenlerden oluşan bütünleşik sistemlerdir. Bu sistemlerin amacı, fotovoltaik (FV) panellerin anlık ışınım yoğunluğundan en yüksek elektrik enerjisini üretebilmesini sağlamaktır.

Güneşin konumu, Dünya'nın dönme hareketi, yörünge eğikliği ve eksenel sapması nedeniyle sürekli değişir. Bu nedenle, sabit paneller günün belirli saatlerinde optimum açıda çalışabilirken, günün geri kalanında önemli miktarda enerji kaybı yaşarlar. Güneş takip sistemleri ise bu kaybı minimize ederek, özellikle sabah ve akşam saatlerinde panele düşen ışınımın dikliğini artırır (Beyoğlu, 2011; Garg, 2015).

2.1. Güneş Geometrisi ve Konum Belirleme İlkeleri

Güneşin konumu, yeryüzündeki herhangi bir noktada belirli bir zamanda **astronomik koordinat sistemleri** aracılığıyla tanımlanabilir. Bu sistemin temel parametreleri; enlem (ϕ), boylam (λ), sapma açısı (δ), saat açısı (ω), güneş yüksekliği (α) ve azimut açısı (γ)'dir (Reda & Andreas, 2004; Nsengiyumva ve ark., 2018).

- **Sapma açısı (δ):** Güneş ışınlarının ekvator düzlemine göre yaptığı açıdır. Dünya'nın eksen eğikliği ($23,45^\circ$) nedeniyle yıl boyunca değişir ve şu şekilde hesaplanır:

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (1)$$

Burada n , yılın gün sayısını temsil eder.

- **Saat açısı (ω):** Güneşin öğle vaktinden açısal uzaklığıdır ve her bir saatlik fark için 15° değişir:

$$\omega = 15^\circ \times (t_s - 12) \quad (2)$$

Burada t_s , yerel güneş saatidir.

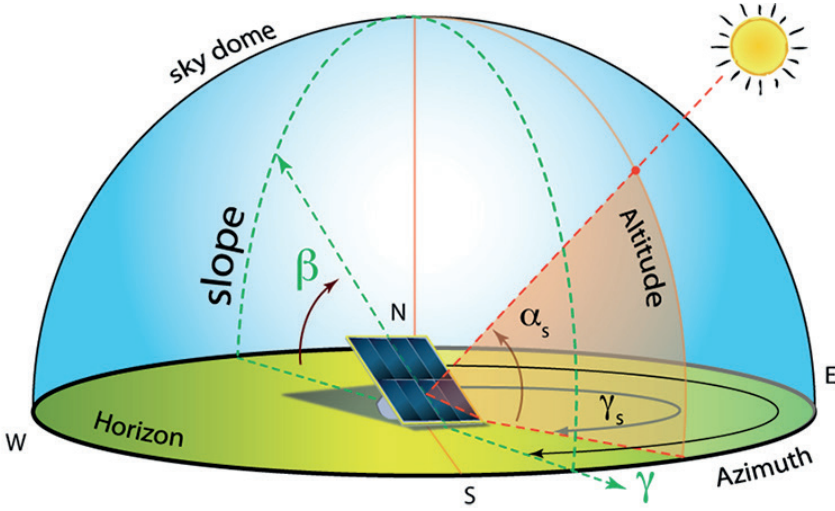
- **Güneş yüksekliği (α):** Ufuk düzlemi ile güneş ışını arasındaki açıdır:

$$\sin (\alpha) = \sin (\phi) \sin (\delta) + \cos (\phi) \cos (\delta) \cos (\omega) \quad (3)$$

- **Azimut açısı (γ):** Güneşin yatay düzlemde kuzey referansına göre ölçülen yön açısıdır:

$$\tan (\gamma)=\frac{\sin (\omega)}{\cos (\omega) \sin (\phi)-\tan (\delta) \cos (\phi)} \quad (4)$$

Bu açılar, izleme sistemlerinin yönelme algoritmalarının temelini oluşturur. Şekil 2.1’de güneş ışınlarının panel yüzeyiyle ilişkili olarak geometrik konumu gösterilmektedir.

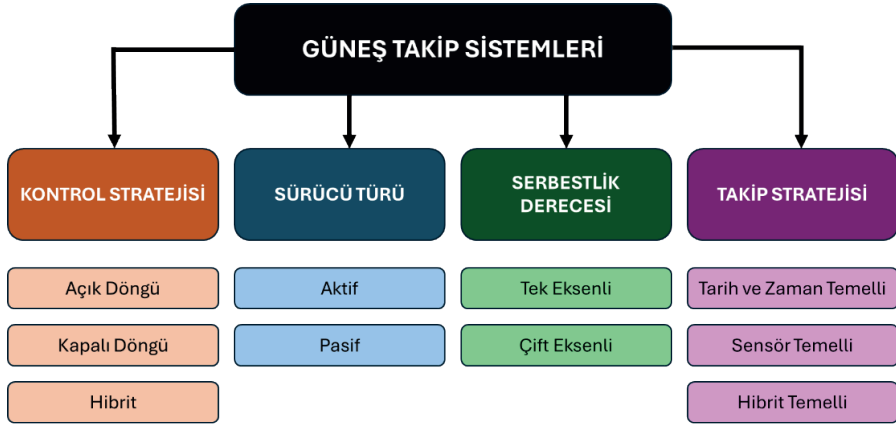


Şekil 2. Güneşin konumunu tanımlayan açılar: eğim (β), yükseklik (α) ve azimut (γ).

Bu parametrelerin doğru hesaplanması, panelin her an güneşe yönelmesini gerçekleştirmek açısından önemlidir. Özellikle iki eksenli sistemlerde, azimut ve yükseklik açılarının eş zamanlı kontrolü gerekmektedir.

2.2. Güneş Takip Sistemlerinin Sınıflandırılması

Güneş enerjisinden olabildiğince ne büyük ışınlı elde edebilmek için, güneş panellerinin gün boyunca güneşin konumuna göre yönlendirilmesi gereklidir. Bu amaçla geliştirilen güneş takip sistemleri, panel yüzeyine düşen ışınlı miktarını artırarak enerji üretimini önemli ölçüde yükseltmektedir. Literatürde güneş takip sistemleri, **kontrol stratejileri**, **sürücü türleri**, **serbestlik derecesi** ve **takip stratejileri** olmak üzere 4 ana grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 3) (Nadia, Isa & Desa, 2018; Melo ve ark., 2017).



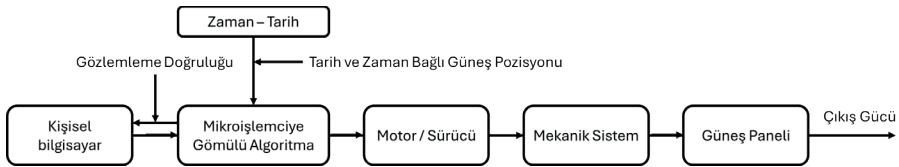
Şekil 3. Güneş takip sistemlerinin sınıflandırması

2.2.1. Kontrol Stratejilerine Göre Sınıflandırma

Güneş takip sistemlerinin kontrol stratejileri, panel yönlendirmesinin nasıl yapıldığını belirler. Temel olarak açık ve kapalı döngülü sistemler ile bunların bileşkesi olan hibrit sistemler olmak üzere üç ana başlığa ayrılmaktadır (El-Sayed et al., 2022).

• Açık Döngü Güneş Takip Sistemleri (Open-Loop Trackers):

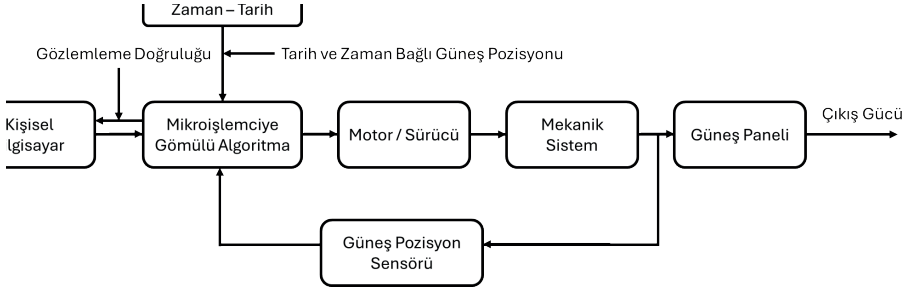
Bu sistemlerde panel yönlendirmesi, sensör verisine gerek kalmadan güneşin gökyüzündeki konumuna ilişkin matematiksel modeller yardımıyla yapılır. Konum hesaplamaları; tarih, saat, enlem ve boylam gibi astronomik parametrelere dayanır. Açık döngü güneş takip sistemlerin ön plan çıkan en önemli özelliğinin maliyetinin düşük olması ve sade yapılarıdır. Ancak, bulutlu hava koşullarında veya mekanik sapmalar durumunda doğruluk azalabilir (Kalogirou, 2014).



Şekil 4. Açık döngü kontrolüne sahip güneş takip sisteminin yapısı

• Kapalı Döngü Güneş Takip Sistemleri (Closed-Loop Trackers):

Açık döngülü güneş takip sistemlerinde, güneşin gerçek konumu **elektro-optik sensörler** (örneğin LDR – Light Dependent Resistor) ile doğrudan algılanır. Geri besleme mekanizması sayesinde panelin konumu sürekli olarak güncellenir. Kapalı döngü sistemler, yüksek doğruluk ve verim sağlar; ancak donanımsal karmaşıklık ve bakım gereksinimi yüksektir (Hafez et al., 2018).



Şekil 5. Kapalı döngü kontrolüne sahip güneş takip sisteminin yapısı

• Hibrit Sistemler (Hybrid Systems):

Açık ve kapalı döngü sistemlerin avantajlarını birleştiren hibrit kontrol sistemlerinde, güneşin konumu hem astronomik hesaplamalarla hem de sensör geri beslemeleriyle doğrulanır. Günümüzde bu sistemlerde **akıllı sürücü sistemleri** (intelligent drive systems) kullanılmaktadır. Bu sistemler:

- o Yapay Sinir Ağları (Neural Network)
- o Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

o veya bu yöntemlerin **kombinasyonu** ile optimize edilmiştir (Al-Mohamad, 2004). Bu sayede sistem, çevresel değişimlere adaptif yanıt verebilmekte ve izleme doğruluğunu artırmaktadır.

2.2.2. Sürücü Türlerine Göre Sınıflandırma

Güneş takip sistemlerinin hareket kabiliyeti, kullanılan sürücü mekanizmasına bağlıdır. Bu bağlamda iki temel sürücü tipi bulunmaktadır: aktif ve pasif sürücüler (Yılmaz & Ozgoren, 2021).

• Aktif Güneş Takip Sistemleri (Active Solar Trackers):

Aktif sistemlerde hareket, elektrik motorları veya hidrolik sistemler aracılığıyla sağlanır.

Bu sistemler genellikle üç alt grupta değerlendirilir:

1. Mikroişlemci Sürücü Sistemleri (Microprocessor Drive Systems):

Güneşin konumu, mikrodeneleyici tarafından işlenen algoritmalar yardımıyla hesaplanır.

2. Sensör Sürücü Sistemleri (Sensor Drive Systems):

Işık sensörlerinden gelen verilerle motor sürülür.

3. Sensör Temelli Mikroişlemci Sistemleri:

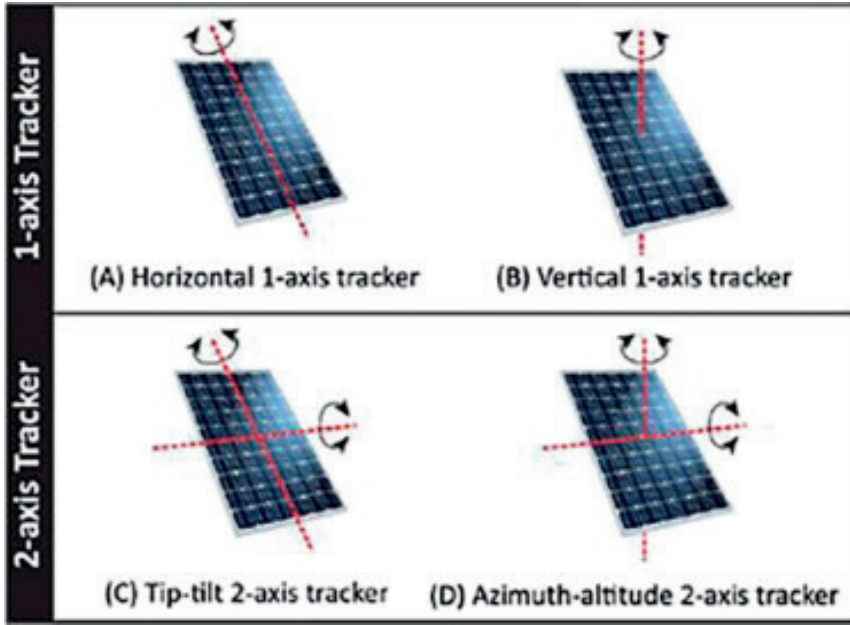
Hem sensör hem de mikroişlemci kontrolü kullanılarak yüksek doğruluk elde edilir.

• Pasif Güneş Takip Sistemleri (Passive Solar Trackers):

Bu sistemlerde herhangi bir elektriksel kontrol kullanılmaz. Panelin hareketi, ısı farkı veya gaz genleşmesi gibi fiziksel olaylarla sağlanır. Örneğin, **bimetalik termal aktüatör** veya **termohidrolik mekanizmalar**, sabah ve akşam saatlerinde panelin eğimini otomatik olarak değiştirebilir. Pasif sistemler enerji tüketmez ancak doğruluk ve tepki hızları düşüktür (Shanmugam & Christraj, 2005).

2.3. Serbestlik Derecesine Göre Sınıflandırma

Güneş takip sistemleri, panelin kaç eksenle hareket edebildiğine göre sınıflandırılır. Buna göre güneş takip sistemleri, eksenel davranışına göre **tek** ve **iki eksenli** olarak ayrılır (Şekil 6).



Şekil 6. Tek ve iki eksenli güneş takip sistemlerinin hareket prensipleri.

• Tek Eksenli Güneş Takip Sistemleri (Single Axis Trackers):

Panel, yalnızca bir eksen etrafında hareket eder. Bu eksen yatay, dikey veya eğimli olabilir. Tek eksenli sistemler, sabit sistemlere göre yaklaşık %15–25 oranında daha fazla enerji üretebilir. En yaygın türleri:

- o Yatay Eksenli Takipçi (Horizontal Axis Tracker)
- o Eğimli Eksenli Takipçi (Inclined Axis Tracker)
- o Termo-Hidrolik / Bimetalik Aktüatörlü Sistemler

• İki Eksenli Güneş Takip Sistemleri (Dual Axis Trackers):

Panel, hem yatay (azimut) hem dikey (eğim) eksenlerde hareket edebilir. Bu sistemler, güneşin gün içi ve yıl içi konum değişimlerini tamamen takip edebilir ve enerji kazancı %35–45'e ulaşabilir. Alt türleri:

- o Dikey / Azimut Eksenli Sistemler
- o Yüzeye Eğik (Surface Inclined)
- o Azimut–Eğim Kombinasyonlu Sistemler (Azimuth–Altitude)

2.4. Takip Stratejilerine Göre Sınıflandırma

Takip stratejisi, sistemin güneşi hangi yöntemle izlediğini belirler. Dört temel strateji bulunmaktadır:

1. Tarih ve Zaman Temelli Takip (Date & Time): Güneşin konumu, astronomik algoritmalarla tarih ve saat bilgisine göre belirlenir.

2. Mikrodenetleyici ve Elektro-Optik Sensörler (μP & Electro-Optical Sensors): Güneş ışığını algılayan sensörler (LDR, fotodiyot vb.) kullanılarak yönlendirme yapılır.

3. Sensör + Tarih & Zaman Kombinasyonu: Her iki yöntem bir arada kullanılarak sistem doğruluğu artırılır.

4. Hibrit (Karma) Stratejiler: Yapay zekâ, bulanık mantık veya optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı hibrit stratejilerdir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışma, iki eksenli güneş takip sistemlerinin performansını, açık ve kapalı döngüye sahip kontrol yapıları temelinde incelemek ve sabit açılı fotovoltaik sistemlerle karşılaştırmak amacıyla tasarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan tüm modeller MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş; simülasyonlar ise İzmir ilinde, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü koordinatlarını esas alan 2024 yılı içerisinde ölçülen ve saatlik bazda kaydedilen güneş ışınımı verileri kullanılarak yürütülmüştür.

3.1 Kullanılan Fotovoltaik Panel ve Elektriksel Özellikleri

Simülasyonlarda 250 W gücünde, polikristal bir fotovoltaik panel tercih edilmiştir (Tablo 1). Panelin elektriksel karakteristikleri üretici verileri dikkate alınarak modellenmiş, çalışma sıcaklığı tüm hesaplamalarda 25 °C sabit kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, farklı kontrol stratejileri arasında yalnızca takip algoritmalarından kaynaklanan farkların gözlemlenebilmesi açısından önemlidir.

Tablo 1. *Panelin elektriksel özellikleri (Electrical properties of PV panel)*

Elektriksel Özellikler	
Maksimum Güç (Pmax)	250 W
Maksimum Güç Noktası Gerilimi (Vmpp)	30,15 V
Maksimum Güç Noktası Akımı (Impp)	8,25 A
Açık Devre Gerilimi (Voc)	36,5 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	8,68 A
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ~ 85°C
Maksimum Seri Sigorta Değeri	10 A
Panel alanı (A)	1,6 m ²

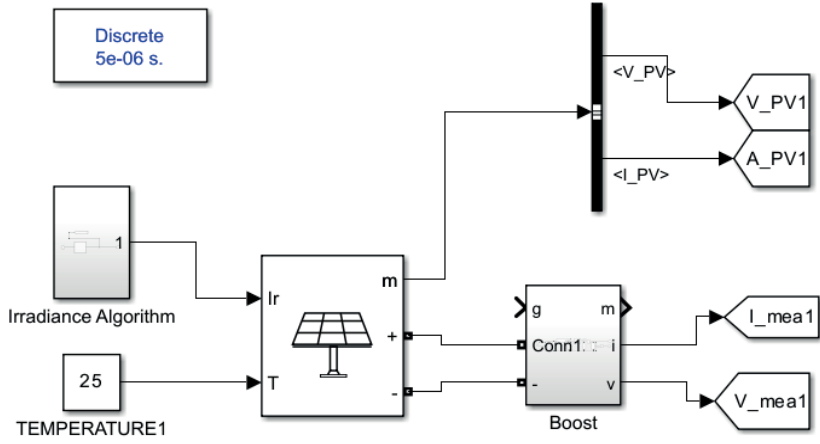
3.2 Sistem Tasarımları

Çalışmada iki eksenli güneş takip sistemleri üç farklı sistem yapılandırması oluşturulmuştur:

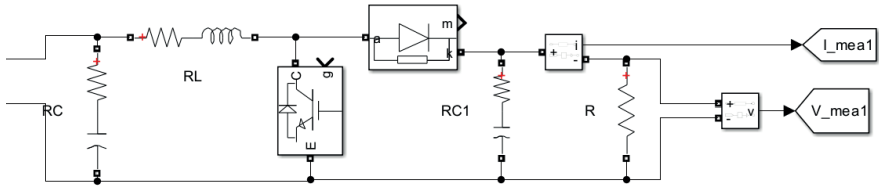
1. Açık Döngü Güneş Takip Sistemi: Bu modelde panel hareketi, güneş konumunun astronomik hesaplara dayalı olarak belirlenmesi ile sağlanmıştır. Sistemin devre şeması Şekil 7’de, sisteme ait MPPT devresi Şekil 8’de ve enerji ölçüm devresi ise Şekil 9’da verilmiştir. Kontrol birimi güneş koordinatlarına göre motor konumlarını ayarlamaktadır. Geri bildirim mekanizması bulunmadığından, sistem tamamen hesaplanan güneş konumuna bağlıdır.

2. Kapalı Döngü Güneş Takip Sistemi: Bu modelde panel hareketi, LDR sensörlerinden alınan gerçek zamanlı ışınım farkları aracılığıyla yönlendirilmektedir. Sensörlerden elde edilen veri mikrodenetleyiciye ulaşmakta, motorlar ise bu geri bildirim göre panel konumunu sürekli düzeltmektedir. Sistemin çalışma prensibi, açık döngü kontrollü güneş takip sistemin çalışma prensibine benzemektedir ancak Matlab/Simulink’te ‘irradiance algorithm’ kısmı değiştirilmiştir. Sisteme ait enerji ölçüm devresi ise Şekil 10’da verilmiştir.

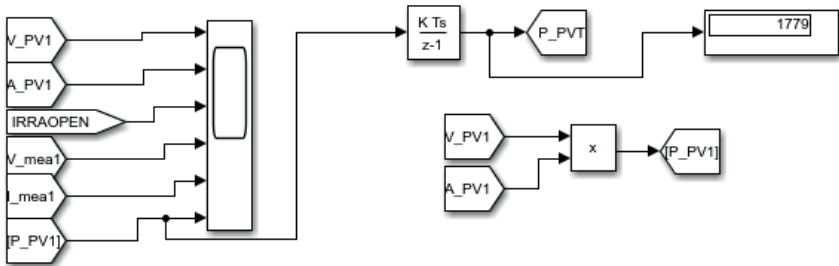
3. Sabit Açılı Fotovoltaik Sistem: Karşılaştırma amacıyla sabit eğimde yerleştirilmiş fotovoltaik panelin Simulink modeli oluşturulmuş (Şekil 11), panel gün boyunca konum değiştirmeden yalnızca gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştürmüştür. Sisteme ait enerji ölçüm devresi ise Şekil 12’de verildiği gibidir.



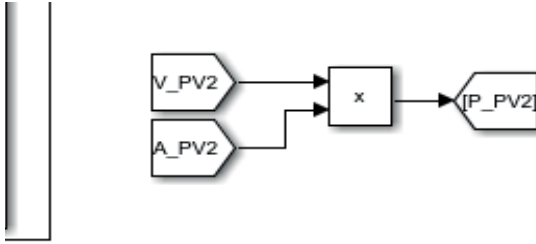
Şekil 7. Açık döngü güneş takip sistemi devre şeması



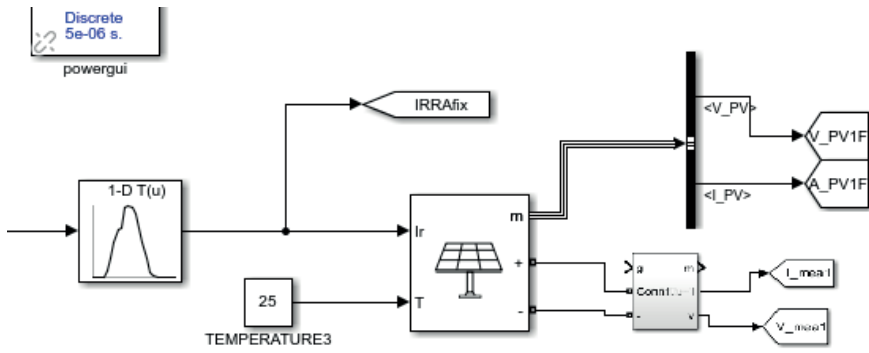
Şekil 8. Açık döngü güneş takip sisteminin MPPT devre şeması



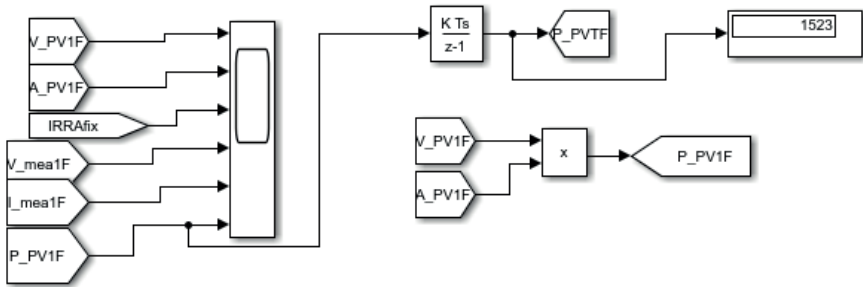
Şekil 9. Açık döngü güneş takip sisteminin enerji ölçüm devre şeması



Şekil 10. Kapalı döngü güneş takip sisteminin enerji ölçüm devre şeması



Şekil 11. Sabit açılı fotovoltaiik sistemin devre şeması



Şekil 12. Sabit açılı fotovoltaiik sistemin enerji ölçüm devre şeması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Simülasyon sonuçları, üç farklı sistemin yıllık enerji üretimleri üzerinden karşılaştırmalı bir analiz yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu sonuçların elde edilmesinde, he üç sistem içinde aynı çevresel ve elektriksel koşullar uygulanarak aşağıdaki koşulları kabul edilmiştir:

- Konum: 38.46 Enlemi, 27.24 Boylamı
- Veri Aralığı: 2024 yılına ait 365 günlük saat bazlı ışıınım verileri
- Panel gücü: 250 W
- MPPT devresi: Tüm modellerde maksimum güç noktasında çalışmayı garanti etmek için dahil edilmiştir.

Her üç sisteminde değerlendirmesi amacıyla gerçekleştirilen hesaplamalarda kullanılan ve her ayı temsil eden günler için güneş ışıınımı değerleri üç ayrı sistem için saatlik bazda hesaplanarak Tablo 2 ila Tablo 4 arasında verildiği gibidir.

Tablo 2. Sabit açılı FV sistem için güneş ışıınımı değışimi (W/m^2)

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
6	0	0	0	0	156	167	128	139	0	0	0	0
7	0	0	122	111	306	333	250	278	139	0	0	0
8	61	100	233	211	472	528	417	444	267	156	135	83
9	128	194	350	322	611	667	583	611	389	294	259	167
10	195	289	444	417	722	778	722	722	500	406	372	250
11	250	350	500	472	806	861	806	806	556	472	440	306
12	272	378	528	500	833	889	850	833	583	500	479	333
13	255	361	517	489	822	878	833	822	567	489	466	322
14	211	306	456	433	750	806	767	750	500	417	372	250
15	139	211	361	350	611	667	639	611	389	322	258	167
16	78	122	250	250	444	500	489	444	250	211	149	89
17	0	0	139	139	278	306	322	267	139	0	0	0
18	0	0	0	0	139	156	167	0	0	0	0	0

Tablo 3. Açık döngü güneş takip sistemi için güneş ışıınımı değişimi (W/m^2)

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
6	0	0	0	0	183	198	148	166	0	0	0	0
7	0	0	144	131	361	396	305	333	166	0	0	0
8	71	118	275	252	566	631	514	525	319	183	131	98
9	146	229	413	384	733	798	723	733	465	346	252	198
10	226	341	525	497	866	932	898	866	598	480	361	298
11	290	413	598	566	967	1 030	998	967	665	566	427	361
12	316	447	631	598	998	1 063	1 050	998	699	598	465	396
13	304	427	617	584	985	1 050	1 040	985	680	584	452	383
14	250	361	541	517	899	967	948	899	598	497	361	298
15	169	250	427	417	733	798	799	733	465	386	250	198
16	92	144	298	298	525	598	584	525	298	250	144	105
17	0	0	166	166	333	361	386	319	166	0	0	0
18	0	0	0	0	166	183	198	0	0	0	0	0

Tablo 4. Kapalı döngü güneş takip sistemi için güneş ışıınımı değişimi (W/m^2)

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
6	0	0	0	0	189	198	153	171	0	0	0	0
7	0	0	148	135	372	396	314	343	171	0	0	0
8	74	122	283	259	582	631	530	541	329	189	135	101
9	150	236	426	395	755	798	745	755	479	356	259	205
10	233	352	541	512	893	932	926	893	615	494	372	307
11	298	426	615	582	998	1 030	1 030	998	684	582	440	372
12	325	461	649	615	1 030	1 063	1 085	1 030	719	615	479	408
13	312	440	635	601	1 016	1 050	1 070	1 016	700	601	466	395
14	257	372	558	531	926	967	976	926	615	512	372	307
15	175	258	440	428	755	798	824	755	479	398	258	205
16	95	149	307	305	541	598	603	541	307	258	149	108
17	0	0	171	171	343	361	398	329	171	0	0	0
18	0	0	0	0	171	183	205	0	0	0	0	0

Her ayı temsil eden günler için üç sistemden elde edilen saatlik elektrik enerjisi miktarları ise Tablo 5 ila Tablo 7 arasında verildiği gibidir.

Tablo 5. Sabit açılı FV sistemden elde edilen elektrik enerjisi (Wh)

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
6	0	0	0	0	28	30	23	25	0	0	0	0
7	0	0	22	20	55	60	45	50	25	0	0	0
8	11	18	42	38	85	95	75	80	48	28	20	15
9	23	35	63	58	110	120	105	110	70	53	38	30
10	35	52	80	75	130	140	130	130	90	73	55	45
11	45	63	90	85	145	155	145	145	100	85	65	55
12	49	68	95	90	150	160	153	150	105	90	70	60
13	46	65	93	88	148	158	150	148	102	88	68	58
14	38	55	82	78	135	145	138	135	90	75	55	45
15	25	38	65	63	110	120	115	110	70	58	38	30
16	14	22	45	45	80	90	88	80	45	38	22	16
17	0	0	25	25	50	55	58	48	25	0	0	0
18	0	0	0	0	25	28	30	0	0	0	0	0
Toplam	286	416	702	665	1251	1356	1255	1211	770	588	431	354

Tablo 6. Açık döngü güneş takip sisteminden elde edilen elektrik enerjisi (Wh)

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
6	0	0	0	0	36	40	30	33	0	0	0	0
7	0	0	29	26	72	80	61	68	33	0	0	0
8	14	23	55	50	112	128	103	108	63	36	26	19
9	29	46	83	76	145	162	145	148	93	70	50	39
10	45	68	106	100	170	190	180	175	120	98	72	58
11	58	83	120	115	190	210	200	195	133	115	86	72
12	63	90	126	123	198	218	210	200	140	123	93	79
13	60	86	123	120	195	215	208	198	136	119	90	76
14	49	72	108	106	178	198	190	180	120	103	72	58
15	33	50	86	85	145	162	160	145	93	79	50	39
16	18	29	60	61	105	120	121	105	60	51	29	21
17	0	0	33	34	65	75	80	65	33	0	0	0
18	0	0	0	0	33	38	41	0	0	0	0	0
Toplam	369	547	929	896	1644	1836	1729	1620	1024	794	568	461

Tablo 7. *Kapalı döngü güneş takip sisteminden elde edilen elektrik enerjisi (Wh)*

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
6	0	0	0	0	40	45	34	37	0	0	0	0
7	0	0	32	29	79	88	68	75	36	0	0	0
8	15	25	60	54	122	140	113	118	69	40	28	21
9	31	50	90	83	158	178	160	162	101	76	54	42
10	49	74	115	109	185	208	198	192	130	106	78	63
11	63	90	130	125	207	230	220	214	145	125	93	78
12	68	98	136	133	215	238	230	220	152	134	101	86
13	65	94	133	130	212	235	228	218	148	130	98	83
14	53	78	117	115	193	217	208	198	130	111	78	63
15	36	55	94	93	158	178	175	160	102	88	55	42
16	20	32	66	68	115	132	133	116	67	58	32	23
17	0	0	37	39	73	84	89	73	38	0	0	0
18	0	0	0	0	38	44	48	0	0	0	0	0
Toplam	400	596	1010	978	1795	2017	1904	1783	1118	868	617	501

Açık ve kapalı döngü güneş takip sistemlerinin yanı sıra sabit açılı foto-voltaik sistem için aylık ortalama günlük toplamda üretilen elektrik enerjisi miktarları ve birbirlerine göre üretim performans değişimleri hesaplanarak Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Sistemlerden elde edilen elektrik enerjisi ve karşılaştırma (Wh/gün)

Aylar	Sabit Açılı FV Sistem (Wh/gün)	Açık Döngü GTS	Kapalı Döngü GTS	Değişim		
				Sabit – A.GTS (%)	Sabit –K.GTS	A.GTS – K.GTS
Ocak	286	369	400	29,02	39,86	8,40
Şubat	416	547	596	31,49	43,27	8,96
Mart	702	929	1010	32,34	43,87	8,72
Nisan	665	896	978	34,74	47,07	9,15
Mayıs	1251	1644	1795	31,41	43,49	9,18
Haziran	1356	1836	2017	35,40	48,75	9,86
Temmuz	1255	1729	1904	37,77	51,71	10,12
Ağustos	1211	1620	1783	33,77	47,23	10,06
Eylül	770	1024	1118	32,99	45,19	9,18
Ekim	588	794	868	35,03	47,62	9,32
Kasım	431	568	617	31,79	43,16	8,63
Aralık	354	461	501	30,23	41,53	8,68

Açık döngü sistem, sabit açılı FV sisteme göre yıl boyunca belirgin bir performans üstünlüğü göstermiştir. En düşük artış ocak ayında (%29,02), en yüksek artış ise temmuz ayında (%37,77) kaydedilmiştir. Yıllık ortalamada açık döngü sistemin %33,73 daha fazla enerji ürettiği hesaplanmıştır.

Kapalı döngü sistem için de sabit açılı FV sisteme göre benzer bir performans eğilimi gözlenmiştir. Bu sistem sabit panele kıyasla yıl boyunca %39,86 ile %51,71 arasında değişen oranlarda ek üretim sağlamış ve yıllık toplamda %46,33 daha yüksek verimlilik sunmuştur.

Aylık bazda iki sistem arasındaki fark düşük olmakla birlikte, kapalı döngü kontrolün yıl boyunca açık döngü kontrol yapısına göre %8,40-10,12 aralığında daha verimli olduğu görülmüştür. Bu fark özellikle atmosferik kırılma, bulutlanma etkisi, zamansal sapmalar gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Kapalı döngü sistemlerinin güneş ışınımını sensör bazlı gerçek ışınımın algılanması ve hatayı ölçerek düzeltmesi nedeniyle açık döngü sistemine göre daha doğru konumlandırmasından kaynaklanmaktadır.

4.4 Tartışma

Bu çalışmada, üç farklı sistemin (sabit panel, iki eksenli açık döngü kontrollü ve iki eksenli kapalı döngü kontrollü) yıllık performansları karşılaştırılmış ve sistemlerin enerji üretim kapasiteleri aylık bazda analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, güneş takip sistemlerinin sabit açılı sistemlere göre daha yüksek enerji üretimine olanak tanıdığını göstermektedir. Ancak bu verim artışının büyüklüğü, kullanılan kontrol tekniğine, sensör yaklaşımına, atmosferik koşullara ve güneş konumunun doğrulukla belirlenmesine bağlı olarak değişmektedir.

Açık döngü sistemler, güneş konumu hesaplamalarını astronomik modeller üzerinden yapmaktadır. Bu modeller literatürde yüksek doğrulukla- rıyla bilinmekte olup Reda & Andreas (2004) algoritması ile hata oranlarının $0,05^\circ$ seviyesine kadar düşürülebildiği ifade edilmektedir. Bu nedenle, ideal koşullarda kapalı döngü sistemler oldukça yüksek yönlendirme doğruluğu sağlar.

Çalışmada kapalı döngü kontrolün açık döngüye göre yıl boyunca ortalama %9,42 oranında daha verimli olmasının temel nedeni, kullanılan yılın ışıınım verilerinde bulutlanmanın düşük olmasıdır. İki önemli kavram ortaya çıkmaktadır:

1. Sensör bağımlılığı olan kapalı döngü sistemler, geçici bulutlanma, düşük ışıınım ve sensör doygunluk aralıklarında hassas veya gecikmesiz yönlendirme yapabilir.

2. Sensörlerin gece-gündüz geçişlerini algılama şekli, özellikle gün doğumu ve batım zamanlarında açık döngüye göre daha hassas izlemeye yol açabilir.

Dolayısıyla kapalı döngü sistemler, ışıınının düşük olmasına rağmen sensörlerin kararlı çalışmasından dolayı gün geçişlerinde daha tutarlı bir davranış sergilemiştir.

Açık ve kapalı döngü kontrollü sistemlerin sabit panele kıyasla %30 civarında daha yüksek yıllık enerji üretmesi, literatür ile uyumludur. Beyoğlu (2011) ile Yao vd. (2014), iki eksenli sistemlerin sabit panellere kıyasla %30–45 daha yüksek üretim sağlayabileceğini belirtmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen MATLAB/Simulink modelinin hassasiyetini artırmak için aşağıdaki durumları dikkate etmek gerekir.

- Çalışmada yalnızca 250 W'lık tek bir panel kullanılmıştır. Panel boyutu küçüldükçe, sistemin mekanik ve yönlendirme etkinliğinden elde edilen relatif kazanç düşmektedir.

- İzmir gibi daha ılıman ve yüksek ışıınıma sahip bölgelerde sabit panelin performansı zaten yüksek olduğundan, takipten elde edilen göreceli artış

azalabilmektedir.

- Gün içindeki gerçek bulutlanma ve atmosferik koşullar yıl bazında kararlı olduğunda, takip sistemlerinin avantajı daha ılımlı kalabilmektedir.

Bununla birlikte özellikle sabit sistemlere göre iki eksenli güneş takip sistemlerinin yılın genelinde %30-45 aralığında görülen verim artışı, güneşin yüksek konumda olduğu yaz aylarında iki eksenli takip sistemlerinin daha etkin çalıştığını göstermektedir. Güneşin zenit açısının küçüldüğü, yani panel ile ışın arasındaki dik açının ideal olduğu bu dönemler, takip sistemlerinin avantajının maksimuma ulaştığı zaman dilimleridir.

Çalışmada açık döngü sistemin yıl boyunca kapalı döngüye göre yalnızca %0,3–0,5 aralığında daha yüksek verim sunması, kontrol teknikleri arasındaki farkın teorik olarak daha yüksek olmasına rağmen pratikte dar bir aralıkta kalabileceğini göstermektedir. Bunun nedenleri şu şekilde değerlendirilebilir:

- Kapalı döngü sensörlerinin tepkime süresi oldukça hızlıdır ve ışınlımdaki ani değişimleri doğrudan algılar.

- Açık döngü sistemler, yalnızca astronomik konum hesaplarına bağlı olduğundan, atmosferik koşullardan bağımsız çalışırlar; bu özellik sistemin kararlılığını artırır.

- Kapalı döngü kontrolün bulutlu hava içinde gecikme yaşaması bazı günlerde dezavantaj yaratmış olsa da çalışmanın yapıldığı yılın Işınım profili oldukça istikrarlıdır; bu durum açık sistem lehine olan farkı azaltmıştır.

Bu nedenle iki sistemin yıllık performansı arasında yaklaşık %10'luk bir fark olduğu açıkça görülmektedir. Çalışmanın yalnızca tek bir panel üzerinde yürütülmüş olması, sonuçların özellikle verim yüzdesi anlamında sınırlı kalmasına yol açmıştır. Çok panelli sistemlerde:

- Motor hareketi, panel alanı arttıkça daha fazla enerji kazancına karşılık gelir,
- Güneşin izlenmesiyle elde edilen kazanç panel sayısı arttıkça katlanarak büyür,
- Gölgeleme, panel yerleşim geometrisi ve mekanik yapı gibi faktörlerin sistem verimine etkisi daha belirgin hale gelir.

Dolayısıyla büyük ölçekli bir PV sahasında açık ve kapalı döngü kontrol arasındaki farkın daha görünür olması beklenmektedir.

5. SONUÇLAR

5.1 Sonuçlar

Bu çalışma, İzmir koşullarında iki eksenli güneş takip sistemlerinin performansını, açık ve kapalı döngü kontrol yapıları üzerinden kapsamlı bir

biçimde karşılaştırmıştır. MATLAB/Simulink modelleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda şu temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Hem açık hem kapalı döngü kontrollü iki eksenli takip sistemleri, sabit açılı panellere kıyasla ortalama %30-40 civarında daha yüksek yıllık elektrik üretimi sağlamaktadır.
- Kapalı döngü sistem, yıl boyunca açık döngü sisteme göre ortalama %10 civarında daha verimli çalışmıştır.
- Bulutlanmanın düşük olduğu dönemlerde kapalı döngü sistemler daha doğru yönlenme sağlarken, atmosferik değişkenliğin yüksek olduğu günlerde açık döngü sistemlerin avantaj sağlayabileceği değerlendirilmektedir.
- Tek bir 250 W panel üzerinden yapılan modelleme, sistemler arasındaki farkları göstermek açısından yeterli olsa da, büyük ölçekli uygulamalarda verim farklarının daha belirgin hale geleceği öngörülmektedir.
- Kapalı döngülü sistemler küçük ve orta ölçekli PV sistemler için daha efektif iken, açık döngülü sistemler büyük kurulum gücüne sahip PV sistemler için uygundur.

5.2 Öneriler

- Farklı coğrafi bölgeler ve iklim koşulları için benzer karşılaştırmalar yapılmalı, özellikle bulutlanma oranı yüksek bölgelerde kapalı döngü sistemlerin davranışı daha ayrıntılı incelenmelidir.
- Sistemlerin gerçek zamanlı performansını etkileyen gölgeleme, rüzgâr yükü, kirlenme (soiling) gibi parametreler gelecekteki çalışmalara dahil edilmelidir.
- Büyük kapasiteli PV santrallerde iki eksenli takip sistemlerinin enerji getirisinin yatırım maliyetine oranı analiz edilerek ekonomik fizibilite çalışmaları yürütülmelidir.
- Farklı MPPT algoritmalarının (GWO, WOA vb.) takip sistemleriyle birlikte değerlendirilmesi, toplam sistem verimini artırma potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Beyoğlu, M. F. (2011). *Balıkesir ilinde çift eksenli güneş takip sistemi ile sabit eksenli PV sistemin verimlerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chong, K. K., & Wong, C. W. (2010). General formula for on-axis sun-tracking system. *Solar Collectors and Panels: Theory and Applications*, 444–460.
- Etcı, A. (2022). *PVSYST programı ile modellenen Konya ve Van illerinde GES santrallerinin üretim verilerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.
- Garg, A. (2015). Solar tracking: An efficient method of improving solar plant efficiency. *International Journal of Electrical and Electronics Engineers*, 7(1), 199–203.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 62). *Progress in Photovoltaics*, 31(1), 3–14.
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. Paris: International Energy Agency.
- IEA PVPS. (2024). *Snapshot of Global PV Markets 2024*. Photovoltaic Power Systems Programme.
- Liu, Z., Wang, J., & Xu, M. (2022). Global renewable energy transitions and carbon neutrality pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112–734.
- Markvart, T. (2000). *Solar electricity* (Vol. 6). John Wiley & Sons.
- Melo, A. G., Oliveira Filho, D., Junior, M. M. O., Zolnier, S., & Ribeiro, A. (2017). Development of closed and open loop solar tracker technology. *Acta Scientiarum. Technology*, 39(2), 177–183.
- Nadia, A. R., Isa, N. A. M., & Desa, M. K. M. (2018). Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2548–2569.
- Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., & Chen, X. (2018). Recent advancements and challenges in solar tracking systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 250–279.
- Okafor, P. U., Abonyi, D. O., & Arinze, S. N. (2025). Experimental investigation of solar tracking system for optimizing photovoltaic efficiency in Nigeria. *International Research Journal in Applied Sciences and Engineering*, 13, 51–67.
- Polatçı, H., & Yıldız, A. K. (2016). Güneş takip sistemli bir güneş enerjili pişirici geliştirilmesi ve performansının belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(2), 137–142.
- Reda, I., & Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 76(5), 577–589.
- Zemmit, A., Loukriz, A., Belhouchet, K., Alharthi, Y. Z., Alshareef, M., & Ghoneim,

- S. S. (2025). GWO and WOA variable step MPPT algorithms-based PV system output power optimization. *Scientific Reports*, 15, 1–21.
- Yao, Y., Hu, Y., Gao, S., Yang, G., & Du, J. (2014). A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. *Renewable Energy*, 72, 88–98.



**KÜRESELDE ENERJİ DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİNDEKİ
YATIRIM EĞİLİMLERİ VE TÜRKİYE**

“ ”

Fatmanur ATEŞ¹
Ramazan ŞENOL²

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

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

1. Giriş

Bu çalışmada yenilenebilir enerji dönüşüm teknolojilerindeki yatırım eğilimleri ve ülkemizdeki durum ele alınmıştır. Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı, elektrik sistemlerinde esnek kaynaklara olan ihtiyacı artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en geç 2026 yılı ortalarına kadar hidroenerjinin kullanılabilirliğine bağlı olarak, kömürü geçmesi ve küresel ölçekte önde gelen elektrik üretim kaynağı olması beklenmektedir. Bu kapsamda genel olarak yenilenebilir enerji teknolojilerinin küresel durumu ve fotovoltaik sistemlerin detaylı analizi ele alınacaktır.

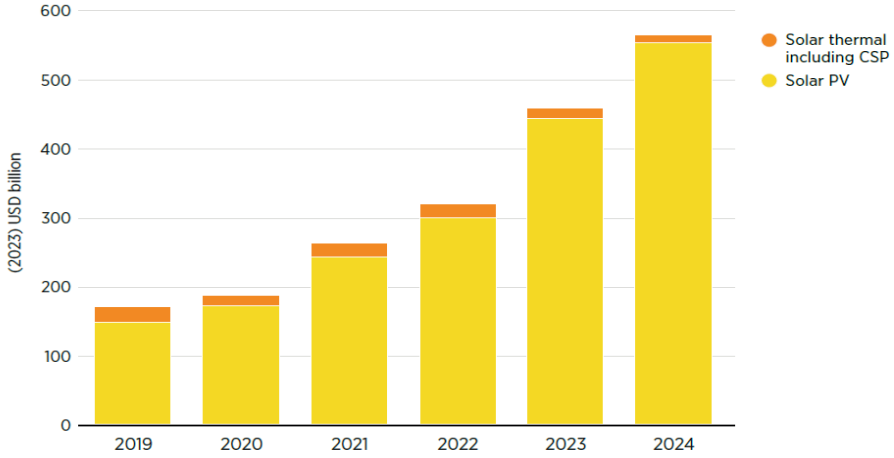
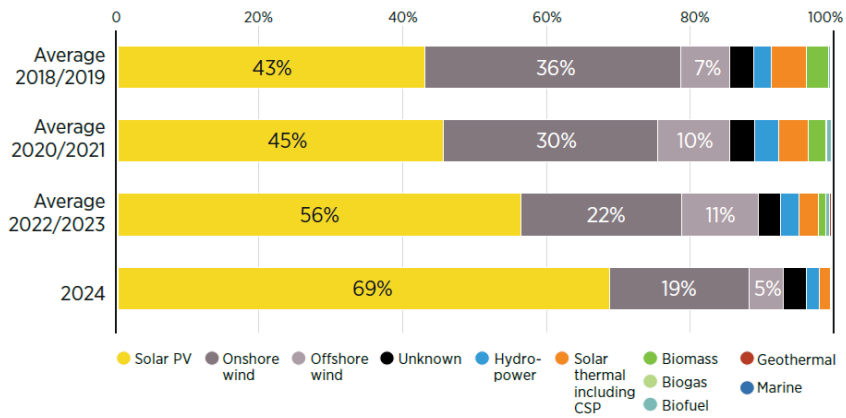
2. Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Yenilenebilir enerjiye yapılan küresel yatırımlar projelerin nihai yatırım kararlarına göre 2024 yılında, 2022/2023 yıllık ortalamasına nazaran %22 artarak 807 milyar ABD dolarına ulaşmıştır. Yenilenebilir enerjiye yapılan mevcut yatırım seviyeleri, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kapasitesinin üç katına çıkarılarak 11,2 teravat (TW) seviyesine çıkarılması çağrısına uygun olması için gerekenin yaklaşık yarısı kadardır (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

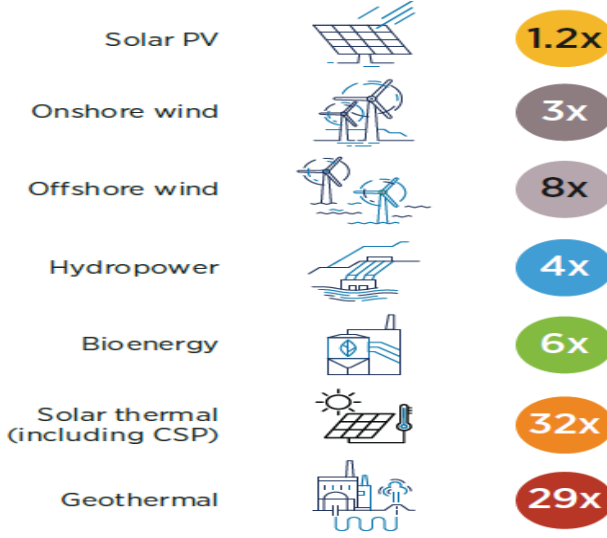
2023 yılı itibariyle son on yılda sera gazı emisyonlarının azaltılmasında elde edilen başarı, küresel sıcaklık artışının bu yüzyılda Paris Anlaşması hedefleri doğrultusunda sanayi öncesi seviyelerin 1,5°C'si ile sınırlandırılıp sınırlandırılmayacağını belirleyecektir. **IRENA'nın (International Renewable Energy Agency - Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)** Dünya Enerji Dönüşümleri görünümünde ortaya koyduğu 1,5°C Senaryosu, 2050 yılına kadar 1,5°C hedefine ulaşmak için bir yol sunmakta ve yenilenebilir enerji, temiz hidrojen ve sürdürülebilir biyokütle ile sağlanan elektrikleendirme ve verimliliği temel itici güçleri olarak görmektedir (International Renewable Energy Agency, 2023).

2.1. Güneş Teknolojileri

Fotovoltaik yatırımları, 2024 yılında 554 milyar ABD doları ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşarak, 2022/2023 dönemine göre %49'luk bir artış göstermiş ve 2018/2019 döneminde COVID-19 pandemisi öncesinde yapılan yatırım miktarının üç katından fazla olmuştur (Şekil 1). Sonuç olarak, fotovoltaik yatırımları, 2022/2023 dönemindeki %56'luk paya kıyasla, 2024 yılında toplam yenilenebilir enerji yatırımlarının %69'unu oluşturmuştur (Şekil 2). Hem kamu hizmetleri ölçeğindeki hem de küçük ölçekli projeler için önemli maliyet düşüşleriyle birlikte politika desteği, bu büyümeye katkıda bulunmuştur.

Figure 2.5 Annual investments in solar energy technologies (power and end use), 2019-2024**Şekil 1.** Güneş enerjisi teknolojilerine yapılan yıllık yatırımlar (güç ve son kullanım), 2019-2024 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).**Figure 2.4** Share of global renewable energy investments by technology, 2018-2024**Şekil 2.** Teknolojiye göre küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının payı, 2018-2024 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

Şekil 3'te verilen IRENA'nın 1,5°C Senaryosu incelendiğinde, fotovoltaik sistemler, mevcut yatırım seviyelerinin IRENA'nın 1,5°C Senaryosu ile hemen hemen aynı seviyede olduğu tek yenilenebilir enerji teknolojisi olduğu görülmekte ve 2024 yatırım seviyeleri 2030 yılına kadar ihtiyaç duyulan yıllık ortalamaya oldukça yakın görünmektedir (International Renewable Energy Agency, 2025).



Şekil 3. IRENA'nın 1,5°C Senaryosunda yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik küresel yatırım ihtiyaçları, 2024 ile 2025-2030 ihtiyaçları arasındaki karşılaştırma (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

Fotovoltaik sistemlerin bu seviyelere oldukça yakın olmasındaki en büyük etken, fotovoltaik sistemlerin son on yılda hızla düşen maliyetleri ve küresel çapta yaygın politika desteğiyle yönlendirilmeleridir. Gelişmekte olan pek çok ülke ekonomisinde, şebeke tabanlı enerjinin güvenilir olmaması, erişilememesi veya karşılanamaması durumlarında, şebeke tabanlı enerjiye alternatif olarak dağıtık (örneğin çatı üstü güneş enerjisi) fotovoltaik sistemlerin benimsenmesini daha da kolaylaştırmaktadır. Şebeke dışı fotovoltaik sistem çözümleri bu durumda büyük bir öneme sahiptir ve özellikle Sahra Altı Afrika'da olmak üzere dünya genelinde milyonlarca insanın elektriğe erişmesine yardımcı olmaktadır (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

2.2 Yenilenebilir Enerji Yatırımlarının Ekonomilere Göre Analizi

Ekonomik kalkınmanın, kurumsal kapasitenin, dayanıklılığın ve gelir düzeylerinin yatırım düzeylerini nasıl etkilediğini anlamak için alternatif bir yaklaşım sunmak amacıyla küresel yenilenebilir enerji yatırımlarını gelir gruplarına göre analiz etmek faydalı olacaktır. Tablo 1 incelendiğinde beş gelir grubu ele alınmakta olup Türkiye 3.grupta ele alınmıştır.

Tablo 1. Ülke gruplarına göre küresel nüfus, GSYİH ve yenilenebilir enerji yatırımlarının payları, 2024 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

Kalkınma durumuna göre ülke grupları	Küresel nüfus içindeki payı (%)	Küresel GSYİH'nın payı (%)	Küresel yenilenebilir enerji yatırımının payı (%)	Kişi başına yenilenebilir enerji yatırımı (USD)
Gelişmiş ekonomiler	17	61	34	201
Çin	17	18	44	248
G20 EMDE'leri (Çin hariç)	28	12	12	42
G20 dışı EMDE'ler	24	8	9	35
Az gelişmiş ülkeler (LDCs)	13	1	2	17

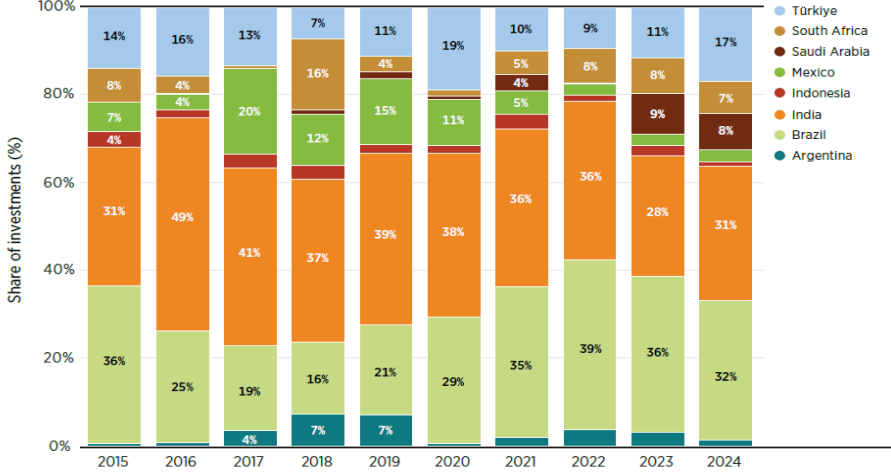
EMDE = yükselen piyasa/gelişmekte olan ekonomi;

LDC = en az gelişmiş ülke.

Gelişmiş ekonomiler: Dünya nüfusunun %17'sini ve küresel GSYİH'nin %61'ini oluşturan elli üç ülke, 2024 yılında yenilenebilir enerji yatırımlarında 271 milyar ABD dolara ulaşarak küresel toplamın %34'ünü elde etmiştir (Tablo 1). Yatırımlara Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nin öncülük ettiği görülmektedir.

Çin: 2024 yılında küresel yatırımların %44'ünü Çin'in oluşturduğu görülmektedir.

G20'deki diğer sekiz gelişmekte olan ekonomi (GOÜ): Arjantin, Brezilya, Hindistan, Endonezya, Meksika, Suudi Arabistan, Güney Afrika ve Türkiye olup, dünya nüfusunun %28'ini ve Gayri safi yurtiçi hasıla'nın (GSYİH) %12'sini temsil ederek yenilenebilir enerji yatırımlarının %12'sini oluşturmuştur. Bu sekiz G20 gelişmekte olan ekonomisinden Brezilya ve Hindistan, toplam yatırımların payına hakim olmaya devam ederken, Türkiye'nin en fazla yıllık dalgalanmaları yaşadığı görülmektedir (Şekil 4).

Figure 2.14 G20 EMDEs excluding China, share of renewable energy investments by country, 2015-2024

Based on: (CPI, 2025). Investments for 2024 are estimates based on 2023 CPI data and 2023-2024 trends from (BNEF, 2025a).

Şekil 4. Çin hariç G20 GOÜ'leri, ülkelere göre yenilenebilir enerji yatırımlarının payı, 2015-2024 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

Dünya nüfusunun yaklaşık %37'si, G20 ülkeleri hariç, gelişmekte olan ülkelerde (GOÜ) yaşamaktadır. Bu 150'den fazla G20 dışı gelişmekte olan ülke olup (44'ü az gelişmiş ülke) 2024 yılında dünyadaki yenilenebilir enerji yatırımlarının yalnızca %11'ini almıştır. Yatırımların bu küçük payı bile Şili, Kenya, Pakistan, Özbekistan ve Vietnam gibi birkaç pazarda yoğunlaşmıştır. Özellikle az gelişmiş ülkeler, dünya nüfusunun %13'üne ev sahipliği yaparken, 2024 yılında küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının yalnızca %2,2'sini almışlardır.

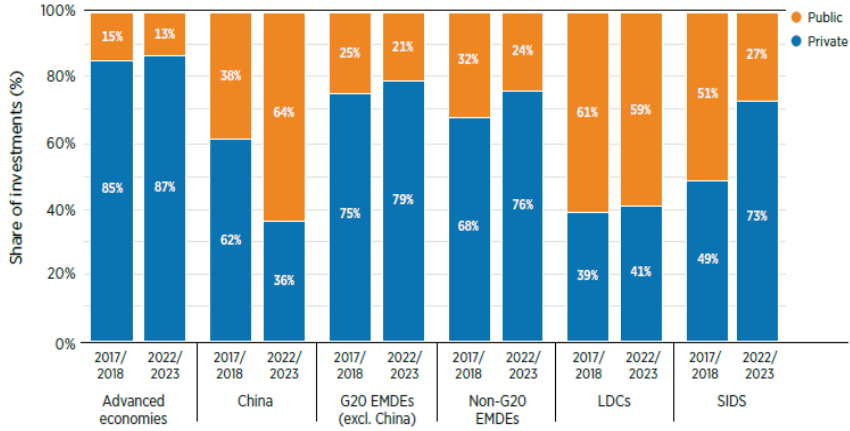
2.3 Yatırım Kaynağına Göre Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Küresel olarak, kamu sektörü 2022/2023 döneminde toplam yenilenebilir enerji yatırımlarının %40'ını oluştururken, bu oran 2017/2018 döneminde %31'di ve bu durum büyük ölçüde Çin'deki gelişmelerden kaynaklanıyordu. Çin hariç tutulduğunda, kamu yatırımları toplam yatırımların yalnızca %17'sini oluştururken, bu oran 2017/2018 döneminde %28'di. Bu durum, Çin dışındaki çoğu ülkede özel yatırımların baskınlığını göstermektedir.

2.3.1 Farklı Bağlamlarda Yatırım Kaynakları

Bu bölüm, dört ana grup altında temsil edilen farklı bağlamlardaki (kamu ve özel) yatırım kaynaklarını incelemektedir. Bunlar; Çin, gelişmiş ekonomiler, Çin hariç G20 gelişmekte olan ülkeler ve G20 dışı gelişmekte olan ülkelerdir. Analiz ayrıca, kırılganlıkları ve belirli yatırım zorlukları göz önünde bulundurularak, az gelişmiş ülkeler ve küçük ölçekli ülkeler için belirli eğilimlere odaklanmaktadır.

Figure 3.1 Share of public and private investment in renewable energy by country group, 2017/2018 and 2022/2023 annual average



Based on: (CPI, 2025a).

Notes: EMDE = emerging and developing economy; LDC = least-developed country; SIDS = small island developing states.

EMDE = Yükselen ve gelişmekte olan ekonomi;

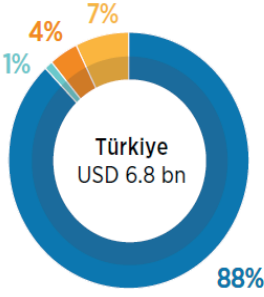
LDC = En az gelişmiş ülke;

SIDS = Küçük ada gelişmekte olan devletler.

Şekil 5. Ülke grubuna göre yenilenebilir enerjiye yönelik kamu ve özel yatırım payı, 2017/2018 ve 2022/2023 yıllık ortalaması (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

G20 gelişmekte olan ülkeler (Çin hariç), küresel etki odaklı sermayenin %24'ünü (2,6 milyar ABD doları) almıştır. Bu oranın %61'lik bölümünü 2022/2023 döneminde Brezilya Kalkınma Bankası tarafından yurt içinde sağlanan yatırımlar sayesinde Brezilya almıştır. İkinci en büyük pay Hindistan (%12), ardından Güney Afrika (%10) ve Türkiye (%9,7) olmuştur (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

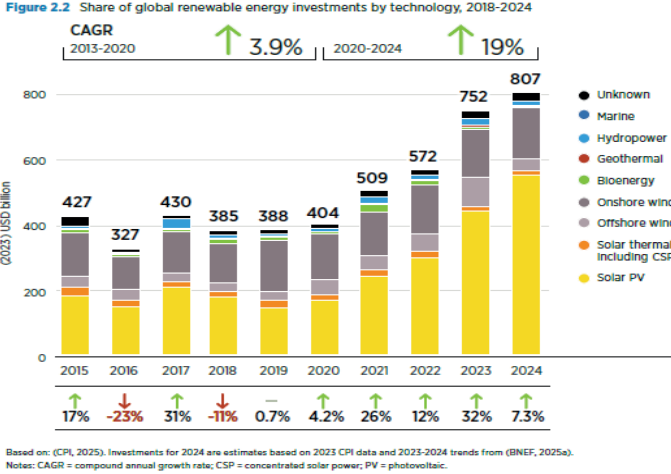
Türkiye'de göre yenilenebilir enerjiye yönelik kamu ve özel yatırım payı incelendiğinde yurt içi özel girişimlerin %88 gibi bir oranla baskın olduğu görülmekte ve bu durum şekil 6'da verilmektedir.



- Özel yurt içi
- Kamu iç işleri
- Özel uluslararası
- Kamu uluslararası

Şekil 6. Türkiye’de yenilenebilir enerjiye yapılan kamu, özel ve uluslararası ve yerel yatırımların payı, 2022/2023 yıllık ortalaması (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

2024 yılında, yenilenebilir enerjiye yapılan küresel yatırımlar 807 milyar ABD doları ile rekor seviyeye ulaşmış olsa bile, yıllık büyüme yavaşlamıştır (Şekil 7). Yıllık yatırımlar, 2024 yılında yalnızca %7,3 artarken, ABD Enflasyon Azaltma Yasası, AB’nin REPowerEU ve Çin’in on dördüncü Beş Yıllık Yenilenebilir Enerji Planı’nın yürürlüğe girdiği 2023 yılında bu oran %32 idi. Bu yavaşlama kısmen, bu politikalar kapsamında sunulan teşviklerden kaynaklanan ilk yatırım artışının normale dönmüş olabileceği gerçeğiyle açıklanabilir. Ayrıca, özellikle rüzgâr sektöründeki izin sorunları ve şebeke bağlantı sıralamaları da yavaşlamaya katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

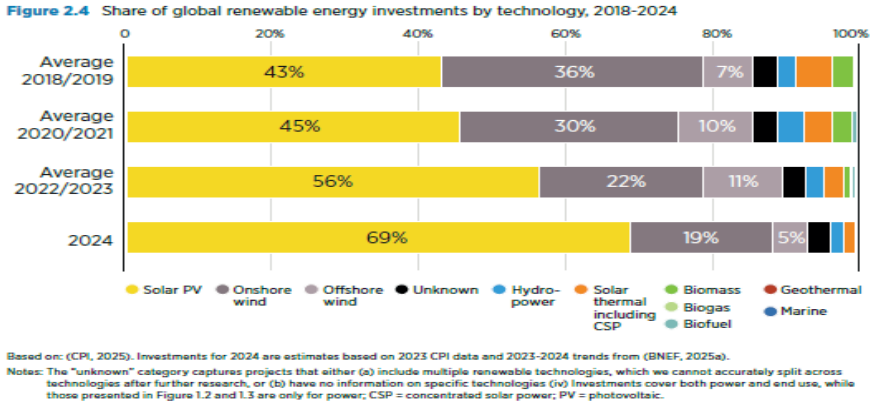


Şekil 7. Teknolojiye göre küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının payı, 2018-2024 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

2.4 Teknolojiye Göre Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Şekil 8’de verilen teknolojiye göre küresel yenilenebilir enerji yatırım-

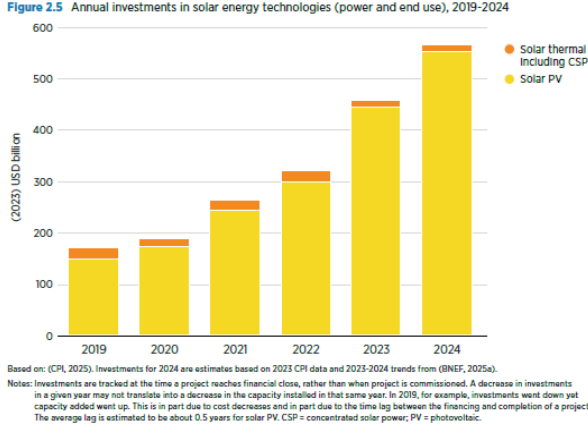
larının payı incelendiğinde Fotovoltaik (PV) ve rüzgâr enerjisi teknolojileri, 2022/2023 dönemindeki %89'luk paydan 2024'te %93'e yükselerek yenilenebilir enerji yatırımlarında baskın olmaya devam ettiği görülmektedir. Bu arada, diğer yenilenebilir teknolojilere (biyoenerji, jeotermal enerji, hidroelektrik ve deniz enerjisi) yapılan yatırımlar hem mutlak hem de göreceli olarak düşüş göstererek, payları %7'ye (2022/2023 dönemindeki %11'den) gerilemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Teknolojiye göre küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının payı, 2018-2024
 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

2.4.1 Güneş Enerjisi Teknolojileri

Fotovoltaik yatırımları, 2024 yılında 554 milyar ABD doları ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşarak 2022/2023 dönemine göre %49, 2018/2019 döneminde ise COVID-19 pandemisi öncesinde yapılan yatırımın üç katından fazla bir artış göstermiştir (Şekil 9). Sonuç olarak, Fotovoltaik yatırımları, 2022/2023 dönemindeki %56'lık paya kıyasla 2024 yılında toplam yenilenebilir enerji yatırımlarının %69'unu oluşturdu (Şekil 8). Hem kamu hizmetleri ölçeğindeki hem de küçük ölçekli projeler için önemli maliyet düşüşleriyle birlikte politika desteği bu büyümeye katkıda bulunmuştur. (International Renewable Energy Agency, 2025) güneş fotovoltaik yatırımları, IRENA'nın 1,5°C Senaryosu kapsamında gereken ortalama yıllık yatırımlara yakındır.

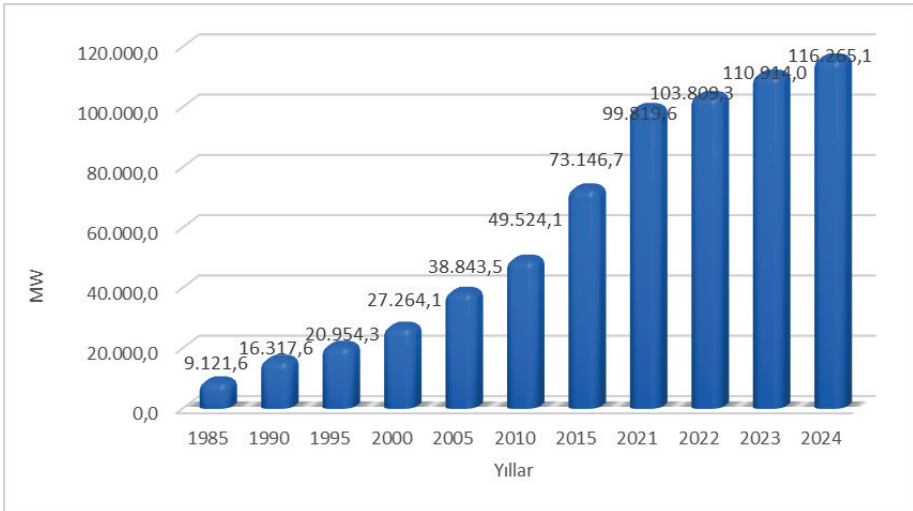


Şekil 9. Güneş enerjisi teknolojilerine yapılan yıllık yatırımlar (güç ve son kullanım), 2019-2024 (International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative, 2025).

Çin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri, 2024 yılındaki ek güneş fotovoltaik (PV) dağıtımının %78'ini ve yatırımların %70'ini oluşturarak dünyanın güneş enerjisi pazarları olmaya devam etmektedir. Çin, 2030 yılı güneş enerjisi kapasitesi hedefine 2024 yılında, planlanandan altı yıl önce ulaştığı görülmektedir (International Energy Agency, 2025).

2.5. Türkiye Kurulu Gücü

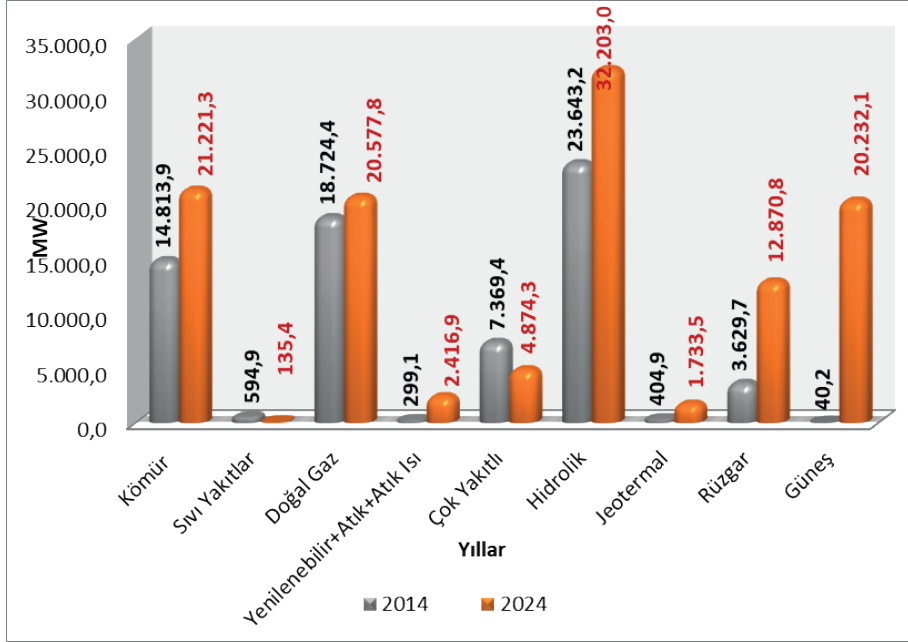
Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi Şekil 10'da verilmiştir. 2024 yılında kurulu güç 116.265,1MW değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 10. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi (TEİAŞ, t.y.)

Şekil 11'de ise 2014 ve 2024 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre

Türkiye kurulu gücü verilmiştir. 2014 yılında güneş enerjisi kurulu gücü 40,2Mw iken bu değer 2024 yılında 20.232,1MW değerine ulaşmıştır. Güneş enerjisinin birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücündeki payı 2014 yılında %0,1 iken bu pay 2024 yılında %17,4 olmuştur.



Şekil 11. 2014 ve 2024 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü (TEİAŞ, t.y.).

Bu süreçte güneş enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güçteki baskın artışı yaşanırken, rüzgâr enerjisinin de artışı olmakla birlikte kömür, sıvı yakıtlar, doğal gaz, atıklar, çok yakıtlılar, hidroelektrik ve jeotermal enerjilerin kurulu güçteki payları düşüş göstermiştir. Bu kaynaklardan sadece sıvı yakıtlar ile çok yakıtlı kaynaklar hem kurulu gücü hem de toplamdaki payları azalış göstermiştir. Kömür, doğal gaz, atıklar, hidroelektrik ve jeotermal enerjilerin ise kurulu güçleri artmasına rağmen güneş enerjisinin yükselişi sonunda toplam kurulu güçteki payları azalmıştır. Bu durum tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi (TEİAŞ, t.y.).

Birim :MW										
	Kömür	Sıvı Yakıtlar	Doğal Gaz	Yenilenebilir +Atık+Atık Isı	Çok Yakıtlı	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Toplam
2014	14.813,9	594,9	18.724,4	299,1	7.369,4	23.643,2	404,9	3.629,7	40,2	69.519,8
%	21,31	0,86	26,93	0,43	10,60	34,01	0,58	5,2	0,1	100,0
2024	21.221,3	135,4	20.577,8	2.416,9	4.874,3	32.203,0	1.733,5	12.870,8	20.232,1	116.265,1
%	18,25	0,12	17,70	2,08	4,19	27,70	1,49	11,1	17,4	100,0

Türkiye Elektrik Yatırımları 2025 Yılı Ağustos Ayı Özet Raporuna göre ülkemizde 2024 yılı ağustos ayında işletmeye giren lisanslı santraller ve 2025 yılı ağustos ayında işletmeye giren lisanslı santraller tablo 3 ve tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 3. 2024 yılı ağustos ayında işletmeye giren lisanslı santraller (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025a).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
Termik	30
HES	8,88
RES	30,9
Biyokütle, Jeotermal	1,5
GES	62,99
Toplam	134,27

Tablo 4. 2025 yılı ağustos ayında işletmeye giren lisanslı santraller (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025a).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
Termik	0
HES	0,8
RES	186,96
Biyokütle, Jeotermal	4,42
GES	69,65
Toplam	261,83

Türkiye Elektrik Yatırımları 2025 Yılı Ağustos Ayı Özet Raporuna göre ülkemizde 2024 yılının ilk 8 ayında işletmeye giren lisanslı santraller ve 2025 yılının ilk 8 ayında işletmeye giren lisanslı santraller tablo 5 ve tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 5. 2024 yılının ilk 8 ayında işletmeye giren lisanslı santraller (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025a).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
Termik	43,58
HES	228,72
RES	516,25
Biyokütle, Jeotermal	35,66
GES	67,15
Toplam	891,36

Tablo 6. 2025 yılının ilk 8 ayında işletmeye giren lisanslı santraller (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025a).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
Termik	36,01
HES	57,78
RES	976,24
Biyokütle, Jeotermal	15,06
GES	445,33
Toplam	1530,42

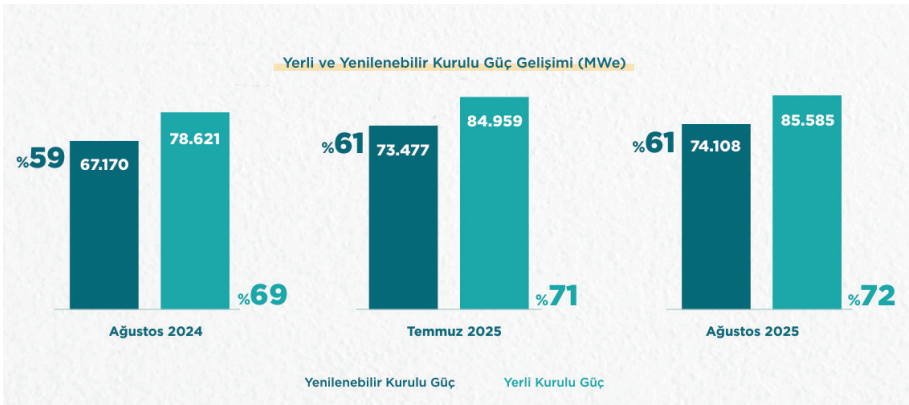
Türkiye elektrik yatırımları 2025 yılı ağustos ayı özet raporuna göre ülkemizde 31 Ağustos 2025 itibarıyla elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretim yönetmeliği kapsamındaki kapasite ve 31 Ağustos 2025 itibarıyla Türkiye'deki elektrik üretim tesislerinin toplam kurulu gücünün dağılımı tablo 7 ve tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretim yönetmeliği kapsamındaki kapasite (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025a).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
GES	21416,78
Termik	454,86
RES	167,98
Biyokütle, Jeotermal	81,21
HES	49,10
Toplam	22169,93

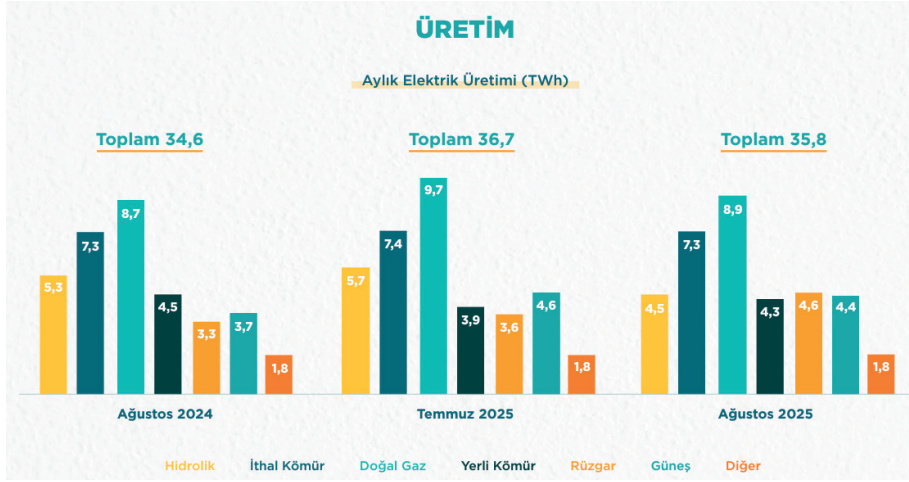
Tablo 8. 31 Ağustos 2025 İtibarıyla Türkiye’deki Elektrik Üretim Tesislerinin Toplam Kurulu Gücünün Dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025a).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
Termik	46896,41
HES	32289,04
GES	23877,19
RES	13866,96
Biyokütle, Jeotermal	3854,27
Toplam	120783,87



Şekil 12. Yerli ve yenilenebilir kurulu güç (MWe) gelişiminin 2024 Ağustos ve 2025 Ağustos ayları arasındaki değişimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025b).

2025 yılı Ağustos ayı için 2024 yılının aynı ayına göre toplam kurulu güç içinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen kurulu güç oranının %2,43 arttığı görülmektedir. Aynı dönemde yenilenebilir kurulu güç 67.170 MWe seviyesinden 74.108 MWe seviyesine yükselirken yerli kurulu güç 78.621 MWe seviyesinden 85.585 MWe seviyesine yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025b).



Şekil 13. Kaynaklara göre elektrik üretiminin 2024 Ağustos ve 2025 Ağustos ayları arasındaki değişimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025b).

Kaynak bazlı aylık elektrik üretim miktarları ve aylık toplam elektrik üretimi incelendiğinde; 2025 yılı Ağustos ayında bir önceki yılın aynı ayına göre kıyaslandığında rüzgâr santrallerinden elektrik üretimi 1,3 TWh, güneş santrallerinden 0,7 TWh, doğalgaz santrallerinden 0,2 TWh artış görülmüş olup, hidrolik santrallerinden elektrik üretiminde 0,8 TWh, yerli kömür santrallerinden 0,2 TWh azalış görülmüştür (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025b).

3. Sonuç

ETKB'nin 2022 yılı Türkiye Ulusal Enerji Planına göre 2035 yılında aşağıdaki hedeflere ulaşılması beklenmektedir:

- Rüzgâr enerjisinde 29,6 GW'a (24,6 GW kara, 5 GW deniz) kadar kurulu gücün yükseltilmesi hedeflenmektedir.
- Güneş enerjisinde ise 52,9 GW düzeyine çıkarılması hedeflenmektedir.

Türkiye'nin enerji sektöründe çeşitliliğin artması, sürdürülebilir ve geleceğe yönelik bir adım olarak yorumlanabilir (Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2024).

Referanslar

- International Renewable Energy Agency & Climate Policy Initiative. (2025). Global landscape of energy transition finance 2025. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2023). World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway. IRENA.
- TEİAŞ. (t.y.). Türkiye elektrik üretim-iletim istatistikleri. TEİAŞ. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025a). Elektrik yatırımları 2025 yılı Ağustos ayı özet raporu. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. <https://www.enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/PRP/EY%C3%96RA/2025/Agustos.pdf>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025b). Aylık Enerji ve Tabii Kaynaklar Bülteni. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/AYLIK_ENERJI_BULTE-NI/2025/EYLUL/Aylik_Enerji_ve_Tabii_Kaynaklar_Bulten_Eylul.pdf
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2024). 2024–2028 stratejik plan. TEİAŞ. <https://www.teias.gov.tr/stratejik-plan>
- International Renewable Energy Agency. (2025). IRENASTAT Power capacity and generation statistics [Data set]. IRENA. https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRE-NASTAT/IRENASTAT_Power%20Capacity%20and%20Generation/Region_ELECSTAT_2025_H2_PX.px
- International Energy Agency. (2025). World Energy Investment 2025. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2025>



3D YAZICI TEKNOLOJİLERİNİN RF UYGULAMALARINDA KULLANIMI VE RF UYUMLU FONKSİYONEL FİLAMANTLER

“ ”

Burak DÖKMETAŞ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi/ Kafkas Üniversitesi/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
E-mail: burakd@kafkas.edu.tr
Orcid No: 0000-0001-5900-6691

GİRİŞ

Katmanlı üretim teknolojileri, son yıllarda mühendislik tasarım ve üretim süreçlerinde önemli bir paradigma değişimine yol açmıştır. Bu teknolojiler arasında yer alan üç boyutlu (3B) yazıcılar, düşük maliyet, hızlı prototipleme ve yüksek tasarım özgürlüğü gibi avantajları sayesinde geleneksel imalat yöntemlerine güçlü bir alternatif hâline gelmiştir. Özellikle karmaşık geometrilerin kalıba ihtiyaç duyulmadan üretilebilmesi, 3B yazıcıların yalnızca mekanik sistemlerde değil, elektrik-elektronik mühendisliği uygulamalarında da yaygın biçimde kullanılmasını sağlamıştır. Bu durum, fonksiyonel prototiplerin kısa sürede üretilebilmesine ve tasarım-üretim döngüsünün önemli ölçüde kısalmasına olanak tanımaktadır.

Elektromanyetik ve mikrodalga sistemlerde kullanılan antenler (Dokmetaş & Belen, 2024) ve pasif bileşenler (Dokmetaş & Arıcan, 2023), hem geometrik doğruluğa hem de kullanılan malzemenin dielektrik özelliklerine yüksek derecede duyarlıdır. Bu tür yapılarda küçük geometrik sapmalar veya malzeme parametrelerindeki değişimler; çalışma frekansı, bant genişliği, kazanç ve ısıma karakteristikleri gibi temel performans kriterlerini doğrudan etkileyebilmektedir. Geleneksel üretim teknikleri, özellikle üç boyutlu ve dielektrik özellikleri kontrollü biçimde ayarlanması gereken mikrodalga bileşenlerin üretiminde ciddi kısıtlamalar ortaya koymaktadır (Dokmetaş, 2024). Bu bağlamda, FDM (Fused Deposition Modeling) tabanlı 3B yazıcılar, tasarım esnekliği, üretim tekrarlanabilirliği ve maliyet etkinliği açısından mikrodalga mühendisliği için dikkat çekici bir çözüm sunmaktadır. 3B yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA ve ABS filamentler, üretim kolaylığı ve mekanik dayanım açısından avantajlı olmalarına karşın, sabit dielektrik sabitleri ve görece yüksek kayıp faktörleri nedeniyle yüksek frekanslı elektromanyetik uygulamalarda sınırlı performans sergileyebilmektedir. Buna karşılık, PREPERM ABS gibi dielektrik özellikleri ayarlanabilir filamentler, elektromanyetik tasarım sürecine yeni bir boyut kazandırmaktadır. Bu tür özel malzemeler, dielektrik sabitinin doluluk oranı veya malzeme bileşimi üzerinden kontrol edilebilmesine olanak tanıyarak, anten ve mikrodalga yapıların empedans uyumu, bant genişliği ve yönlülük gibi parametrelerinin daha hassas biçimde optimize edilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu bölümde, 3B yazıcı teknolojilerinin mikrodalga mühendisliği alanındaki yeri ele alınmakta; PLA, ABS ve PREPERM ABS filamentlerin elektromanyetik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Ayrıca, bu filamentlerin antenler ve farklı mikrodalga bileşenleri üzerindeki etkileri literatür destekli olarak değerlendirilerek, katmanlı üretim tabanlı yaklaşımların sunduğu avantajlar, sınırlamalar ve geleceğe yönelik potansiyeller bütüncül bir bakış açısıyla tartışılmaktadır.

1. 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİNE GENEL BAKIŞ

Üç boyutlu yazıcılar, sayısal ortamda tasarlanan bir modelin katmanlar hâlinde fiziksel bir ürüne dönüştürülmesini sağlayan katmanlı üretim sistemleridir. Bu üretim yaklaşımı, malzemenin yalnızca gerekli bölgelerde kullanılması sayesinde hem israfı azaltmakta hem de karmaşık geometrilerin tek adımda üretilebilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle hızlı prototipleme gerektiren mühendislik uygulamalarında, 3B yazıcılar tasarım doğrulama sürecini önemli ölçüde hızlandırmaktadır. Elektrik-elektronik mühendisliği bağlamında 3B yazıcıların önemi, yalnızca mekanik taşıyıcı elemanların üretimiyle sınırlı değildir. Antenler, mikrodalga bileşenler ve elektromanyetik yapılar gibi yüksek frekanslı sistemlerde, geometrik hassasiyet ve malzeme özellikleri kritik rol oynamaktadır. Bu nedenle, kullanılan 3B yazıcı teknolojisinin üretim çözünürlüğü, katman kalınlığı ve malzeme uyumluluğu, elde edilen elektromanyetik performansı doğrudan etkilemektedir.

1.1. Katmanlı Üretim (Additive Manufacturing) Kavramı

Katmanlı üretim, geleneksel çıkarımlı imalat yöntemlerinden farklı olarak, malzemenin üst üste katmanlar hâlinde eklenmesi esasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, içi boş yapılar, kademeli dielektrik geçişleri ve karmaşık üç boyutlu formların üretimini mümkün kılmaktadır. Mikrodalga uygulamalar açısından bu durum, dielektrik sabiti uzaysal olarak değişen yapılar ve fonksiyonel elektromanyetik bileşenlerin tasarlanabilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Katmanlı üretim yöntemleri arasında FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography) ve SLS (Selective Laser Sintering) gibi farklı teknikler bulunmaktadır. Ancak, malzeme erişilebilirliği, üretim maliyeti ve çok çeşitli filament seçenekleri nedeniyle FDM tabanlı sistemler, mikrodalga ve anten uygulamalarında daha yaygın biçimde tercih edilmektedir. Tablo 1 ‘de katmanlı üretim teknolojilerinin (FDM, SLA ve SLS) özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 1. FDM, SLA ve SLS tabanlı katmanlı üretim tekniklerinin temel parametreler bakımından karşılaştırılması

Özellik	FDM	SLA	SLS
Çalışma Prensibi	Eritilmiş termoplastik filamentin nozuldan katmanlar hâlinde ekstrüde edilmesi	Sıvı fotopolimer reçinenin UV lazer ile katman katman kürlenmesi	Toz hâlindeki malzemenin lazer ile sinterlenmesi

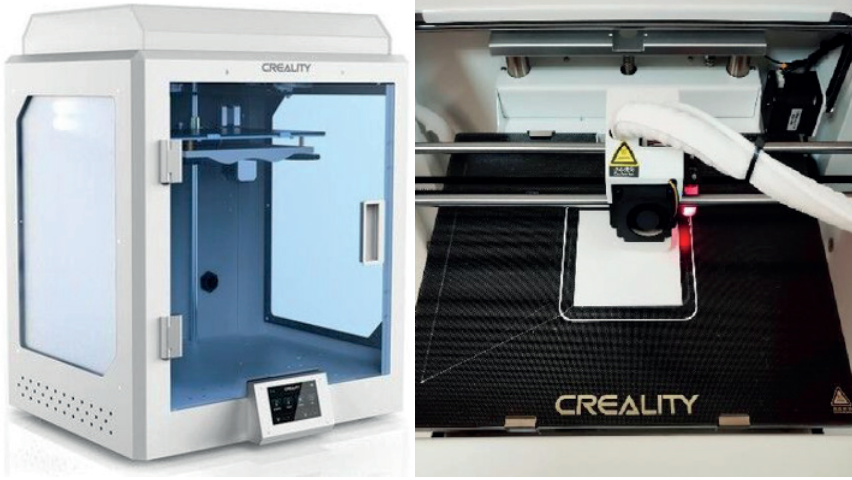
Kullanılan Malzemeler	PLA, ABS, PETG, PREPERM ABS, kompozit filamentler	Fotopolimer reçineler	Polimer tozları (PA, naylon), metal ve seramik tozlar
Katman Kalınlığı	0.1–0.4 mm	0.025–0.1 mm	0.06–0.15 mm
Geometrik Hassasiyet	Orta	Çok yüksek	Yüksek
Yüzey Pürüzlülüğü	Orta – yüksek	Düşük (pürüzsüz yüzey)	Orta
Doluluk Oranı Kontrolü	Var (kritik avantaj)	Yok	Kısmen
Dielektrik Özellik Ayarlanabilirliği	Yüksek (infill ve filament seçimi ile)	Düşük	Orta
Mikrodalga Uygunluğu	Yüksek	Sınırlı (yüksek kayıplı reçineler)	Orta – yüksek
Anten ve RF Yapılara Uygunluk	Çok uygun	Yüzey hassasiyeti gereken özel yapılar	Mekanik dayanım gerektiren yapılar
Üretim Maliyeti	Düşük	Orta – yüksek	Yüksek
Laboratuvar Erişilebilirliği	Yaygın	Orta	Sınırlı
Akademik Çalışmalarda Kullanım	Yaygın	Orta	Sınırlı

1.2. FDM Tabanlı 3B Yazıcıların Çalışma Prensibi

FDM tabanlı üç boyutlu yazıcılar, termoplastik filamentlerin belirli bir sıcaklıkta eritilerek nozul aracılığıyla katmanlar hâlinde bir yüzey üzerine biriktirilmesi esasına dayanan katmanlı üretim sistemleridir. Bu yöntemde üretim süreci, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında oluşturulan üç boyutlu modelin dilimleme (slicing) yazılımları aracılığıyla katmanlara ayrılmasıyla başlar. Her bir katman, yazıcı tarafından belirlenen yol izleme algoritmasına göre sırasıyla üretilir ve nihai yapı katmanların üst üste eklenmesiyle elde edilir. FDM teknolojisinde filament, genellikle 1.75 mm veya 2.85 mm çapında makaralar hâlinde beslenir ve ekstrüder mekanizması yardımıyla ısıtılmış nozul içerisine iletilir. Nozul sıcaklığı, kullanılan filament türüne bağlı olarak ayarlanmakta olup, bu sıcaklık değeri filamentin akışkanlığını ve katmanlar arası yapışmayı doğrudan etkilemektedir. Eritilen malzeme, belirlenen katman kalınlığı boyunca yüzeye bırakılır ve kısa sürede katlaşılarak bir sonraki katman için uygun bir zemin oluşturur. FDM tabanlı yazıcılarda baskı kalitesini ve üretilen yapının özelliklerini belirleyen temel parametreler arasında nozul çapı, katman yüksekliği, baskı hızı, tabla sıcaklığı ve doluluk oranı yer almaktadır. Bu parametreler yalnızca mekanik dayanımı değil, aynı zamanda elektromanyetik uygulamalarda kritik öneme sahip olan efektif dielektrik sabiti ve kayıp karakteristiklerini de etkilemektedir. Özellikle

doluluk oranının kontrol edilebilmesi, FDM teknolojisini mikrodalga ve anten uygulamaları açısından öne çıkaran en önemli avantajlardan biridir.

Bu özellikler sayesinde FDM tabanlı 3B yazıcılar; anten substratları, dielektrik yüklü yapılar, mikrodalga lensler ve elektromanyetik fonksiyonel bileşenlerin üretiminde esnek, tekrarlanabilir ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır. Resim 1’ de Creality Cr5 modeline ait FDM tipi bir 3D yazıcı görseli verilmiştir (Onay & Dokmetas, 2025).



Resim 1. FDM tipi 3D yazıcı (Onay & Dokmetas, 2025)

2. 3B YAZICILARDA KULLANILAN FİLAMENT TÜRLERİ

3B yazıcı teknolojilerinin mikrodalga ve anten uygulamalarında etkin biçimde kullanılabilmesi, yalnızca üretim tekniğine değil, aynı zamanda kullanılan filamentlerin mekanik ve elektromanyetik özelliklerine de doğrudan bağlıdır. FDM tabanlı 3B yazıcılarda kullanılan filamentler, baskı sürecinin kararlılığını, üretilen yapının geometrik doğruluğunu ve nihai elektromanyetik performansı belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, filament seçimi mikrodalga tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir.

Bu bölümde, FDM tabanlı 3B yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA ve ABS filamentler ile mikrodalga uygulamalar için özel olarak geliştirilmiş PREPERM ABS filamentler ayrıntılı biçimde ele alınmakta; bu malzemelerin elektromanyetik açıdan sunduğu avantajlar ve sınırlamalar karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

2.1. PLA FİLAMENT

PLA (Polylactic Acid), biyobozunur yapısı ve düşük baskı sıcaklığı gereksinimi nedeniyle FDM tabanlı 3B yazıcılarda en yaygın kullanılan filamentlerden biridir. Genellikle 180–220 °C nozul sıcaklığında işlenebilen PLA, baskı sırasında düşük büzülme oranı sergilemesi sayesinde geometrik doğruluğun korunmasını kolaylaştırmaktadır. Bu özellikleri, PLA'yı hızlı prototipleme ve mekanik taşıyıcı yapıların üretimi açısından cazip hâle getirmektedir.

Elektromanyetik açıdan değerlendirildiğinde, PLA filamentlerin dielektrik sabiti genellikle düşük ve sabit bir aralıkta yer almakta olup, bu durum belirli frekans bantlarında çalışan anten ve mikrodalga yapılar için öngörülebilir bir davranış sunmaktadır. Ancak, PLA'nın görece yüksek kayıp faktörü ve sınırlı termal dayanımı, yüksek frekanslı ve yüksek güçlü mikrodalga uygulamalarında performans kısıtları oluşturmaktadır. Özellikle uzun süreli çalışmalarda veya sıcaklık artışının söz konusu olduğu ortamlarda, PLA tabanlı yapıların elektromanyetik kararlılığı olumsuz etkilenebilmektedir.

Bu nedenlerle PLA filamentler, mikrodalga mühendisliğinde daha çok kavramsal tasarımlar, ön prototipler ve düşük güçlü uygulamalar için tercih edilmekte; yüksek performans gerektiren anten ve RF bileşenlerinde ise sınırlı bir kullanım alanına sahip olmaktadır.

2.2. ABS FİLAMENT

ABS, PLA'ya kıyasla daha yüksek mekanik dayanım ve termal kararlılık sunan bir termoplastik malzemedir. Genellikle 220–260 °C aralığında baskı sıcaklığı gerektiren ABS, daha yüksek cam geçiş sıcaklığı sayesinde ısı etkilerinin belirgin olduğu uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, baskı sırasında büzülme eğiliminin yüksek olması, tabla ısıtması ve kontrollü baskı ortamı gereksinimini beraberinde getirmektedir.

Elektromanyetik özellikler açısından ABS filamentler, PLA'ya benzer şekilde sabit bir dielektrik sabitine sahiptir; ancak daha düşük kayıp karakteristikleri sayesinde mikrodalga uygulamalarda nispeten daha iyi performans gösterebilmektedir. Bu durum, ABS'yi özellikle anten taşıyıcı yapıları, muhafazalar ve yapısal bileşenler için uygun bir seçenek hâline getirmektedir.

Bununla birlikte, ABS filamentlerin dielektrik özelliklerinin sınırlı ölçüde ayarlanabilir olması, karmaşık elektromanyetik optimizasyon gerektiren tasarımlar açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle ABS, mikrodalga sistemlerde genellikle destekleyici veya yarı-aktif bileşenlerin üretiminde tercih edilmekte; elektromanyetik performansın kritik olduğu yapılarda ise daha gelişmiş malzemelere yönelim söz konusu olmaktadır.

2.3. PREPERM ABS FİLAMENT

PREPERM ABS filamentler, mikrodalga ve RF uygulamaları için özel olarak geliştirilmiş, dielektrik özellikleri kontrollü biçimde ayarlanabilen kompozit malzemelerdir. Bu filamentler, ABS matris içerisine belirli oranlarda dielektrik katkı maddeleri eklenmesiyle elde edilmekte ve böylece geniş bir dielektrik sabiti aralığında üretilebilmektedir. Bu özellik, PREPERM ABS filamentleri klasik PLA ve ABS malzemelerden ayıran en önemli farktır. FDM tabanlı üretimde PREPERM ABS filamentlerin kullanılması, doluluk oranı ve baskı parametreleri ile birlikte değerlendirildiğinde, efektif dielektrik sabitinin hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, antenlerin rezonans frekansının ayarlanması, bant genişliğinin genişletilmesi ve empedans uyumunun iyileştirilmesi gibi kritik elektromanyetik tasarım hedeflerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, PREPERM ABS filamentler ile üretilen dielektrik yüklü yapılar; mikrodalga lensler, frekans seçici yüzeyler ve konformal antenler gibi ileri düzey uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Ayarlanabilir dielektrik özellikler sayesinde, katmanlı üretim süreci yalnızca geometrik değil, aynı zamanda elektromanyetik bir tasarım aracı hâline gelmektedir. Bu yönüyle PREPERM ABS filamentler, 3B yazıcı tabanlı mikrodalga mühendisliği çalışmalarında yüksek performanslı ve esnek çözümler sunan stratejik bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Tablo 2’de sunulan çalışmalar, FDM tabanlı 3B yazıcılar kullanılarak farklı filament türleriyle gerçekleştirilen anten tasarımlarının literatürde geniş bir uygulama alanı bulduğunu göstermektedir.

PLA filamentler, düşük maliyet ve üretim kolaylığı nedeniyle özellikle prototipleme amaçlı anten çalışmalarında tercih edilmekte olup, slotlu SIW ve esnek anten yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Mirzaee ve ark., 2015; Munir ve ark., 2023). ABS filamentler ise daha yüksek mekanik ve termal kararlılık sunarak, 3B gömülü anten yapılarının üretiminde uygun bir dielektrik malzeme olarak öne çıkmaktadır (Mirzaee & Noghianian, 2016).

Buna karşılık, PREPERM ABS filamentlerin kullanıldığı çalışmalar, ayarlanabilir dielektrik özelliklerin FDM tabanlı üretimle birlikte değerlendirilmesinin yüksek frekanslı anten ve mikrodalga uygulamaları için önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle end-fire dielektrik antenler ve GRIN tabanlı planar lens yapıları gibi uygulamalarda, PREPERM ABS filamentlerin X-bandından milimetre dalga bantlarına kadar uzanan geniş bir frekans aralığında başarıyla kullanıldığı rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2018; Poyanco ve ark., 2022). Bu durum, filament seçiminin yalnızca mekanik değil, aynı zamanda elektromanyetik tasarım kriterleri doğrultusunda yapılması gerektiğini açıkça göstermektedir.

Tablo 2. FDM tabanlı 3B yazıcılar kullanılarak PLA, ABS ve PREPERM ABS filamentlerle gerçekleştirilen anten çalışmalarının karşılaştırılması

Yazarlar	Filament Türü	Anten Tipi	Çalışma Frekansı (GHz)	Üretim Yöntemi
Mirzaee & Noghianian (2016)	ABS (dielektrik) + karbon pasta (iletken)	3B gömülü dipol anten	3	FDM
Mirzaee ve ark. (2015)	PLA (dielektrik) + iletken ABS	CPW beslemeli bow-tie anten	6.8–8.7	FDM
Munir ve ark. (2023)	PLA	Slotlu SIW anten	2.92–5.6	FDM
Huang ve ark. (2018)	PREPERM ABS (DK ≈ 10)	Geniş bantlı end-fire dielektrik anten	6.9–12.5	FDM
Poyanco ve ark. (2022)	PREPERM ABS (ABS300–ABS1200)	GRIN planar lens anten	28–40	FDM

3. FDM BASKI PARAMETRELERİNİN ELEKTROMANYETİK DAVRANIŞA ETKİSİ

FDM tabanlı 3B yazıcılar kullanılarak üretilen mikrodalga ve anten yapılarında elektromanyetik performans yalnızca kullanılan filament türüne bağlı değildir. Baskı sürecinde belirlenen parametreler, üretilen yapının efektif dielektrik özelliklerini, yüzey karakteristiklerini ve elektromanyetik alan dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, FDM tabanlı üretim süreçleri elektromanyetik tasarım açısından yalnızca bir imalat adımı olarak değil, aynı zamanda performansı belirleyen aktif bir tasarım değişkeni olarak değerlendirilmelidir.

FDM baskı parametreleri; doluluk oranı, katman yüksekliği, baskı yönü, nozul çapı ve baskı hızı gibi çok sayıda değişkenden oluşmaktadır. Bu parametrelerin her biri, üretilen yapının içsel geometrisini ve malzeme dağılımını belirleyerek elektromanyetik dalgaların yayılım karakteristiği üzerinde etkili olmaktadır. Özellikle dielektrik yüklü antenler ve mikrodalga bileşenler söz konusu olduğunda, bu parametreler rezonans frekansı, bant genişliği, kazanç ve verim gibi temel performans ölçütlerini dolaylı veya doğrudan biçimde etkilemektedir. FDM teknolojisinin mikrodalga uygulamaları açısından en önemli avantajlarından biri, baskı parametreleri aracılığıyla efektif dielektrik sabitinin kontrol edilebilmesidir. Doluluk oranı ve katman yerleşimi gibi ayarlar sayesinde, homojen olmayan ancak tasarlanabilir bir dielektrik yapı elde edilebilmekte ve bu yapı elektromanyetik tasarım hedefleri doğrultusunda kullanılabilir. Bu yaklaşım, özellikle PREPERM ABS gibi ayarlanabilir dielektrik özelliklere sahip filamentlerle birlikte kullanıldığında, FDM tabanlı üretimi geleneksel üretim yöntemlerine

kıyasla daha esnek ve güçlü bir tasarım aracı hâline getirmektedir.

Bu bölümde, FDM baskı parametrelerinin elektromanyetik davranış üzerindeki etkileri sistematik bir biçimde incelenmektedir. Öncelikle doluluk oranının efektif dielektrik sabiti üzerindeki rolü ele alınmakta, ardından katman yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğünün elektromanyetik kayıplara etkisi tartışılmaktadır. Son olarak, baskı yönü ve katman yerleşiminin neden olduğu anizotropik elektromanyetik davranışlar değerlendirilerek, FDM tabanlı mikrodalga tasarımlar için genel tasarım ilkeleri ortaya konulmaktadır.

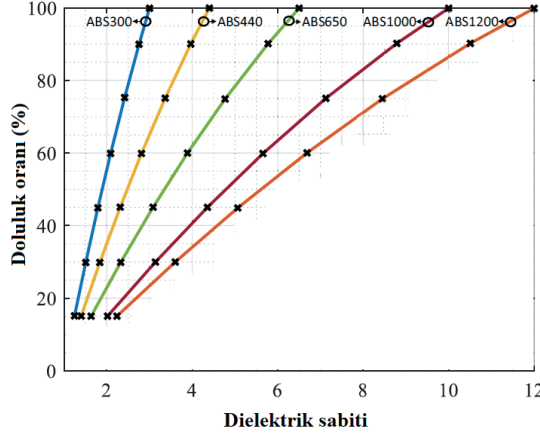
3.1. DOLULUK ORANININ EFEKTİF DİELEKTRİK SABİTİNE ETKİSİ

FDM tabanlı üretimde doluluk oranı, üretilen yapının içsel geometrisini belirleyen ve dolayısıyla elektromanyetik davranışı doğrudan etkileyen temel baskı parametrelerinden biridir. Özellikle PREPERM ABS gibi ayarlanabilir dielektrik özelliklere sahip filamentlerde, doluluk oranının değiştirilmesiyle efektif dielektrik sabitinin kontrollü biçimde ayarlanabilmesi mümkün hâle gelmektedir. Bu durum, FDM teknolojisini yalnızca bir üretim yöntemi olmaktan çıkararak elektromanyetik tasarım sürecinin aktif bir parçası hâline getirmektedir. Bu bağlamda elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar, doluluk oranının artmasıyla birlikte dielektrik sabitinin genel olarak monoton bir artış eğilimi sergilediğini göstermektedir. Ancak bu artışın eğimi, kullanılan filamentin nominal dielektrik sabitine bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermektedir. Düşük permittiviteli ABS300 ve ABS440 filamentlerde doluluk oranındaki değişimler dielektrik sabiti üzerinde daha sınırlı bir etki oluştururken; ABS1000 ve ABS1200 gibi yüksek permittiviteli filamentlerde aynı doluluk oranı değişimi çok daha geniş bir ayar aralığı sunmaktadır. Bu eğilim, Şekil 1’de sunulan karakteristik eğriler üzerinden açıkça gözlemlenebilmektedir.

Tablo 3’te verilen doluluk oranı değerleri, bu davranışı nicel olarak desteklemektedir. Örneğin ABS1200 filament için %100, %97.1 ve %92.1 doluluk oranlarının kullanılması, yüksek permittiviteli filamentlerde küçük doluluk değişimlerinin dahi hedeflenen elektromanyetik davranışın elde edilmesinde yeterli olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde ABS1000 filament için %97.8, %87.7 ve %75.3 doluluk oranlarının tercih edilmesi, aynı filament ailesi içinde farklı elektromanyetik gereksinimlere uygun tasarımların gerçekleştirilebildiğini ortaya koymaktadır. Orta ve düşük permittiviteli ABS650, ABS440 ve ABS300 filamentlerde ise daha düşük doluluk oranlarının seçilmesiyle geniş bir efektif dielektrik sabiti aralığında tasarım yapılabildiği anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlar, doluluk oranının FDM tabanlı üretimde çok katmanlı dielektrik yapılar, gradyan indisli (GRIN) lensler ve dielektrik yüklü antenler gibi mikrodalga uygulamalarında kritik bir tasarım serbestliği

sunduğunu göstermektedir. Geometrik yapı sabit tutulsa dahi, yalnızca baskı parametrelerinin ayarlanması yoluyla elektromanyetik davranışın ince ayarının yapılabilmesi, FDM teknolojisini geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha esnek ve çok boyutlu bir tasarım platformu hâline getirmektedir.



Şekil 1. Farklı PREPERM ABS filament türleri için doluluk oranına bağlı olarak elde edilen dielektrik sabiti değişimi (Poyanco, Pizarro & Rajo-Iglesias, 2022)

Bu noktada, doluluk oranı ile elde edilen dielektrik ayarlamasının yalnızca ideal hacimsel dağılıma değil, aynı zamanda baskı sürecinde oluşan katman yapısına ve yüzey karakteristiklerine de bağlı olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle bir sonraki alt bölümde, katman yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğünün elektromanyetik kayıplar üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Sonuç olarak, Poyanco ve ark.'nın çalışması, FDM tabanlı üretimde doluluk oranı seçiminin çok katmanlı dielektrik yapılar ve GRIN türü lens mimarileri gibi mikrodalga bileşenlerde kritik bir tasarım serbestliği sağladığını göstermektedir (Poyanco, Pizarro & Rajo-Iglesias, 2022). Bu yaklaşım, geometrik tasarım sabit tutulsa dahi baskı parametreleri üzerinden elektromanyetik davranışın “ince ayar” ile yönlendirilebileceğini ortaya koyması bakımından önemlidir.

Tablo 3. FDM tabanlı üretimde PREPERM ABS filamentler için doluluk oranı seçimleri

ABS PREPERM	Doluluk oranı
ABS1200 ($\epsilon_r = 12$)	100
ABS1200 ($\epsilon_r = 12$)	97.1
ABS1200 ($\epsilon_r = 12$)	92.1
ABS1000 ($\epsilon_r = 10$)	97.8
ABS1000 ($\epsilon_r = 10$)	87.7
ABS1000 ($\epsilon_r = 10$)	75.3
ABS650 ($\epsilon_r = 6.5$)	90.4
ABS650 ($\epsilon_r = 6.5$)	70.2
ABS440 ($\epsilon_r = 4.4$)	72.7
ABS300 ($\epsilon_r = 3$)	65.9

3.2. KATMAN YÜKSEKLİĞİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ELEKTROMANYETİK KAYIPLARA ETKİSİ

FDM tabanlı 3B yazıcılarla üretilen mikrodalga ve anten yapılarında katman yüksekliği, baskı sürecinde belirlenen en kritik geometrik parametrelerden biridir. Katman yüksekliği, yalnızca üretim süresini ve mekanik dayanımı değil, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü ve iç yapının sürekliliğini belirleyerek elektromanyetik kayıplar üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle katman yüksekliği seçimi, elektromanyetik performans açısından doluluk oranı kadar önemli bir tasarım değişkeni olarak değerlendirilmelidir.

Katman yüksekliğinin artırılması, baskı süresini azaltırken yüzeyde daha belirgin basamaklanma (staircase effect) oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda elektromanyetik dalgaların yüzey boyunca yayılımını olumsuz yönde etkileyerek saçılma ve ohmik kayıpların artmasına yol açabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki artış, akım yoğunluğunun homojenliğini bozmakta ve etkin iletim alanını azaltarak kazanç ve verim değerlerinde düşüşe neden olabilmektedir. Buna karşılık, daha küçük katman yüksekliği kullanılarak üretilen yapılarda yüzey sürekliliği artmakta ve elektromanyetik dalgalar için daha düzgün bir yayılım ortamı sağlanmaktadır. Özellikle dielektrik yüklü antenler ve mikrodalga lens yapıları gibi yüzey etkileşiminin baskın olduğu uygulamalarda, düşük katman yüksekliğinin tercih edilmesi elektromanyetik kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak katman yüksekliğinin aşırı küçültülmesi, üretim süresini önemli ölçüde

artırmakta ve pratik uygulamalar açısından bir optimizasyon gereksinimi doğurmaktadır.

Katman yüksekliğine bağlı yüzey pürüzlülüğü, yalnızca dış yüzeylerle sınırlı kalmamakta; katmanlar arası bağlanma kalitesi üzerinden iç yapının elektromanyetik sürekliliğini de etkilemektedir. Katmanlar arası zayıf birleşme bölgeleri, mikroskobik boşluklar oluşturarak lokal dielektrik süreksizliklere neden olabilmektedir. Bu tür süreksizlikler, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda istenmeyen yansımalar ve ek kayıplara yol açabilmektedir. Bu nedenle katman yüksekliği seçimi, yüzey pürüzlülüğü ve iç yapı bütünlüğü birlikte değerlendirilmelidir.

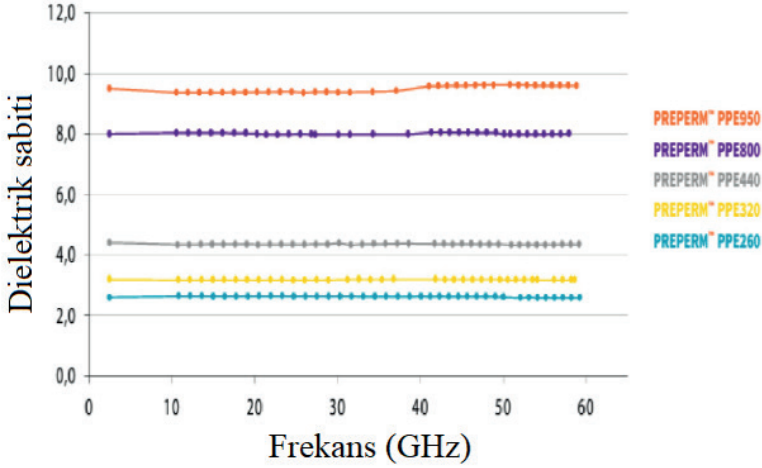
Sonuç olarak, FDM tabanlı üretimde katman yüksekliği, elektromanyetik performans üzerinde dolaylı ancak belirleyici bir etkiye sahiptir. Düşük katman yüksekliği, daha düzgün yüzeyler ve daha düşük elektromanyetik kayıplar sağlarken; yüksek katman yüksekliği üretim hızını artırmakta ancak performans açısından sınırlamalar getirmektedir. Bu durum, FDM tabanlı mikrodalga ve anten tasarımlarında katman yüksekliğinin uygulamaya özgü bir optimizasyon parametresi olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu noktada, katman yüksekliği ve doluluk oranı ile elde edilen elektromanyetik davranışın, baskı yönü ve katman yerleşimine bağlı olarak anizotropik özellikler sergileyebileceği dikkate alınmalıdır.

3.3. PREPERM ABS MALZEMESİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

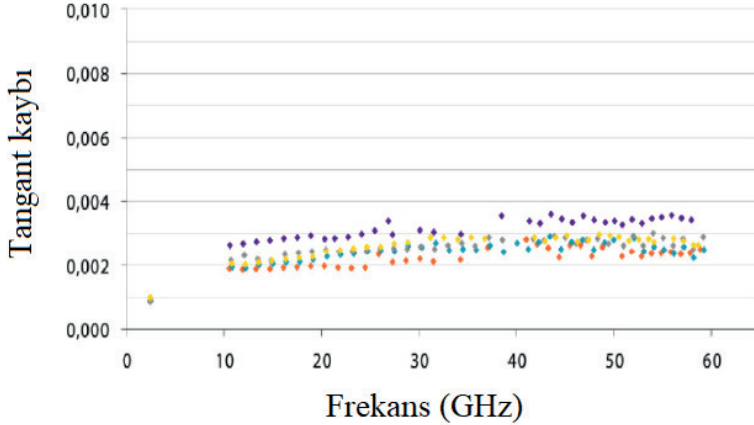
PREPERM ABS filamentler, katmanlı üretim tabanlı mikrodalga ve anten uygulamaları için geliştirilmiş, ayarlanabilir elektromanyetik özelliklere sahip özel bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. Konvansiyonel PLA ve standart ABS filamentler tam doluluk oranında genellikle $\epsilon \approx 2.5-3$ aralığında sınırlı bir dielektrik sabiti sunarken, PREPERM ABS filamentler yaklaşık $\epsilon = 3-15$ aralığında ayarlanabilir bir permittivite kapasitesi sağlamaktadır. Bu geniş ayar aralığı, PREPERM ABS'yi özellikle dielektrik yüklü antenler, mikrodalga lensler ve yüksek frekanslı yönlü yapılar için cazip bir malzeme hâline getirmektedir.

PREPERM ABS malzemesinin elektromanyetik davranışı incelendiğinde, dielektrik sabitinin geniş bir frekans aralığında kararlı bir yapı sergilediği görülmektedir. Şekil 2, farklı PREPERM ABS varyantları (PPE260, PPE320, PPE440, PPE800 ve PPE950) için dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Grafikten de görüldüğü üzere, yaklaşık 1–60 GHz frekans aralığında dielektrik sabiti değerleri sınırlı bir değişim göstermekte ve belirgin bir dispersiyon etkisi gözlenmemektedir. Bu durum, PREPERM ABS filamentlerin geniş bantlı ve milimetre dalga uygulamalarında tasarım öngörülebilirliği açısından önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır. Dielektrik kayıplar açısından değerlendirildiğinde, PREPERM ABS filamentlerin düşük ve kontrollü kayıp karakteristikleri sunduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3, aynı PREPERM ABS varyantları için kayıp tanjantının ($\tan \delta$) frekansa bağlı

değişimini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, $\tan \delta$ değerleri genel olarak 0.002–0.004 aralığında seyretmekte ve frekans artışıyla birlikte sınırlı bir yükselme eğilimi göstermektedir. Bununla birlikte, bu artış mikrodalga ve milimetre dalga anten uygulamaları için kabul edilebilir seviyelerde kalmakta ve yüksek kazançlı sistemlerde kullanılabilirliği desteklemektedir.



Şekil 2. PREPERM ABS malzemesinin frekansa bağlı Dielektrik sabiti değerleri



Şekil 3. PREPERM ABS malzemesinin frekansa bağlı kayıp tanjant değerleri

Elektromanyetik özelliklerin yanı sıra, PREPERM ABS filamentler dengeli mekanik özellikleriyle de dikkat çekmektedir. Yaklaşık 30 MPa çekme dayanımı, 38 MPa akma dayanımı ve %50 kopma uzaması, malzemenin hem rijitlik hem de esneklik gerektiren uygulamalarda güvenle kullanılmasına olanak tanımaktadır. Yaklaşık 2100 MPa eğilme modülü, baskı sırasında ve sonrasında geometrik kararlılığın korunmasına katkı sağlamaktadır.

Bu özellikler, PREPERM ABS'nin uzun süreli kullanım gerektiren RF ve mikrodalga bileşenlerinde yapısal güvenilirlik sunduğunu göstermektedir. Termal ve çevresel dayanım açısından değerlendirildiğinde, PREPERM ABS filamentlerin yük altında yaklaşık 77–89 °C sıcaklıklara kadar mekanik bütünlüğünü koruyabildiği ve %0.5 civarında (23 °C'de 24 saat) sınırlı nem emilimi gösterdiği rapor edilmektedir. Bu özellikler, malzemenin iç mekân ve yarı kontrollü ortamlarda kullanılan IoT, RF ve mikrodalga sistemleri için uygun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, uzun süreli termal çevrimler veya UV ışınımına maruz kalmanın yaşlanmaya bağlı performans düşüşlerine yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulan elektromanyetik karakteristikler ile mekanik ve çevresel özellikler birlikte değerlendirildiğinde, PREPERM ABS filamentlerin FDM tabanlı üretimde yüksek performanslı anten ve mikrodalga uygulamaları için bütüncül bir malzeme çözümü sunduğu görülmektedir. Ayarlanabilir dielektrik sabiti, düşük kayıp karakteristiği ve dengeli mekanik yapısı sayesinde PREPERM ABS, yalnızca bir üretim malzemesi değil, aynı zamanda elektromanyetik tasarım sürecinin aktif bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

SONUÇLAR

Bu bölümde, FDM tabanlı üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin mikrodalga ve anten uygulamalarındaki potansiyeli; kullanılan filament türleri, baskı parametreleri ve malzeme özellikleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler, katmanlı üretim süreçlerinin yalnızca mekanik prototipleme aracı olmanın ötesine geçerek, elektromanyetik tasarım sürecini doğrudan etkileyen bir üretim yaklaşımı sunduğunu göstermektedir.

FDM tabanlı üretimde doluluk oranı, katman yüksekliği ve baskı yönü gibi parametrelerin, üretilen yapıların efektif dielektrik özellikleri ve elektromanyetik kayıpları üzerinde belirleyici olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle doluluk oranının, efektif dielektrik sabitinin ayarlanmasında kritik bir rol oynadığı ve geometrik yapı değiştirilmeden elektromanyetik davranışın kontrol edilebildiği görülmüştür. Bu durum, baskı parametrelerinin elektromanyetik tasarım açısından aktif değişkenler olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

PLA ve standart ABS filamentler, üretim kolaylığı ve düşük maliyet avantajlarıyla prototipleme ve düşük frekanslı uygulamalarda uygun çözümler sunarken, sabit dielektrik özellikleri nedeniyle yüksek frekanslı ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık PREPERM ABS filamentler, ayarlanabilir dielektrik sabiti ve düşük kayıp karakteristikleri sayesinde FDM tabanlı üretimi mikrodalga ve anten tasarımları için daha esnek ve işlevsel bir platform hâline getirmektedir. Bu bağlamda filament seçiminin, elektromanyetik performansı doğrudan

etkileyen temel bir tasarım kararı olduğu açıkça görülmektedir.

Katman yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi üretim parametrelerinin, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda elektromanyetik kayıplar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Daha düşük katman yüksekliği ile elde edilen düzgün yüzeylerin, saçılma ve iletim kayıplarını azaltarak performansı iyileştirdiği; ancak üretim süresi ile elektromanyetik performans arasında uygulamaya özgü bir denge kurulması gerektiği sonucuna varılmıştır. PREPERM ABS malzemesinin frekansa bağlı dielektrik sabiti ve kayıp tanjanı karakteristikleri, bu filamentlerin geniş bantlı ve milimetre dalga uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Düşük dispersiyon ve kontrollü kayıp davranışı, dielektrik yüklü antenler ve mikrodalga lensler gibi uygulamalarda tasarım öngörülebilirliğini artırmaktadır.

Gelecek çalışmalar, FDM tabanlı üretimde baskı parametrelerinin çok değişkenli optimizasyonuna odaklanarak, doluluk oranı, katman yüksekliği ve baskı yönünün birlikte değerlendirildiği kapsamlı elektromanyetik modellerin geliştirilmesini hedefleyebilir. Ayrıca PREPERM ABS gibi ayarlanabilir dielektrik özelliklere sahip filamentlerin çok katmanlı ve gradyan indisli yapılarda deneysel olarak doğrulanması, konformal ve fonksiyonel elektromanyetik bileşenlerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Bu doğrultuda, katmanlı üretim tabanlı yaklaşımların gelecekte anten ve mikrodalga mühendisliği alanında daha yaygın ve etkin biçimde kullanılacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Dokmetaş, B., & Arıcan, G. O. (2023). Design of dual-band SIW antenna for millimeter-wave communication. In 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR) (pp. 1–4). Belgrade, Serbia.
- Dökmetaş, B., & Belen, M. A. (2024). Microstrip antenna design for 2.4 GHz RF energy harvesting circuits with artificial neural networks. *Journal of Artificial Intelligence and Data Science*, 4(1), 33–38.
- Dökmetaş, B. (2024). Production of a cost effective microstrip antenna operating at 2.4 GHz and 5 GHz. *Journal of Artificial Intelligence and Data Science*, 4(2), 104–109.
- Mirzaee, M., & Noghanian, S. (2016). Additive manufacturing of a compact 3D dipole antenna using ABS thermoplastic and high temperature carbon paste. In 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI) (pp. 475–476). Fajardo, PR, USA.
- Mirzaee, M., Noghanian, S., Wiest, L., & Chang, I. (2015). Developing flexible 3D printed antenna using conductive ABS materials. In 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (pp. 1308–1309). Vancouver, BC, Canada.
- Munir, A., Syihabuddin, B., Maulana, M. F., & Aulia, R. (2023). Characterization of a 3D-printed PLA-based slotted SIW antenna. In 2023 Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW) (pp. 128–131). Riga, Latvia.
- Onay, M. Y., & Dokmetaş, B. (2025). 3D printed microstrip antenna for symbiotic communication: WiFi backscatter and bit rate evaluation for IoT. *Internet of Things*, 32, 101643.
- Poyanco, J. M., Pizarro, F., & Rajo-Iglesias, E. (2022). Cost-effective wideband dielectric planar lens antenna for millimeter wave applications. *Scientific Reports*, 12, 4204.
- Wahyudi, A. H., Sumantyo, J. T. S., Wijaya, S., & Munir, A. (2018). PLA-based 3D printed circularly polarized X-band horn array antenna for CP-SAR sensor. In 2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT) (pp. 1–4). Nanjing, China.



ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞMENİN GEÇMİŞİ, BUGÜNÜ VE GELECEĞİNE GENEL BAKIŞ

“ ”

Cihan AYHANCİ¹

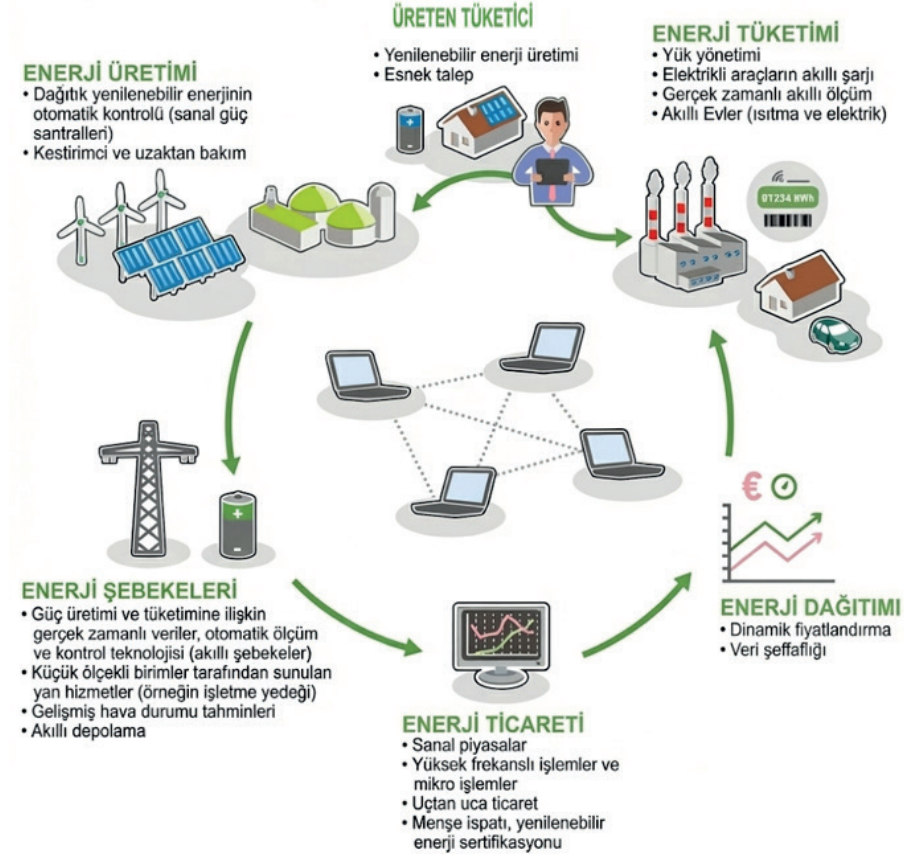
¹ Öğr. Gör.; Harran Üniversitesi Şanlıurfa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Elektrik ve Enerji Bölümü. ayhanci@harran.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5749-
0352

1. GİRİŞ

Enerji sektöründe dijital dönüşüm, geleneksel elektrik şebekelerinin dijital iletişim ve bilgi teknolojileriyle entegre edilerek daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürülmesini ifade eder [1]. Bu süreç, enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi arasındaki sınırları bulanıklaştırarak tüm paydaşların aktif rol aldığı “Akıllı Şebeke” (Smart Grid) kavramı etrafında şekillenmektedir. Bu dönüşüm, üretimin merkezileşmiş bir yapıdan, yenilenebilir kaynakların ve akıllı şebekelerin hakim olduğu dağıtık bir yapıya geçişini temsil eder [2, 3]. Dijitalleşme süreci, on yıllar içinde farklı aşamalardan geçerek günümüzdeki karmaşık yapıya ulaşmıştır. 1970’ler ve 80’lerde ilk adımlar, şebeke bileşenlerinin uzaktan izlenmesini sağlayan SCADA sistemleri ve mikroişlemci tabanlı dijital rölelerle atılmıştır [4]. 1990’lar ve 2000’lerde ise enerji sektörünün otonom bir yapıya ihtiyaç duymasıyla Akıllı Şebeke (Smart Grid) kavramı ortaya çıkmış; fiber-optik ve kablosuz iletişim teknolojileri yaygınlaşmıştır [4, 5]. 2020’ler ve Gelecek (Energy 5.0): Günümüzde odak noktası; dijital ikizler, blokzinciri, 5G ağları ve insan merkezli teknoloji kullanımıdır [4, 5]. Dijitalleşmeyi mümkün kılan bir dizi ileri teknoloji, modern enerji sistemlerinin omurgasını oluşturur. Nesnelerin İnterneti (IoT), sensörler ve aktüatörler aracılığıyla şebekenin her noktasından gerçek zamanlı veri toplanmasını sağlar [6, 7]. Bu sayede enerji akışları anlık olarak izlenebilir ve optimize edilebilir [1, 6]. Yapay Zeka (AI) ve Makine Öğrenmesi, devasa veri yığınlarını analiz ederek yük tahmini (load forecasting), enerji üretim tahmini ve şebeke güvenliği gibi karmaşık süreçleri yönetir [1]. Ayrıca, kestirimci bakım (predictive maintenance) ile ekipman arızalarını önceden belirleyerek maliyetleri düşürür [6, 8]. Blokzinciri (Blockchain), enerji işlemlerinde merkeziyetsiz bir yapı sunarak verilerin güvenli ve şeffaf bir şekilde paylaşılmasını sağlar [4, 9]. Özellikle eşten eşe (P2P) enerji ticareti ile tüketicilerin kendi ürettikleri fazla enerjiyi doğrudan birbirlerine satmalarına imkan tanır [6]. Dijital İkiz (Digital Twin), fiziksel şebekenin veya varlıkların sanal kopyalarını oluşturarak sistem performansını simüle etmeyi, test etmeyi ve hataları önceden tespit etmeyi kolaylaştırır [1, 4]. 5G Teknolojisi, yüksek hız ve düşük gecikme süresi ile çok sayıda cihazın aynı anda şebekeye bağlanmasını sağlayarak akıllı cihazlar arasındaki iletişimi hızlandırır [2]. Dijitalleşme, sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel hedeflere ulaşılmasında kritik bir rol oynar. Güneş ve rüzgar gibi değişken kaynakların şebekeye uyumunu yapay zeka destekli tahminleme sistemleriyle kolaylaştırır [6]. Tüketiciler, dijital araçlar sayesinde sadece enerji kullanan değil, aynı zamanda üreten, saklayan ve satan aktif paydaşlar haline gelir [5, 6].

Dijital dönüşüm büyük fırsatlar sunsa da bazı kritik engelleri de beraberinde getirir. Şebekenin dijitalleşmesi, onu siber saldırılara ve veri ihlallerine karşı daha hassas hale getirir [1]. İleri teknolojilerin mevcut altyapıya

entegrasyonu yüksek kurulum maliyetleri ve teknik uzmanlık gerektirir [4]. Farklı cihazlar ve sistemler arasındaki birlikte çalışabilirlik sorunları, geniş çaplı uygulamaları zorlaştırabilmektedir [4]. Dijitalleşme, gelişmiş bilgi işlem, iletişim teknolojileri ve veri odaklı karar alma süreçleri aracılığıyla enerji sistemlerinin temelden yeniden yapılandırılmasını kapsamaktadır [6]. Bu dönüşüm, üretim ve iletimden dağıtım ve tüketime kadar tüm enerji değer zinciri boyunca gerçek zamanlı izleme, öngörücü bakım, otonom kontrol ve optimizasyonu mümkün kılmaktadır [10]. Dijital dönüşüm, yenilenebilir enerji kaynaklarını, dağıtılmış üretimi, mikro şebekeleri ve akıllı şebekeleri, karbonsuzlaştırma, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik de dahil olmak üzere çağdaş enerji sorunlarını ele alabilen uyumlu, akıllı sistemlere entegre eden bir paradigma değişimini temsil eder [4]. Özetle, enerji sektöründe dijitalleşme; geleneksel, hantal ve tek yönlü bir yapıdan, merkeziyetsiz, akıllı ve düşük karbonlu bir ekosisteme geçişin en önemli itici gücüdür.



Şekil 1 Enerji Sektörünün Dijitalleşmesi

2. ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞMENİN TARİHSEL EVRİMİ

Enerji sektöründe dijitalleşme, geleneksel elektrik şebekelerinin dijital iletişim ve bilgi teknolojileriyle entegre edilerek daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürülmesi sürecidir [1]. Bu dönüşüm, üretimin merkezileşmiş bir yapıdan, yenilenebilir kaynakların ve akıllı şebekelerin hakim olduğu dağıtık bir yapıya geçişini temsil eder [11].

Dijitalleşmenin Temellerinin Atılması: Otomasyon ve SCADA Sistemleri

Enerji sektöründe dijitalleşmenin temelleri, manuel süreçlerden sistematik veri toplamaya geçişi sağlayan otomasyon ve SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama) sistemleri ile atılmıştır. 1970'ler ve İlk Adımlar: Güç sistemi bileşenlerinin uzaktan izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlayan SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama) sistemlerinin geliştirilmesi, 1970'li yıllara dayanan önemli bir dönüm noktasıdır [4]. Bu dönem, otomasyon ve bilgisayar kullanımının üretim optimizasyonunu artırmak için önceliklendirildiği Üçüncü Endüstri Devrimi ile paralellik gösterir [5]. SCADA sistemlerinin gelişimindeki asıl devrim, 1990'larda bilgi teknolojileri (IT) ve dijital iletişim sistemlerinin yükselişiyle yaşanmıştır. Bu sistemler, enerji operasyonları üzerinde gerçek zamanlı veri toplama ve kontrol imkanı sunarak manuel süreçlerden büyük bir kopuş sağlamıştır. SCADA sistemleri sayesinde operatörler, şebeke performansı ve operasyonel durum hakkında anlık görüşlerde bulunmaya başlamıştır [8]. Bu durum, iletişim teknolojilerindeki ilerlemelerle birleşerek şebekenin gerçek zamanlı yönetilmesi fırsatını doğurmuştur. SCADA ve otomasyonun entegrasyonundan önce, şebekedeki koruma ekipmanları büyük ölçüde elektromekanik yapıdaydı ve dijital sensörlerle herhangi bir bağlantısı yoktu. Bu durum, operatörlerin kontrol odalarından erişebildiği bilgileri kısıtlıyordu; ancak altyapı güncellemeleriyle dijital sensörlerin ve otomatik koruma sistemlerinin eklenmesi, şebeke zekasını artırmıştır. Günümüzde SCADA, iletim ağları için merkezi bir kontrol birimi olarak çalışmaya devam etmektedir [12]. Ayrıca, Dağıtık Enerji Kaynakları Yönetim Sistemleri (DERMS) gibi modern yapılar içinde de koordinasyonu sağlayan temel bileşenlerden biri olarak kullanılmaktadır [4]. Otomasyon ve SCADA sistemleri, enerji sektörünü manuel veri okumalarından kurtararak, verinin operasyonel kararların merkezine oturduğu akıllı şebeke vizyonuna giden yolu açmıştır.

Akıllı Şebeke Kavramının Ortaya Çıkışı

Akıllı şebeke (Smart Grid) kavramı, geleneksel elektrik şebekelerinin dijital teknolojiler ve iletişim sistemleri ile entegre edilerek üretim, dağıtım ve tüketim süreçlerinin daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir hale getirilmesi vizyonu ile ortaya çıkmıştır [9]. Akıllı şebeke düşüncesinin en erken kökleri, Nikola Tesla'nın daha uyarlanabilir bir alternatif akım (AC) güç sistemi önerdiği 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanır. 20. yüzyıl boyunca yaşanan teknolojik gelişmeler akıllı şebeke devrimine zemin

hazırlamıştır [12]. Özellikle 1970’lerde uzaktan izleme ve kontrol sağlayan SCADA sistemlerinin geliştirilmesi, şebekenin gerçek zamanlı yönetilmesi yolunda atılmış en büyük adımlardan biridir. Modern anlamda akıllı şebeke kavramı 1990’lı yıllarda belirginleşmeye başlamıştır. Bu dönemde enerji sektörü; artan elektrik talebini karşılamak, şebeke güvenilirliğini artırmak ve güneş ile rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını sisteme entegre edebilmek için akıllı, otonom ve dayanıklı bir şebekeye ihtiyaç duyulduğunu fark etmiştir [2]. 1999 yılında ABD’de kurulan CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) (Elektrik Güvenilirliği Teknoloji Çözümleri Konsorsiyumu), modern şebeke bağlantılı mikroşebeke ve akıllı şebeke konseptinin öncüsü olarak kabul edilmektedir. Bu girişim, şebekeyi çok sayıda dağıtık enerji kaynağını entegre edebilen “tak-çalıştır” (plug-and-play) bir sisteme dönüştürmeyi hedeflemiştir [4]. Kavram, 2000’lerin başında dünya genelinde popülerlik kazanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Avrupa Birliği gibi bölgeler, gelişmiş şebeke teknolojilerinin faydalarını keşfetmek amacıyla büyük ölçekli araştırma ve geliştirme programlarına yatırım yapmaya başlamıştır. Akıllı şebekelerin yaygınlaşması; karbon emisyonlarını azaltma, şebeke direncini (resilience) güçlendirme, enerji verimliliğini artırma ve elektrik sisteminin genel ekonomisini iyileştirme ihtiyacıyla hız kazanmıştır [2]. 2010’lu yıllardan itibaren büyük veri analitiği, yapay zeka (AI) ve bulut bilişim gibi teknolojilerin devreye girmesiyle şebekeler; sadece enerjinin değil, verinin de çift yönlü aktığı karmaşık sistemlere dönüşmüştür [11]. Akıllı şebeke kavramı; 19. yüzyıldaki temel elektrik fikirlerinden evrilerek, 1990’larda otonom ve zeki bir yönetim ihtiyacıyla modern formunu almış ve 21. yüzyılın başında küresel bir enerji stratejisi haline gelmiştir [2, 12].

Büyük Veri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) Devrimi

Enerji sektöründe Büyük Veri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) devrimi, geleneksel şebekelerin dijital, otonom ve veri odaklı sistemlere dönüşmesini sağlayan en kritik aşamalardan biridir [8]. Bu devrim, milyarlarca bağlı cihazın gerçek zamanlı veri üretmesi ve bu verilerin gelişmiş analitik yöntemlerle işlenerek operasyonel verimliliğe dönüştürülmesi üzerine kuruludur [3, 13]. Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi, enerji altyapısının her noktasına yerleştirilen sensörler ve akıllı sayaçlar aracılığıyla şebekenin görünürlüğünü artırır [7]. Gelişmiş Sayaç Altyapısı (AMI), geleneksel sayaçların yerini alan akıllı sayaçlar, enerji tüketimi hakkında gerçek zamanlı veri toplayarak çift yönlü iletişimi ve dinamik fiyatlandırmayı mümkün kılar [8, 12]. IoT sensörleri; voltaj seviyeleri, akım akışları, sıcaklık ve ekipman sağlığı gibi parametreleri anlık olarak takip ederek şebeke stabilitesini sağlar [14]. Güneş panelleri ve rüzgar türbinleri üzerindeki sensörler, üretim performansını izleyerek değişken kaynakların şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırır [9].

IoT cihazlarından gelen devasa veri yığınları (hız, hacim ve çeşitlilik), büyük veri analitiği olmadan anlamlandırılmaz [12]. ETL (Ayıklama, Dönüştürme, Yükleme) süreçleri kullanılarak ham veriler temizlenir ve karar vericiler için anlamlı bilgilere dönüştürülür [14]. Yapay zeka ve makine öğrenmesi destekli analitikler; yük tahmini, enerji talebi öngörüsü ve yenilenebilir enerji üretim tahminleri yaparak enerji arz-talep dengesini optimize eder [8, 10]. Kestirimci bakım ile ekipmanlardan gelen veriler analiz edilerek arızalar gerçekleşmeden önce tespit edilir, bu da bakım maliyetlerini düşürür ve sistemin ömrünü uzatır. Bu devrim sadece veri toplama ve işleme ile sınırlı kalmayıp diğer ileri teknolojilerle birleşerek yeni yapılar oluşturur. Büyük Veri ve IoT devrimi, enerjiyi sadece bir meta olmaktan çıkarıp analiz edilebilir ve yönetilebilir dijital bir varlığa dönüştürmüştür.

Endüstri 4.0 ve Enerji Sektörü Dönüşümü

Endüstri 4.0, enerji sektöründe “Energy 4.0” olarak adlandırılan ve enerji endüstrisinin üretim, dağıtım, depolama ve pazarlama süreçlerini kapsayan kapsamlı bir dijital dönüşüm sürecini ifade eder [5]. Bu dönüşüm, fiziksel dünyanın (yenilenebilir enerji, nükleer güç, yeni şebekeler) hızla değişmesi ve büyük veri akışının artmasıyla tetiklenmiştir [5]. Enerji gelişimindeki dönüm noktaları endüstriyel devrimlerle şu şekilde ilişkilendirilmektedir.

Tablo 1 Enerji gelişimindeki dönüm noktaları

Terim	Tanımı
Enerji 1.0	18. yüzyılın sonlarında mekanik üretimin başlaması
Enerji 2.0	19. yüzyılın sonlarında elektrifikasyon ve küresel elektrik şebekelerinin kurulması
Enerji 3.0	20. yüzyılın ortalarında otomasyon ve bilgisayarların üretim optimizasyonu için kullanılması
Enerji 4.0	21. yüzyılın başlarında akıllı ve birbirine bağlı sistemlerin (Endüstri 4.0) esnekliği ve üretkenliği artırması

Bu teknolojik entegrasyonun temel amacı, enerji sistemlerini merkezileştirmiş, dijitalleşmiş ve düşük karbonlu hale getirmektir [9]. Bu süreçte tüketicinin rolü değişerek, enerjiyi hem üreten hem de tüketen “Üreten Tüketici” (Prosumer) statüsüne evrilmektedir [6]. Ayrıca, binaların operasyonel verimliliğinin artırılmasıyla enerji tüketiminin yaklaşık %10 oranında azaltılabileceği öngörülmektedir [3]. Ancak bu dönüşüm; yüksek kurulum maliyetleri, siber güvenlik riskleri, veri gizliliği endişeleri ve standardizasyon eksikliği gibi önemli zorluklarla karşı karşıyadır [1].

3. ENERJİDE DİJİTALLEŞMENİN MEVCUT DURUMU

Günümüzün enerji sistemleri, birden fazla teknoloji katmanını entegre eden gelişmiş dijital altyapı ile karakterize edilmektedir [15]. Modern akıllı

şebekeler, genellikle günde terabaytlarca devasa veri akışı üreten gelişmiş sensörler, akıllı sayaçlar ve IoT cihazları kullanır ve üretim, iletim, dağıtım ve tüketim genelinde gerçek zamanlı görünürlük sağlar [12]. Bulut bilişim platformları, bu verilerin işlenmesi için gerekli hesaplama kaynaklarını sağlarken, uç bilişim, şebeke istikrarı için kritik olan yerelleştirilmiş, düşük gecikmeli karar verme olanağı sağlar. Çağdaş akıllı enerji yönetim sistemlerini, merkezi optimizasyondan dağıtılmış otonom ajanlara kadar birden fazla kontrol stratejisini entegre eden “beyin benzeri” mimariler olarak tanımlamaktadır. Bu sistemler, yük tahmini, yenilenebilir enerji tahmini ve dinamik fiyatlandırma için makine öğrenimi algoritmalarından yararlanarak operasyonel verimlilik ve güvenilirlikte önemli iyileştirmeler sağlamaktadır [15]. Enerjide dijitalleşmenin mevcut durumu, geleneksel merkezi elektrik şebekelerinden, dijital teknolojilerin ve iletişim sistemlerinin entegre edildiği akıllı, esnek ve etkileşimli ağlara doğru evrilen kapsamlı bir dönüşüm sürecini temsil etmektedir [1]. Günümüzde bu süreç, enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi arasındaki sınırların belirsizleştiği “Akıllı Şebeke” (Smart Grid) ve “Enerji 4.0/5.0” kavramları etrafında şekillenmektedir [2, 5]. Modern enerji altyapısı, yüksek hız ve düşük gecikme süresi sağlayan 5G teknolojisi ile donatılmaktadır. 5G, enerji jeneratörleri, dağıtım ağları ve son kullanıcılar arasında kesintisiz iletişim sağlayarak yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu kolaylaştıran kritik bir kolaylaştırıcıdır. Mevcut kullanım durumları arasında akıllı ölçüm (smart metering), dağıtım otomasyonu ve enerji depolama yönetimi öne çıkmaktadır [2]. Akıllı şebeke pazarının 2021’de 43,1 milyar dolar değerine ulaştığı ve 2026 yılına kadar 103,4 milyar dolara çıkacağı öngörülmektedir [5].

Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Uygulamaları

Yapay Zeka (AI) ve Makine Öğrenimi (ML), günümüzde enerji sistemlerinden sağlığa, tarımdan siber güvenliğe kadar pek çok alanda verimliliği artıran ve otonom karar verme süreçlerini mümkün kılan devrimsel teknolojilerdir [1, 10, 16]. Bu teknolojiler, devasa veri yığınlarını analiz ederek insan gözünün kaçırabileceği kalıpları ortaya çıkarma ve gelecekteki olayları tahmin etme yeteneğine sahiptir [13, 14]. Enerji sektöründe yapay zeka, geleneksel şebekelerin dijital ve akıllı sistemlere dönüşmesinde merkezi bir rol oynamaktadır. Makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş tüketim verilerini ve hava durumu gibi dış faktörleri analiz ederek gelecekteki enerji talebini yüksek doğrulukla tahmin etmektedir [4, 14]. Güneş ve rüzgar gibi kesintili kaynakların üretim tahminlerini yaparak, bu kaynakların şebekeye sorunsuz entegrasyonunu ve enerji depolama sistemlerinin optimize edilmesini sağlar [6, 10]. Yapay zeka, şebeke ekipmanlarından gelen verileri sürekli izleyerek arızaları henüz gerçekleşmeden tespit eder, böylece bakım maliyetlerini düşürür ve kesintileri önler [1].



Şekil Enerji sistemlerinde yapay zeka uygulamaları

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Sensör Uygulamaları

Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel nesnelerin sensörler, yazılımlar ve iletişim teknolojileri aracılığıyla birbirine bağlanarak veri toplamasını ve paylaşmasını sağlayan bir ekosistemdir [14]. Enerji sektöründen tarıma, sağlıktan akıllı şehirlere kadar geniş bir yelpazede kullanılan bu teknoloji, verinin gerçek zamanlı analiz edilmesiyle otonom karar verme süreçlerini mümkün kılar [6]. Nesnelerin İnterneti (IoT), modern enerji sistemlerinin ve Akıllı Şebekelerin (Smart Grid) temel taşıdır [2, 7]. Şebekeye yerleştirilen sensörler; voltaj seviyeleri, akım akışı, sıcaklık ve ekipman sağlığı gibi verileri anlık olarak toplar [14]. Akıllı sayaçlar (AMI), enerji tüketim kalıplarını analiz ederek yük dengeleme, dinamik fiyatlandırma ve kesinti yönetimi sağlar [8]. Rüzgar türbinleri ve güneş panelleri üzerindeki sensörler, ekipman arızalarını önceden tahmin eden kestirimci bakım süreçlerini destekler [1]. IoT teknolojileri, yaşam alanlarını daha güvenli ve enerji verimli hale getirir. Işıklar, klimalar ve diğer cihazlar mobil uygulamalar üzerinden kontrol edilebilir; duman ve gaz sensörleri yangın veya sızıntı durumunda kullanıcıyı anlık olarak uyarır. QR kod tabanlı akıllı kilit sistemleri ve biyometrik sensörler ev güvenliğini artırır. Akıllı çöp kutuları, doluluk oranlarını sensörlerle takip ederek toplama rotalarını optimize eder ve karbon emisyonlarını azaltır [14]. IoT'nin yaygınlaşması bazı riskleri de beraberinde getirir. Sensörlerden toplanan kişisel verilerin (tüketim alışkanlıkları, sağlık verileri) korunması en önemli önceliklerden biridir. Farklı üreticilerin cihazları arasındaki birlikte

çalışabilirlik (interoperability) sorunları ve yüksek kurulum maliyetleri hâlâ bir engeldir [4].



Şekil Nesnelerin İnterneti Uygulamalar

Blokzincir ve Merkezi Olmayan Enerji Sistemleri

Blokzinciri teknolojisi, merkezi olmayan enerji sistemlerinin (özellikle mikroşebekelerin) yönetiminde merkeziyetsiz, dijitalleşmiş ve düşük karbonlu bir yapı kurmak için temel bir teknoloji olarak kabul edilmektedir [9]. Geleneksel merkezi şebekelerden, her düğümün (node) benzer erişim ve veri yeteneklerine sahip olduğu dağıtık sistemlere geçiş, sistemin tek nokta arızalarından (single point failure) etkilenmesini önlemeye yardımcı olmaktadır [9, 11]. Bu dönüşümün en büyük uygulama alanını, blokzinciri literatüründe yaklaşık %51-52’lik bir paya sahip olan ve tüketicilerin ürettikleri fazla enerjiyi aracı olmadan birbirlerine satabildikleri eşten eşe (P2P) enerji ticareti oluşturmaktadır. Bu model, son kullanıcıları sadece tüketen değil, aynı zamanda enerji üreten, depolayan ve paylaşan aktif “üreten tüketiciler” statüsüne taşımaktadır. Karbon emisyonu takibi ve yenilenebilir enerji sertifikalarının yönetiminde blokzinciri, verilerin şeffaf bir şekilde kaydedilmesini sağlayarak mükerrer sayım (double-counting) ve veri sahteciliği riskini ortadan kaldırır. Blokzinciri; kriptografik hash fonksiyonları (SHA-256 gibi), dijital imzalar ve fikir birliği (consensus) mekanizmaları aracılığıyla verilerin izinsiz değiştirilmesini neredeyse

imkansız kılarak güvenli bir bilgi altyapısı sunar. Enerji işlemlerinin önceden tanımlanmış kurallar dahilinde insan müdahalesi olmadan otomatik olarak gerçekleşmesini ve ödemelerin anında tamamlanmasını sağlar [9]. Blokzinciri tabanlı sistemler, 5G'nin sunduğu yüksek bağlantı hızı ve düşük gecikme süresiyle birleşerek milyonlarca IoT cihazının (akıllı sayaçlar, sensörler vb.) güvenli ve gerçek zamanlı bir şekilde veri paylaşmasını mümkün kılmaktadır [2]. Bu teknolojik gelişmelere rağmen sistemin yaygınlaşması önünde bazı kritik engeller bulunmaktadır. Ölçeklenebilirlik sorunları, blokzinciri doğrulama süreçlerindeki yüksek enerji tüketimi, karmaşık altyapı kurulum maliyetleri ve mevcut enerji piyasası kurallarıyla (regülasyon) uyum sorunları hâlâ aşılması gereken en büyük zorluklardır [9].



Şekil Enerji Sektöründe Blokzincir Uygulamaları

Enerji Sistemleri için Dijital İkizler

Enerji sistemleri için dijital ikizler (DT), fiziksel varlıkların, süreçlerin veya tüm sistemlerin yüksek doğruluklu ve dinamik olarak güncellenen sanal kopyalarıdır. Geleneksel statik modellerin aksine dijital ikizler, fiziksel dünyadaki karşılıklarıyla gerçek zamanlı veri alışverişi yaparak izleme, teşhis, tahmin ve kontrol süreçlerini yönetir. Akıllı şebekelerde bu teknoloji; teknik kayıpları medyan %5, pik talebi ise %6 oranında azaltırken, voltaj

uyumluluğunu yaklaşık yüzde 12,5 puanı iyileştirebilmektedir. Yapay Zeka (AI) destekli dijital ikizler, telemetri verilerini fizik kanunlarıyla birleştirerek durum farkındalığı ve şebeke ölçeğinde optimizasyon sağlar. Özellikle Graf Sinir Ağları (GNN), elektrik şebekesinin topolojisiyle doğal bir uyum göstererek güç akışı analizi ve durum tahminlemede yüksek hız ve doğruluk sunar. Varlık odaklı dijital ikizler ise trafolar, devre kesiciler ve kablolar gibi kritik ekipmanların sağlığını izleyerek düşük maliyetli müdahalelere olanak tanıyan kestirimci bakım hizmetleri sunar. Örneğin bir trafo ikizi, çözünmüş gaz analizi (DGA) ve termal stres verilerini kullanarak ekipmanın kalan ömrünü olasılıksal olarak hesaplayabilir. Dijital ikizler enerji sistemlerinde mikroşebekelerin yönetiminde kullanılmaktadır [17]. Mikroşebekelerin tasarımını, operasyonunu ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu optimize etmek için sanal kopyalar üzerinden simülasyonlar yapılır [4]. Akıllı kampüslerde dijital ikizler; HVAC (ısıtma, soğutma ve havalandırma) sistemlerini, aydınlatma ağlarını ve iç mekan hava kalitesini analiz ederek enerji tüketiminde %10 ila %15 arasında tasarruf sağlayabilir [6].



Şekil Dijital İkiz Uygulamaları

4. GELECEĞE YÖNELİK YÖNELİMLER VE ORTAYA ÇIKAN TRENDLER

Enerji sektöründeki dijitalleşme süreci, sadece mevcut sistemlerin iyileştirilmesiyle sınırlı kalmayıp, enerjinin üretimi, yönetimi ve ticareti konusunda köklü değişimleri beraberinde getiren yeni trendlere yönelmektedir. Gelecekteki bu yönelimler, merkezi olmayan, esnek ve yapay zeka ile optimize edilmiş bir enerji ekosistemini hedeflemektedir.

İleri İletişim ve Hesaplama Teknolojileri (5G, 6G ve Kuantum)

5G teknolojisi, yüksek veri hızı ve düşük gecikme süresiyle akıllı şebekelerin omurgasını oluşturmaya devam ederken, gelecek çalışmalar şimdiden 6G ve daha gelişmiş telekomünikasyon sistemlerine odaklanmaktadır [2]. Uç (Edge) ve Sis (Fog) Bilişim: Verilerin merkezi bulut sunucuları yerine veri kaynağına yakın yerlerde (trafo veya sayaç seviyesinde) işlenmesi, gerçek zamanlı karar verme kapasitesini artıracak ve şebeke gecikmelerini milisaniyeler seviyesine indirecektir [6, 9]. Kuantum Hesaplama, henüz donanımsal kısıtlamaları olsa da kuantum hesaplama, karmaşık çoklu tesis koordinasyonu, üretim planlama ve büyük ölçekli şebeke optimizasyonları için devrim yaratma potansiyeline sahiptir [6, 8].

Enerji Blokzinciri ve Karbonsuzlaşma

Blokzinciri teknolojisinin enerji sektöründe ana akım haline gelmesinin 5 ila 10 yıl süreceği öngörülmektedir. Bu teknolojinin 2030 yılına kadar 3 trilyon dolarlık bir iş hacmi yaratması beklenmektedir. Gelecekte tüketiciler sadece kendi aralarında enerji ticareti yapmakla kalmayacak; blokzinciri, karbon kredilerinin ve yenilenebilir enerji sertifikalarının (REC) şeffaf bir şekilde izlenmesini sağlayarak net-sıfır hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştıracaktır. Blokzincirinin ticari başarısı, hükümetlerin öncülüğünde geliştirilecek olan uluslararası düzenleyici mekanizmalara ve standartlara bağlıdır [9].

Dijital İkizler ve Olasılıksal Modelleme

Geleceğin dijital ikizleri sadece fiziksel varlıkları taklit etmekle kalmayıp, olasılıksal tahminleme yaparak belirsizlikleri (hava durumu, talep dalgalanmaları) yönetebilen ve “ya olursa” senaryolarını test edebilen yapılar olacaktır [17]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artmasıyla geleneksel jeneratörlerin sunduğu atalet (inertia) azalmaktadır; Sanal Senkron Jeneratörler (VSG) teknolojisi, bu eksiği dijital olarak simüle ederek şebeke stabilitesini koruyacaktır [11].

Yeni Enerji Aktörleri ve Sanal Yapılar

Sanal Güç Santralleri (VPP), dağıtık haldeki güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve enerji depolama sistemleri, yapay zeka aracılığıyla kümelenerek

tek bir devasa santral gibi yönetilecek ve şebekeye yardımcı hizmetler sunacaktır [11].

Elektrikli araçlar (EV), araçtan şebekeye (V2G) teknolojisi ile sadece ulaşım aracı değil, şebekenin ihtiyaç duyduğu anlarda enerji sağlayan mobil depolama birimleri olarak görev yapacaktır [11].

Demokratikleşme ve üreten tüketici toplulukları ile enerji yönetimi, bireysel seviyeden yerel prosumer topluluklarına kayacak; bu topluluklar kendi enerjilerini üreten, paylaşan ve ana şebekeden bağımsız çalışabilen mikroşebekelere dönüşecektir [11].

Şeffaflık ve Güven Odaklı Gelişim

Yapay zekanın verdiği kararların (örneğin bir arıza teşhisi veya fiyat tahmini) nedenlerinin insanlar ve düzenleyici kurumlar tarafından anlaşılabilir olması, sistem güvenilirliğini arttıracaktır [1, 17]. 5G/6G ve IoT ile artan cihaz sayısı saldırı yüzeyini genişlettiğinden, gelecekte siber güvenlik; uçtan uca şifreleme, gelişmiş kimlik doğrulama ve yapay zeka destekli tehdit algılama sistemleri üzerine kurulacaktır [1, 4, 13]

5. SONUÇ

Enerjide dijitalleşme süreci, geleneksel ve merkezi elektrik şebekelerinden, dijital teknolojilerin ve çift yönlü iletişim sistemlerinin entegre edildiği akıllı, esnek ve sürdürülebilir bir ekosisteme geçişi temsil etmektedir. Enerji sistemlerinin dijitalleşmesi, sürdürülebilirlik, ekonomik kalkınma ve yaşam kalitesi açısından derin etkileri olan 21. yüzyılın en önemli teknolojik dönüşümlerinden birini temsil etmektedir. Bu inceleme çalışmasında ulaşılan sonuçlar, dijital teknolojilerin yalnızca kademeli iyileştirmeler değil, iklim değişikliğiyle mücadele ederken artan enerji taleplerini karşılamak için gerekli olan enerji geçişinin temel unsurları olduğunu göstermektedir. Elde edilecek başarı, teknoloji dağıtımının ötesine geçerek teknik, ekonomik, organizasyonel ve politika zorluklarının tüm yelpazesini ele almayı gerektirmektedir. Azalan teknoloji maliyetleri, politika desteği, kanıtlanmış faydalar ve acil iklim gerekliliklerinin bir araya gelmesi, benzersiz bir fırsat penceresi oluşturmaktadır. Bu fırsatı değerlendirmek, tüm paydaşların politika yapıcılar, enerji şirketleri, teknoloji sağlayıcıları, araştırmacılar ve tüketicilerin akıllı, sürdürülebilir ve adil enerji sistemleri vizyonunu gerçekleştirmek için birlikte çalışmasını gerektiren koordineli bir eylem gerektirmektedir. Tamamen dijitalleşmiş enerji sistemlerine doğru yolculuk son hızla devam etmektedir. Ancak enerjide dijitalleşmenin gidişatı açık, faydaları büyük ve gerekliliği acildir. Elde edilen başarılardan ders çıkararak, zorlukları sistematik bir şekilde ele alarak ve sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve erişilebilirlik gibi nihai hedeflere odaklanarak, enerji sektörü bu dönüşümü başarıyla yönetebilir ve toplumun ihtiyaç duyduğu temiz, verimli ve dayanıklı enerji sistemlerini sunabilir.

REFERANSLAR

1. Marques, P.C. and P.A. Oliveira, *Artificial intelligence technologies applied to smart grids and management*. 2024.
2. Rituraj, R., et al. *5G for Smart Grids: Review, Taxonomy, Bibliometrics, Applications and Future Trends*. in *2023 IEEE 27th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. 2023. IEEE.
3. Akberdina, V. and A. Osmonova. *Digital transformation of energy sector companies*. in *E3S web of conferences*. 2021. EDP Sciences.
4. Irmak, E., E. Kabalci, and Y. Kabalci, *Digital transformation of microgrids: a review of design, operation, optimization, and cybersecurity*. *Energies*, 2023. **16**(12): p. 4590.
5. Mourtzis, D., J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, *Personalized Services for Smart Grids in the framework of Society 5.0: A Smart University Campus Case Study*. *Technical Annals*, 2023. **1**(2).
6. Attah, R.U., et al., *Digital transformation in the energy sector: Comprehensive review of sustainability impacts and economic benefits*. *International Journal of Advanced Economics*, 2024. **6**(12): p. 760-776.
7. Núñez, I., et al. *Key technologies applied to the optimization of smart grid systems based on the Internet of Things: A Review*. in *2022 V Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software y Salud Electrónica y Móvil (AmI-TIC)*. 2022. IEEE.
8. Agu, E., et al., *Challenges and opportunities in data-driven decision making for the energy sector*. *International Journal of Scholarly Research in Multidisciplinary Studies*, 2024.
9. Teng, F., et al., *A comprehensive review of energy blockchain: Application scenarios and development trends*. *International Journal of Energy Research*, 2021. **45**(12): p. 17515-17531.
10. Gupta, P. *Integrating Renewable Energy and Advanced Technologies for Sustainable Electricity Generation: A Comprehensive Review*. in *2024 International Conference on Emerging Innovations and Advanced Computing (INNOCOMP)*. 2024. IEEE.
11. Ohanu, C.P., S.A. Rufai, and U.C. Oluchi, *A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration*. *Heliyon*, 2024. **10**(3).
12. Biswas, P., et al., *An extensive and methodical review of smart grids for sustainable energy management-addressing challenges with ai, renewable energy integration and leading-edge technologies*. *IEEE Access*, 2025.
13. Sehgal, R. and R. Soryan, *Leveraging AI and IoT for Energy Efficiency in the Industrial Sector: A Comprehensive Review*. *management*, 2025. **8**: p. 12.

14. Whig, P., et al., *Sustainable development through machine learning, AI and IoT: first international conference, ICSD 2023, Delhi, India, July 15–16, 2023, Revised Selected Papers*. 2023: Springer Nature.
15. Rajendran, G., R. Raute, and C. Caruana, *The Brain Behind the Grid: A Comprehensive Review on Advanced Control Strategies for Smart Energy Management Systems*. *Energies*, 2025. **18**(15): p. 3963.
16. Akinci, R., E. Akdogan, and M.E. Aktan, *Comparison of machine learning algorithms for recognizing drowsiness in drivers using electroencephalogram (EEG) signals*. 2022.
17. Ahmed, M. and M.R. Khan, *ARTIFICIAL INTELLIGENCE-ENABLED DIGITAL TWINS FOR ENERGY EFFICIENCY IN SMART GRIDS*. *Review of Applied Science and Technology*, 2025. **4**(02): p. 580-615.



RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ ÖLÇEĞİNDE DİJİTAL İKİZ YAKLAŞIMI: TÜRBİN İZ ETKİSİ, KONTROL VE OPTİMİZASYON

“ ”

Umut Saray¹

¹ Department of Electronic Automation, Turhal Vocational School, Tokat
Gaziosmanpaşa University, Tokat, Türkiye, (umutsaray@gmail.com) (ORCID:
0000-0003-3339-6876)

1. Giriş

Rüzgar enerjisi sistemleri, küresel ölçekte artan kurulu güçle birlikte yalnızca tekil türbin performansı açısından değil, rüzgar enerji santrali (wind farm) ölçeğinde bütüncül bir bakış açısıyla ele alınması gereken karmaşık yapılar haline gelmiştir. Modern rüzgar enerji santrallerinde türbinler, birbirinden bağımsız çalışan makineler olmaktan ziyade, aerodinamik olarak etkileşim içinde bulunan ve bu etkileşimler nedeniyle kolektif davranış sergileyen bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda rüzgar türbinleri arasındaki türbin iz (wake) etkileri, enerji üretimi, yapısal yükler ve bakım gereksinimleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Türbin iz etkisi, bir türbinin arkasında oluşan hız düşümü ve artan türbülans bölgesi olarak tanımlanmakta ve bu etkinin aşağı akıştaki türbinlerin performansını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Bu durum, rüzgar enerji santrali ölçeğinde enerji kayıplarına, düzensiz yük dağılımlarına ve uzun vadede yapısal yorulmanın hızlanmasına neden olabilmektedir. Literatürde türbin iz etkilerinin rüzgar enerji santrali üretiminde %10–20 seviyelerine varan kayıplara yol açabildiği rapor edilmiştir (Knudsen et al., 2015). Dolayısıyla rüzgar enerjisinde verimlilik ve sürdürülebilirlik hedefleri, tek türbin odaklı yaklaşımların ötesine geçilmesini zorunlu kılmaktadır.

Klasik rüzgar enerji santrali analizleri, çoğunlukla basitleştirilmiş türbin iz modelleri veya yüksek hesaplama maliyetine sahip Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) tabanlı simülasyonlar üzerinden yürütülmektedir. Basit modeller gerçek zamanlı uygulamalara uygun olmakla birlikte doğruluk açısından sınırlı kalmakta; CFD tabanlı yöntemler ise yüksek doğruluk sunsa da saha ölçeğinde sürekli kullanım için pratik olmamaktadır. Bu ikilem, rüzgar enerji santrali ölçeğinde

hem gerçekçi hem de operasyonel olarak uygulanabilir yeni yaklaşımlara olan ihtiyacı açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bu noktada dijital ikiz kavramı, rüzgar enerji santralleri için umut vadeden bir çerçeve sunmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel sistemin sanal bir temsilini oluşturmakla kalmayıp, sahadan gelen verilerle sürekli güncellenen ve bu veriler üzerinden kestirim, optimizasyon ve karar destek çıktıları üreten dinamik bir yapı olarak tanımlanmaktadır. Özellikle enerji sistemleri bağlamında dijital ikizler; izleme, kestirimci bakım ve operasyonel optimizasyon gibi fonksiyonları tek bir çatı altında birleştirebilme potansiyeline sahiptir (Fuller et al., 2020).

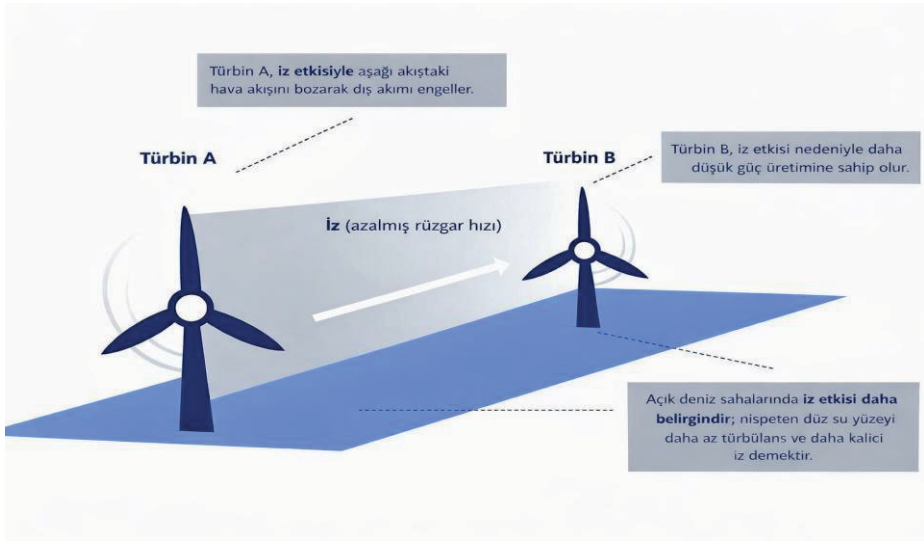
Rüzgar enerji santrali ölçeğinde ele alındığında dijital ikiz yaklaşımı, yalnızca bireysel türbinlerin değil, türbinler arası etkileşimlerin ve saha genelindeki akış yapısının birlikte değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Yapay zeka destekli veri güdümlü modeller ile fizik tabanlı yaklaşımların bir arada kullanılması, türbin iz etkilerinin daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini ve santral kontrol stratejilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, dijital ikizi rüzgar santrallerinde yalnızca bir analiz aracı olmaktan çıkararak, aktif bir kontrol ve karar destek mekanizmasına dönüştürmektedir (Tao et al., 2019).

Bu bölümde, rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz kavramı; türbin iz etkileri, kontrol stratejileri ve optimizasyon yaklaşımları çerçevesinde ele alınmaktadır. Amaç, mevcut literatürde sıklıkla karşılaşılan tek türbin odaklı bakış açısının ötesine geçerek, dijital ikizin rüzgar enerji santrali düzeyinde nasıl konumlandırılabilceğini ve bu yaklaşımın enerji üretimi ile yapısal yük yönetimi açısından sunduğu olanakları ortaya koymaktır.

2. Rüzgar Enerji Santrali Dinamikleri ve Türbin iz Etkisi

Rüzgar enerji santralleri, aerodinamik açıdan birbirleriyle etkileşim halinde bulunan türbinlerden oluşan karmaşık sistemler olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemlerde her bir türbin, yalnızca bulunduğu noktadaki rüzgar koşullarından değil, aynı zamanda komşu türbinlerin oluşturduğu akış bozulmalarından da etkilenmektedir. Bu etkileşimlerin en belirgin ve kritik sonucu türbin iz etkisi olarak tanımlanmaktadır.

Türbin iz etkisi, bir rüzgar türbininin rotorundan geçen akıştan enerji çekmesi sonucunda, türbinin arkasında hız düşümü ve artan türbülans içeren bir bölgenin oluşmasıdır.



Şekil.1 Yukarı akıştaki bir rüzgar türbininin (Türbin A), rotorundan geçen akıştan enerji çekmesi sonucunda oluşan türbin iz (wake) bölgesi ve bu iz etkisinin aşağı akıştaki türbinin (Türbin B) maruz kaldığı efektif rüzgar hızını ve güç üretimini azaltması (NedZero, 2024).

Bu türbin iz bölgesi, aşağı akışta yer alan türbinlerin maruz kaldığı efektif rüzgar hızını azaltmakta ve türbülans seviyesini artırmaktadır. Bu durum, rüzgar enerji santrali genelinde hem enerji üretiminin

azalmasına hem de yapısal yüklerin düzensiz biçimde artmasına neden olmaktadır.

Rüzgar enerji santrali dinamikleri, tekil türbin davranışlarının basit bir toplamı olarak ele alınamamaktadır. Türbinler arası mesafe, dizilim geometrisi, rüzgar yönü dağılımı ve atmosferik kararlılık gibi faktörler, türbin iz etkisinin şiddetini ve mekansal yayılımını doğrudan belirlemektedir. Bu nedenle rüzgar enerji santrali performansı, zamanla değişen ve güçlü biçimde bağlamsal özellikler taşıyan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.1. Türbin iz etkisinin fiziksel temelleri

Türbin iz etkisinin fiziksel temeli, momentum korunumu ilkesi ve türbülans dinamiklerine dayanmaktadır. Bir rüzgar türbini, rotor düzleminden geçen akıştan kinetik enerji çektiğinde, akışın ortalama hızı azalmakta ve buna bağlı olarak akış alanında türbülans seviyesi artmaktadır. Bu süreç sonucunda türbinin arka bölgesinde, serbest akışa kıyasla daha düşük rüzgar hızına ve daha yüksek türbülans yoğunluğuna sahip bir türbin iz (wake) bölgesi oluşmaktadır. Oluşan bu iz bölgesi, literatürde genellikle hız açığı (velocity deficit) ve türbülans yoğunluğu parametreleri ile karakterize edilmektedir.

Türbin izinin mekânsal yayılımı ve toparlanma süreci, yalnızca türbinin aerodinamik özelliklerine bağlı olmayıp, aynı zamanda atmosferik sınır tabaka koşulları tarafından da güçlü biçimde belirlenmektedir. Özellikle atmosferik kararlılık durumu, türbin izinin aşağı akış yönündeki davranışı üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Kararsız atmosfer koşullarında artan doğal türbülans seviyesi, türbin izinin daha hızlı karışmasına ve kısa mesafelerde toparlanmasına neden olurken; kararlı atmosfer koşullarında türbülansın baskılanması, iz etkisinin daha uzun mesafeler boyunca korunmasına yol açmaktadır. Bu durum, rüzgar

enerji santrali ölçeğinde türbinler arası etkileşimlerin zamana ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmesine neden olmakta ve performans tahminlerinin neden yüksek belirsizlik içerdiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bu fiziksel mekanizma, türbin iz bölgesinde oluşan hız azalımının momentum teorisi çerçevesinde tanımlanmasını mümkün kılmaktadır. Eksenel momentum teorisine göre, türbin rotorundan geçen akışta meydana gelen hız düşümü, eksenel indüksiyon faktörü yardımıyla ifade edilebilmektedir. Türbin iz bölgesindeki ortalama rüzgar hızı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$U_w = U_\infty (1 - 2a) \quad (1)$$

Burada U_w türbin iz bölgesindeki ortalama rüzgar hızını, U_∞ serbest akış rüzgar hızını ve a eksenel indüksiyon faktörünü temsil etmektedir. Bu ifade, türbinin akıştan ne ölçüde enerji çektiğini ve bunun sonucunda akış hızında meydana gelen azalımı doğrudan ilişkilendirmektedir.

Türbin iz etkisi çoğu çalışmada hız açığı kavramı üzerinden nicel olarak değerlendirilmektedir. Hız açığı, iz bölgesindeki rüzgar hızının serbest akış hızına göre ne kadar azaldığını ifade etmekte olup aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{\Delta U}{U_\infty} = 1 - \frac{U_w}{U_\infty} \quad (2)$$

veya eşdeğer biçimde,

$$\Delta U = U_\infty - U_w \quad (3)$$

Bu hız açığı, aşağı akışta yer alan türbinlerin maruz kaldığı efektif rüzgar hızını doğrudan belirlemekte ve rüzgar enerji santrali genelinde enerji üretim kayıplarının temel kaynağını oluşturmaktadır.

Rüzgar hızındaki bu azalma, türbin güç üretimi üzerinde doğrusal olmayan ve kuvvetli bir etkiye sahiptir. Bir rüzgar türbininin ürettiği güç, etkin rüzgar hızının küpü ile orantılı olup aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p U^3 \quad (4)$$

Burada P türbin güç üretimini, ρ hava yoğunluğunu, A rotor süpürme alanını, C_p güç katsayısını ve U türbin rotor düzlemindeki etkin rüzgar hızını temsil etmektedir. Denklemden görüldüğü üzere, rüzgar hızındaki görece küçük düşüşler dahi güç üretiminde belirgin kayıplara yol açmaktadır. Bu durum, türbin iz etkisinin rüzgar enerji santrali ölçeğinde neden kritik bir performans belirleyicisi olduğunu açık biçimde ortaya koymakta ve türbin iz etkisinin doğru biçimde modellenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

2.2. Türbin iz etkisinin enerji üretimine etkisi

Türbin iz etkisinin rüzgar enerji santrali ölçeğinde enerji üretimi üzerindeki olumsuz etkileri, literatürde kapsamlı biçimde belgelenmiştir. Yukarı akıştaki türbinler tarafından oluşturulan türbin iz bölgeleri, aşağı akışta yer alan türbinlerin daha düşük rüzgar hızlarına ve daha yüksek türbülans seviyelerine maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, aşağı akıştaki türbinlerin güç üretiminde belirgin düşüşlere yol açmakta ve rüzgar enerji santralinin toplam enerji üretimini doğrudan etkilemektedir. Özellikle sık yerleşimli rüzgar santrallerinde bu kayıplar, santral ölçeğinde ciddi ekonomik sonuçlar doğurabilmektedir.

Türbin iz etkisine bağlı enerji kayıpları, sabit ve öngörülebilir bir büyüklük olarak değerlendirilmemektedir. Rüzgar yönündeki zamansal değişimler, türbin iz etkisinin hangi türbinleri ve hangi ölçüde etkileyeceğini sürekli olarak değiştirmekte; bu durum rüzgar enerji

santrali performansını zamana bağlı ve değişken bir problem haline getirmektedir. Dolayısıyla türbin iz etkisi, yalnızca ortalama enerji üretim kaybı üzerinden değil, aynı zamanda üretim dalgalanmaları ve belirsizlikler üzerinden de ele alınması gereken bir olgu olarak ortaya çıkmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde güç üretiminin rüzgar hızının küpü ile orantılı olması, türbin iz etkisinin enerji üretimi üzerindeki etkisini daha da kritik hale getirmektedir. Türbin iz bölgesinde meydana gelen görece küçük hız azalmaları dahi, güç üretiminde doğrusal olmayan ve yüksek oranlı kayıplara neden olmaktadır. Türbin iz etkisi altındaki bir türbinin güç üretiminin, serbest akış koşullarındaki güç üretimine oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

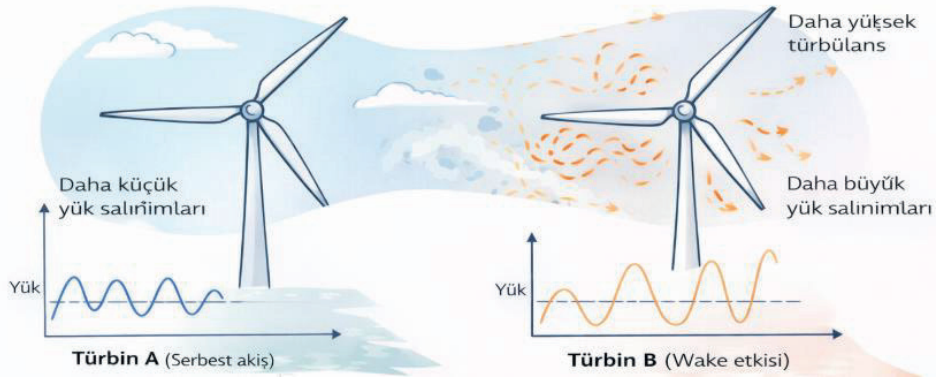
$$\frac{P_{wake}}{P_{free}} = \left(\frac{U_w}{U_\infty} \right)^3 \quad (5)$$

Burada P_{wake} türbin iz etkisi altındaki güç üretimini, P_{free} serbest akış koşullarındaki güç üretimini, U_w türbin iz bölgesindeki rüzgar hızını ve U_∞ serbest akış rüzgar hızını temsil etmektedir. Denklemden görüldüğü üzere, rüzgar hızındaki sınırlı düşüşler dahi güç üretiminde kübik etki nedeniyle belirgin kayıplara yol açmaktadır. Bu durum, türbin iz etkisinin rüzgar enerji santrali ölçeğinde neden kritik bir performans belirleyicisi olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bu enerji kayıplarının zamana bağlı ve bağlamsal doğası, rüzgar enerji santrallerinde yalnızca statik performans analizlerinin yeterli olmadığını göstermektedir. Değişen rüzgar koşulları ve türbinler arası etkileşimlerin birlikte ele alınabilmesi, türbin iz etkisinin enerji üretimi üzerindeki etkilerinin daha doğru biçimde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu gereksinim, bir sonraki aşamada ele alınacak olan rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz ve gelişmiş kontrol yaklaşımlarının temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

2.3. Türbin iz etkisinin yapısal yüklere ve yorulmaya etkisi

Türbin iz etkisinin en kritik sonuçlarından biri, türbinler üzerindeki yapısal yüklerin artmasıdır. Artan türbülans seviyesi, rotor kanatları, göbek ve kule üzerinde düzensiz ve yüksek frekanslı yük dalgalanmalarına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle aşağı akıştaki türbinlerde yorulma hasarının hızlanmasına yol açmaktadır.



Şekil 4. Türbin iz etkisi altında çalışan bir rüzgar türbininde artan türbülans seviyesinin, rotor kanatları ve kule üzerinde oluşan yapısal yük salınımlarını artırması ve buna bağlı olarak yorulma hasarının hızlanmasını gösteren kavramsal karşılaştırma. Serbest akış koşullarında çalışan Türbin A'da yük salınımları daha düşük ve yorulma birikimi daha yavaş gerçekleşirken, türbin iz etkisine maruz kalan Türbin B'de artan türbülans nedeniyle yük salınımları büyümekte ve yorulma birikimi daha hızlı gerçekleşmektedir.

Rüzgar enerji santrali içinde bazı türbinlerin sürekli olarak türbin iz etkisine maruz kalması, türbinler arasında asimetrik bir ömür dağılımı oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, bakım planlamasının yalnızca türbin bazında değil, santral ölçeğinde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Türbin iz etkisinin yapısal sağlık üzerindeki bu dolaylı fakat güçlü etkisi, rüzgar enerji santrali yönetiminde dijital ikiz gibi bütüncül yaklaşımların neden gerekli olduğunu açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak türbin iz etkisi, rüzgar enerji santrali dinamiklerinin merkezinde yer almakta; enerji üretimi, yapısal yükler ve bakım gereksinimleri arasında güçlü bir bağ kurmaktadır. Bu karmaşık etkileşimlerin doğru biçimde modellenmesi ve yönetilmesi, bir sonraki aşamada ele alınacak olan rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz yaklaşımlarının temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

3. Klasik Rüzgar Enerji Santrali Modellemesi Yaklaşımları ve Sınırları

Rüzgar enerji santrali ölçeğinde performans değerlendirmesi ve planlama çalışmaları, uzun yıllar boyunca klasik modelleme yaklaşımları üzerinden yürütülmektedir. Bu yaklaşımlar, türbinler arası etkileşimleri ve türbin iz etkilerini belirli varsayımlar altında temsil etmeyi amaçlamakta; ancak doğruluk, hesaplama maliyeti ve saha uygulanabilirliği açısından önemli sınırlılıklar barındırmaktadır. Dijital ikiz yaklaşımının rüzgar enerji santrali ölçeğinde öne çıkmasının temel nedenlerinden biri, bu klasik yöntemlerin karmaşık saha koşullarını tek başına yeterince temsil edememesidir.

Klasik rüzgar enerji santrali modelleme yöntemleri genel olarak iki ana grupta ele alınmaktadır: analitik veya yarı-ampirik türbin iz modelleri ve yüksek çözünürlüklü sayısal akış çözümlerine dayanan yöntemler. Bu yaklaşımlar, farklı kullanım senaryolarında avantajlar sunmakla birlikte, rüzgar enerji santrali ölçeğinde gerçek zamanlı karar destek için çeşitli kısıtlar içermektedir.

3.1. Analitik ve yarı-ampirik türbin iz modelleri

Analitik türbin iz modelleri, rüzgar enerji santrali analizlerinde en yaygın kullanılan klasik yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu modeller, türbin iz etkisini genellikle hız açığı üzerinden tanımlamakta ve türbin arkasındaki akışın mekansal gelişimini basitleştirilmiş

ifadelerle temsil etmektedir. Düşük hesaplama maliyeti ve kolay uygulanabilirlik, bu modellerin en önemli avantajları arasında yer almaktadır.

Literatürde geliştirilen modern analitik türbin iz modelleri, türbinler arası etkileşimleri daha gerçekçi biçimde temsil etmeye çalışmakta; ancak yine de atmosferik kararlılık, kompleks arazi yapısı ve türbülans etkileşimleri gibi faktörleri sınırlı ölçüde dikkate almaktadır. Bu durum, özellikle sıkışık yerleşime sahip rüzgar santrallerinde enerji üretimi ve yük tahminlerinde belirsizliklerin artmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar, analitik modellerin bazı saha koşullarında sistematik sapmalar üretebildiğini göstermektedir (Bastankhah & Porté-Agel, 2014).

Analitik ve yarı-ampirik türbin iz modelleri, hesaplama maliyeti ve uygulanabilirlik açısından rüzgar enerji santrali analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Tablo 2’de, literatürde en sık kullanılan analitik ve yarı-ampirik türbin iz modelleri; doğruluk, hesaplama maliyeti ve saha uygulanabilirliği gibi temel kriterler açısından karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 1. Analitik Ve Yarı-Ampirik Türbin İz Modellerinin Rüzgar Enerji Santrali Ölçeğinde Karşılaştırılması.

Model	Doğruluk	Hesaplama maliyeti	Gerçek zamanlı uygunluk	Kalibrasyon ihtiyacı	Başlıca sınırlamalar
Jensen / Park	Düşük – Orta	Çok düşük	Yüksek	Orta	Basit iz yayılım varsayımları, kompleks arazi ve atmosfer koşullarında sapma
Gaussian (Bastankhah)	Orta	Düşük	Orta – Yüksek	Orta	Atmosferik kararlılık ve türbülans değişimlerine karşı hassasiyet

Model	Doğruluk	Hesaplama maliyeti	Gerçek zamanlı uygunluk	Kalibrasyon ihtiyacı	Başlıca sınırlamalar
Wake süperpozisyon yöntemleri	Orta	Düşük	Orta	Orta	Çoklu türbin etkileşimlerinde belirsizlik birikimi

3.2. Yüksek çözünürlüklü sayısal modeller

Yüksek çözünürlüklü sayısal modeller, rüzgar enerji santrali ölçeğinde akış alanını ayrıntılı biçimde temsil etmeyi hedeflemektedir. Bu modellerde türbülans yapıları, türbin iz birleşmeleri ve akış-türbin etkileşimleri fiziksel temelleriyle ele alınmakta; özellikle karmaşık akış davranışlarının çözümünde klasik analitik modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlanmaktadır. Bu kapsamda RANS ve LES tabanlı yaklaşımlar, rüzgar enerji santrali içindeki türbin iz etkileşimlerini daha gerçekçi biçimde temsil edebilmekte; bu yöntemler arasında LES tabanlı yaklaşımlar, zamansal ve mekânsal türbülans yapılarının ayrıntılı çözümünde öne çıkmaktadır.

Yüksek çözünürlüklü sayısal modeller, rüzgar enerji santrali ölçeğinde türbin yerleşimi, iz yönlendirme ve yapısal yük azaltma stratejilerinin değerlendirilmesi açısından teorik olarak güçlü bir zemin sunmaktadır. Ancak bu modellerin yüksek hesaplama maliyeti, optimizasyon algoritmalarıyla birlikte iteratif biçimde kullanılmalarını pratik olmaktan çıkarmaktadır. Bu nedenle özellikle LES tabanlı yaklaşımlar, çoğu uygulamada optimizasyon sürecinin doğrudan bir parçası olmaktan ziyade, sınırlı sayıda senaryonun doğrulanması, tasarım değerlendirmesi veya çevrim dışı analizler amacıyla kullanılmaktadır.

Yüksek hesaplama maliyeti ve uzun çözüm süreleri, bu tür modellerin saha ölçeğinde sürekli ve gerçek zamanlı kullanımını

sınırlandırmaktadır. Gerçek zamanlı izleme, kontrol ve optimizasyon gereksinimlerinin söz konusu olduğu uygulamalarda, yüksek çözünürlüklü sayısal modellerin doğrudan uygulanabilirliği sınırlı kalmakta; bu durum rüzgar enerji santrali ölçeğinde karar destek sistemleri için daha esnek, hızlı ve güncellenebilir modelleme yaklaşımlarına olan ihtiyacı artırmaktadır (Vermeer, Sørensen, & Crespo, 2003).

3.3. Klasik yaklaşımların rüzgar enerji santrali ölçeğinde sınırlılıkları

Klasik rüzgar enerji santrali modelleme yaklaşımları, türbin iz etkisinin temel fiziksel özelliklerini belirli varsayımlar altında yakalayabilmekte; ancak rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz perspektifinden değerlendirildiğinde önemli sınırlılıklar barındırmaktadır. Bu yaklaşımlar çoğunlukla statik veya yarı-statik kabuller üzerine kurulmakta olup, sahadan elde edilen anlık verilerle sürekli güncellenebilen dinamik bir yapı sunmamaktadır. Bu durum, değişken atmosferik koşullar ve türbinler arası etkileşimlerin zamana bağlı etkilerinin yeterince temsil edilememesine yol açmaktadır.

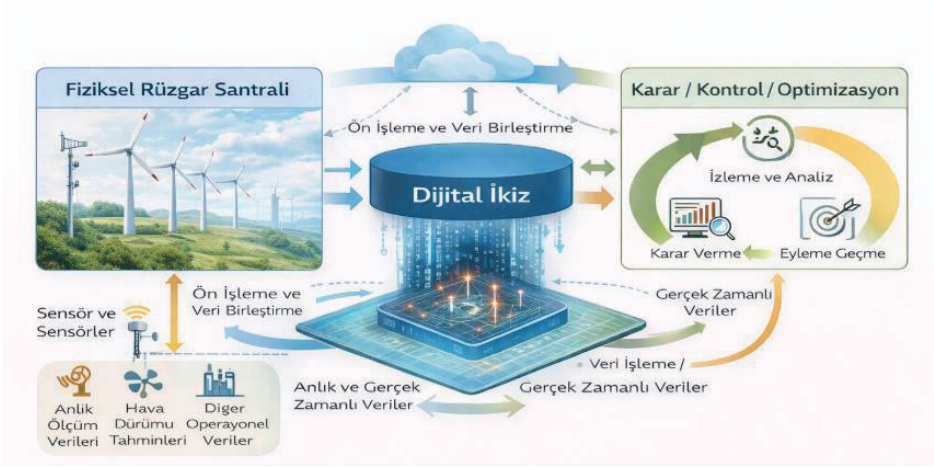
Klasik modelleme yaklaşımlarının bir diğer önemli sınırlılığı, kontrol ve optimizasyon süreçleriyle olan etkileşimlerinin kısıtlı olmasıdır. Bu modeller, sahadan gelen verilerle gerçek zamanlı olarak beslenememekte ve aktif kontrol parametreleriyle bütünleşik bir karar destek mekanizması sunamamaktadır. Sonuç olarak enerji üretimi, yapısal yükler ve bakım hedeflerinin santral ölçeğinde eş zamanlı olarak optimize edilmesi zorlaşmakta; özellikle türbin iz yönlendirme gibi aktif kontrol ve optimizasyon stratejilerinde, klasik yaklaşımların gerçek zamanlı karar destek açısından yetersiz kaldığı görülmektedir (Annoni et al., 2018).

Sonuç olarak klasik rüzgar enerji santrali modelleme yaklaşımları, rüzgar santrali analizleri için önemli bir temel oluşturmakla birlikte, tek başına kullanıldıklarında rüzgar enerji santrali ölçeğinde gerçek zamanlı izleme, kontrol ve optimizasyon hedeflerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlılıklar, bir sonraki aşamada ele alınacak olan rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz yaklaşımlarının neden gerekli olduğunu açık biçimde ortaya koymakta ve klasik yöntemlerden bütüncül, veriyle beslenen ve dinamik modelleme yaklaşımlarına geçiş ihtiyacını vurgulamaktadır.

4. Rüzgar Enerji Santrali Ölçeğinde Dijital İkiz Kavramı

Rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz kavramı, tekil türbin temelli yaklaşımların ötesine geçerek, çoklu türbin etkileşimlerini ve saha genelindeki dinamikleri birlikte ele almayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşımda dijital ikiz, yalnızca fiziksel sistemin sanal bir kopyası olarak değil; sahadan gelen verilerle sürekli güncellenen, çok katmanlı ve evrimsel bir yapı olarak konumlandırılmaktadır. Dijital ikizin bu çok katmanlı yapısı, özellikle karmaşık endüstriyel sistemlerde izleme, kestirim ve optimizasyon fonksiyonlarının birlikte ele alınmasına olanak tanımaktadır (Kritzinger et al., 2018; Negri et al., 2017).

Klasik rüzgar enerji santrali analizleri çoğu zaman tasarım veya çevrim dışı değerlendirmelerle sınırlı kalmaktadır. Oysa işletme aşamasında rüzgar yönü, atmosferik koşullar, türbin durumu ve kontrol stratejileri sürekli değişmektedir. Dijital ikiz yaklaşımı, bu değişkenliği doğrudan modele yansıtarak rüzgar enerji santralinin anlık ve bağlamsal bir temsilini sunmaktadır. Bu yönüyle dijital ikiz, rüzgar enerji santrali ölçeğinde karar destek mekanizmalarının merkezinde yer almaktadır (Uhlemann et al., 2017).



Şekil 5. Rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikizin; fiziksel sistem, sensör ve SCADA verileri ile hava durumu tahminlerinden beslenen, gerçek zamanlı veri işleme, izleme, analiz, karar verme ve geri bildirim döngülerini kapsayan çok katmanlı ve dinamik bir karar destek yapısı olarak kavramsal gösterimi.

4.1. Tek Türbin Dijital İkizinden Rüzgar Enerji Santrali Dijital İkizine Geçiş

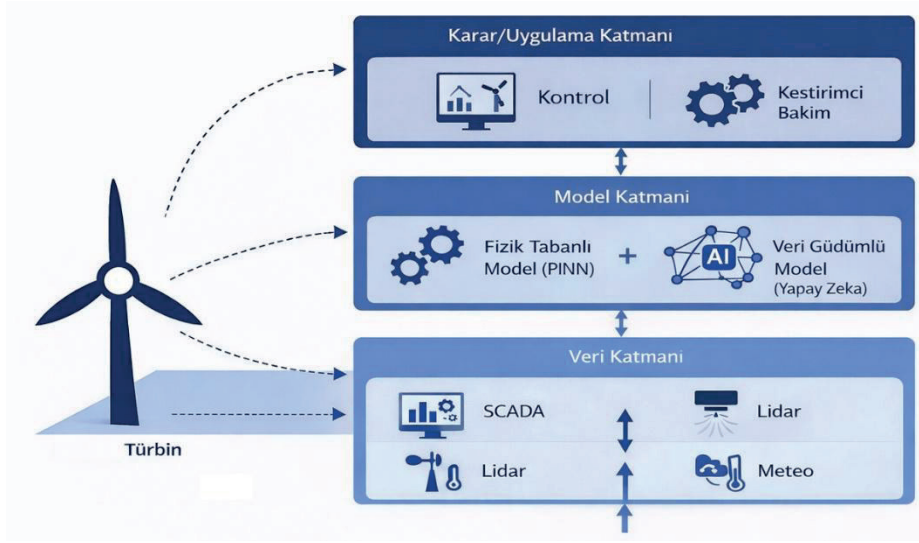
Dijital ikiz uygulamalarının ilk örnekleri çoğunlukla tekil makine veya bileşen odaklı olarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, belirli bir türbinin performansını veya sağlığını izlemek açısından fayda sağlamaktadır; ancak rüzgar enerji santrali gibi etkileşimli sistemlerde sınırlı kalmaktadır. Rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz yaklaşımı, türbinlerin birbirinden bağımsız ele alınamayacağını kabul etmekte ve sistem davranışını kolektif bir perspektifle değerlendirmektedir (Negri et al., 2017).

Rüzgar enerji santrali dijital ikizi, her bir türbinin dijital ikizini ortak bir çatı altında birleştirmekte; buna ek olarak türbinler arası türbin iz etkileşimlerini ve saha genelindeki akış yapısını da modele dahil etmektedir. Bu bütüncül yapı, rüzgar enerji santrali performansının yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda yapısal yükler ve

bakım gereksinimleri açısından da değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Kritzinger et al., 2018).

4.2. Dijital İkiz Mimarisi Ve Rüzgar Enerji Santrali Ölçeğinde Veri Entegrasyonu

Rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikizler genellikle katmanlı bir mimari üzerinden ele alınmaktadır.



Şekil 6. Rüzgar enerji santrali ölçeğinde, fizik tabanlı (PINN) ve veri güdümlü modellerin birlikte kullanıldığı dijital ikiz mimarisi.

Bu mimari; veri katmanı, model katmanı ve uygulama/servis katmanından oluşmaktadır. Veri katmanında SCADA verileri, meteorolojik ölçümler, lidar sistemleri ve türbin durum bilgileri yer almaktadır. Bu verilerin zaman senkronizasyonu ve tutarlı biçimde bir araya getirilmesi, rüzgar enerji santrali dijital ikizinin en kritik aşamalarından biri olarak değerlendirilmektedir (Uhlemann et al., 2017).

Model katmanında ise fizik tabanlı türbin iz modelleri, veri güdümlü yapay zeka yaklaşımları ve hibrit yöntemler birlikte kullanılmaktadır. Bu

yapı, rüzgar enerji santrali davranışının hem fiziksel prensiplere dayalı hem de veriyle güncellenebilir biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Dijital ikiz mimarisinin bu esnek yapısı, rüzgar enerji santrali ölçeğinde farklı senaryoların değerlendirilmesine ve kontrol stratejilerinin test edilmesine imkân tanımaktadır (Negri et al., 2017).

4.3. Rüzgar Enerji Santrali Ölçeğinde Dijital İkizin İşlevsel Roller

Rüzgar enerji santrali dijital ikizi, izleme, kestirim ve optimizasyon olmak üzere üç temel işlev etrafında şekillenmektedir. İzleme fonksiyonu, rüzgar enerji santralinin anlık durumunun değerlendirilmesini sağlamaktadır. Kestirim fonksiyonu, türbin iz etkileri ve değişen rüzgar koşulları altında türbinlerin gelecekteki performansını ve yük durumlarını tahmin etmektedir. Optimizasyon fonksiyonu ise enerji üretimi ile yapısal yükler arasında denge kurmayı hedeflemektedir (Kritzinger et al., 2018).

Bu işlevler, dijital ikizi yalnızca pasif bir analiz aracı olmaktan çıkararak, aktif bir karar destek sistemine dönüştürmektedir. Özellikle türbin iz yönlendirme ve rüzgar enerji santrali kontrolü gibi uygulamalarda dijital ikiz, sanal ortamda farklı senaryoların test edilmesine olanak tanımaktadır (Uhlemann et al., 2017).

4.4. Dijital ikizin rüzgar enerji santrali yönetimine katkısı

Rüzgar enerji santrali yönetiminde dijital ikiz yaklaşımı, enerji üretimi ve bakım süreçlerinin daha koordineli biçimde ele alınmasını sağlamaktadır. Türbin iz etkilerinin bazı türbinler üzerinde yoğunlaşması, rüzgar enerji santrali içinde heterojen yük dağılımlarına yol açmaktadır. Dijital ikiz, bu yük dengesizliklerini görünür hale getirerek bakım önceliklerinin ve kontrol ayarlarının rüzgar enerji santrali ölçeğinde optimize edilmesine katkı sunmaktadır (Negri et al., 2017).

Sonuç olarak rüzgar enerji santrali ölçeğinde dijital ikiz kavramı, klasik modelleme yaklaşımlarının sınırlarını aşarak veri, fizik ve yapay zekanın birlikte çalıştığı dinamik bir yapı ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, rüzgar enerji santrali düzeyinde izleme, kontrol ve optimizasyon hedeflerini aynı çatı altında toplayan güçlü bir çerçeve sunmaktadır (Kritzinger et al., 2018).

5. Dijital İkiz Tabanlı Rüzgar Türbini İşletme ve Kontrol Stratejileri

Rüzgar türbinlerinde dijital ikiz yaklaşımı, yalnızca izleme ve bakım süreçleriyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda işletme ve kontrol stratejilerinin yeniden tanımlanmasına imkân vermektedir. Klasik kontrol yaklaşımları çoğunlukla anlık ölçümlere dayalı geri besleme mekanizmaları üzerinden çalışmaktadır. Ancak rüzgar gibi yüksek belirsizlik ve zamansal değişkenlik içeren bir enerji kaynağı söz konusu olduğunda, bu yöntemler sistem performansını uzun vadede optimize etmekte sınırlı kalabilmektedir.

Dijital ikiz, fiziksel türbinin sanal bir temsili olarak; geçmiş veriler, anlık ölçümler ve kestirimci modelleri bir araya getirerek kontrol kararlarının daha bilinçli ve öngörüye dayalı biçimde alınmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle dijital ikiz, kontrol sistemlerine yalnızca “ne oluyor?” değil, aynı zamanda “ne olabilir?” sorusunun cevabını da sunmaktadır (Tao & Qi, 2019).

5.1. Dijital İkiz Destekli Operasyonel Kontrol Yaklaşımı

Dijital ikiz tabanlı kontrol sistemlerinde, fiziksel türbinin davranışı sanal ortamda sürekli olarak izlenmekte ve güncellenmektedir. Bu yapı sayesinde farklı rüzgar senaryoları, yük durumları ve kontrol parametreleri fiziksel sisteme müdahale edilmeden önce dijital ikiz üzerinde test edilebilmektedir. Böylece kontrol stratejileri, sahada

deneme–yanılma yerine simülasyon destekli kararlarla şekillendirilmektedir.

Literatürde dijital ikizin siber-fiziksel sistemlerin kontrol katmanında “bağlam sağlayıcı” bir rol üstlendiği belirtilmektedir. Dijital ikiz, kontrol algoritmalarının yalnızca anlık ölçümlere değil, sistemin geçmişi ve olası geleceğine de dayalı çalışmasına olanak tanımaktadır (Boschert & Rosen, 2016).

5.2. Yük Azaltma ve Performans Odaklı Kontrol

Rüzgar türbinlerinde kontrol sistemlerinin temel hedeflerinden biri, enerji üretimini maksimize ederken yapısal yükleri ve yorulmayı minimize etmektir. Dijital ikiz yaklaşımı, türbin bileşenleri üzerinde oluşan aerodinamik ve mekanik yükleri sanal ortamda izleyerek bu yüklerin zamana bağlı dağılımını analiz etmektedir. Bu sayede pitch, yaw ve tork kontrol parametreleri yalnızca güç çıkışına göre değil, yapısal sağlık kriterlerine göre de ayarlanabilmektedir.

Bu tür bir kontrol anlayışı, performans ve dayanıklılık arasında daha dengeli bir işletme stratejisi geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Dijital ikiz tabanlı yaklaşımların, klasik kontrol yöntemlerine kıyasla yük dalgalanmalarını daha etkin biçimde sınırlayabildiği ve sistem kararlılığını artırdığı ifade edilmektedir (Fuller et al., 2020).

5.3. Öngörücü ve Adaptif Kontrol Mekanizmaları

Dijital ikizlerin kontrol sistemlerine sağladığı en önemli katkılardan biri, öngörücü kontrol mekanizmalarının geliştirilmesidir. Dijital ikiz, fiziksel türbinin gelecekteki davranışını kestirerek kontrol sistemine önceden bilgi sağlamaktadır. Bu durum, kontrol yapısının reaktif olmaktan çıkarak proaktif bir niteliğe kavuşmasına olanak tanımaktadır.

Örneğin rüzgar hızındaki ani artışlar veya türbülanslı akış koşulları dijital ikiz üzerinden öngörüldüğünde, kontrol sistemi bu değişimlere önceden hazırlanabilmektedir. Böylece aşırı yüklenmeler azaltılmakta ve enerji üretimindeki ani dalgalanmalar sınırlandırılmaktadır. Bu yaklaşım, dijital ikizin Endüstri 4.0 kapsamında “akıllı kontrol” kavramının temel bileşenlerinden biri olarak görülmesine neden olmaktadır (Qi & Tao, 2018).

5.4. İşletme Stratejileri Açısından Dijital İkizin Rolü

Dijital ikiz, kontrol sistemlerinin ötesinde, türbin işletme stratejilerinin belirlenmesinde de etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Farklı işletme senaryoları (yük azaltma odaklı işletme, maksimum üretim odaklı işletme, ömür uzatma odaklı işletme) dijital ikiz üzerinde karşılaştırılabilmekte ve bu senaryoların uzun vadeli etkileri analiz edilebilmektedir.

Bu yaklaşım sayesinde işletme kararları, yalnızca kısa vadeli üretim hedeflerine değil; sistem güvenilirliği, bakım ihtiyacı ve yaşam döngüsü maliyetlerine dayalı olarak alınabilmektedir. Dijital ikizin bu çok boyutlu değerlendirme kapasitesi, onu klasik kontrol sistemlerinden ayıran temel özelliklerden biri olarak öne çıkmaktadır (Zhang, Liu, & Xu, 2019).

Dijital ikiz tabanlı işletme ve kontrol yaklaşımları, rüzgar türbinlerinde kontrol kavramını statik kurallardan dinamik ve öngörücü yapılara taşımaktadır. Bu dönüşüm, yalnızca enerji üretim performansını değil; yapısal güvenilirliği ve sistem ömrünü de doğrudan etkilemektedir.

Bununla birlikte dijital ikiz destekli kontrol sistemlerinin sahada başarıyla uygulanabilmesi, model doğruluğu, veri akışının sürekliliği ve kontrol altyapısıyla entegrasyonun etkinliğine bağlıdır. Bu nedenle dijital ikiz tabanlı kontrol stratejileri, rüzgar enerjisi alanında

önümüzdeki yıllarda hem akademik hem de endüstriyel açıdan önemini artırarak devam edecek bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

6. Dijital İkiz Yaklaşımlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi ve Tartışma

Dijital ikiz kavramı, rüzgar enerjisi ve genel olarak siber-fiziksel sistemler bağlamında farklı yaklaşımlar çerçevesinde ele alınmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, dijital ikizin tek bir tanıma veya mimariye indirgenmediği; aksine kullanım amacı, veri altyapısı ve hedeflenen çıktı türüne göre farklılaşan bir yapı sunduğu görülmektedir. Bu durum, dijital ikizi hem güçlü hem de karmaşık bir araştırma alanı haline getirmektedir (Qi & Tao, 2018).

6.1. Kavramsal ve Mimari Yaklaşımların Karşılaştırılması

Dijital ikiz literatüründeki ilk çalışmalar, kavramı ağırlıklı olarak fiziksel sistemin simülasyon tabanlı bir temsili olarak ele almaktadır. Bu yaklaşımda dijital ikiz, fiziksel sistemin davranışını önceden tanımlanmış matematiksel modeller üzerinden yansıtan bir yapı olarak konumlandırılmaktadır (Boschert & Rosen, 2016). Bu tür mimariler, özellikle sistem tasarımı ve senaryo analizi açısından güçlüdür; ancak gerçek zamanlı veri entegrasyonu ve adaptasyon kabiliyeti sınırlı kalabilmektedir.

Buna karşılık daha güncel çalışmalar, dijital ikizi siber-fiziksel üretim sistemlerinin merkezinde yer alan dinamik bir bileşen olarak ele almaktadır. Bu yaklaşımlarda dijital ikiz, sensör verileri, büyük veri altyapıları ve yapay zeka modelleriyle sürekli güncellenen canlı bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Zhang, Zhang, & Yan, 2019). Bu yapı, özellikle rüzgar türbinleri gibi değişken çevre koşullarında çalışan sistemler için daha gerçekçi bir temsil sunmaktadır.

6.2. Veri GÜdümlü ve Fizik Temelli Yaklaşımların Tartışılması

Literatürde dijital ikiz uygulamaları genel olarak veri güdümlü, fizik temelli veya hibrit yaklaşımlar altında toplanmaktadır. Veri güdümlü yaklaşımlar, büyük hacimli sensör verileri üzerinden öğrenme yapan yapay zeka modellerine dayanmaktadır. Bu modeller, karmaşık sistem davranışlarını açık fiziksel model tanımı olmadan yakalayabilme avantajına sahiptir (Fuller et al., 2020). Fakat bu yaklaşım, yüksek kaliteli ve temsil gücü yüksek veri gereksinimi nedeniyle sahaya bağımlı kalabilmektedir.

Fizik temelli yaklaşımlar ise sistemin temel yasalarını ve mekanizmalarını açık biçimde yansıtmaktadır. Bununla birlikte rüzgar enerjisi sistemlerinde çevresel belirsizlikler ve yük spektrumundaki değişkenlik, bu modellerin tek başına yeterli olmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle literatürde giderek artan biçimde hibrit dijital ikiz yaklaşımlarının tercih edildiği görülmektedir (Qi & Tao, 2018).

6.3. Yapay Zeka Entegrasyonu ve Karar Destek Boyutu

Dijital ikizin rüzgar enerjisi uygulamalarında değer üretmesi, büyük ölçüde yapay zekanın bu yapıya nasıl entegre edildiğiyle ilişkilidir. Yapay zeka, dijital ikiz içinde yalnızca tahmin yapan bir araç değil; aynı zamanda belirsizlikleri yöneten ve karar süreçlerini destekleyen bir bileşen olarak konumlanmaktadır. Tao ve Qi (2019), dijital ikizin yaygınlaşmasının ön koşullarından birinin, bu tür akıllı karar mekanizmalarının geliştirilmesi olduğunu vurgulamaktadır.

Bu bağlamda dijital ikiz, bakım ve işletme kararlarını destekleyen bir karar destek sistemi haline gelmektedir. Rüzgar türbinlerinde bakım zamanlaması, yük yönetimi ve operasyonel optimizasyon gibi süreçler, dijital ikiz üzerinden bütüncül biçimde değerlendirilebilmektedir (Zhang et al., 2019).

6.4. Güçlü Yönler Ve Sınırlılıklar

Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, dijital ikiz yaklaşımının rüzgar enerjisi sistemleri için önemli avantajlar sunduğu açıktır. Gerçek zamanlı izleme, kestirimci bakım ve senaryo tabanlı analiz yetenekleri, bu yaklaşımın öne çıkan güçlü yönleridir (Fuller et al., 2020). Bununla birlikte veri kalitesi, hesaplama maliyeti ve sistem entegrasyonu gibi konular, dijital ikizin endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasının önündeki temel sınırlılıklar olarak öne çıkmaktadır.

Ayrıca standartlaşma eksikliği ve farklı sistemler arasında birlikte çalışabilirlik sorunları, dijital ikiz çözümlerinin genellenebilirliğini zorlaştırmaktadır (Boschert & Rosen, 2016). Bu durum, her rüzgar enerji santrali veya türbin modeli için yeniden uyarlama gereksinimini beraberinde getirmektedir.

Bu bölümde yapılan karşılaştırmalı değerlendirme, dijital ikiz yaklaşımının rüzgar enerjisi alanında tek bir yöntemden ziyade çok boyutlu bir paradigma sunduğunu göstermektedir. Fizik temelli modeller, veri güdümlü yapay zeka yöntemleri ve hibrit yaklaşımlar; kullanım amacı ve saha koşullarına bağlı olarak farklı avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle dijital ikiz tasarımında “en gelişmiş model” yerine “en uygun mimari” yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir (Qi & Tao, 2018; Tao & Qi, 2019).

7. Gelecek Perspektifleri ve Açık Araştırma Problemleri

Rüzgar enerjisi sistemlerinde yapay zeka destekli dijital ikiz yaklaşımları, son yıllarda hem akademik literatürde hem de endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ancak mevcut çalışmalar bütüncül olarak değerlendirildiğinde, bu alanın henüz tam anlamıyla olgunluk seviyesine ulaşmadığı görülmektedir. Dijital ikizlerin rüzgar türbinlerinde izleme, kestirimci bakım ve karar destek

süreçlerine sunduğu potansiyel açık olmakla birlikte, çözüm bekleyen çok sayıda metodolojik, mimari ve uygulamaya yönelik araştırma problemi bulunmaktadır (Lu et al., 2020).

Bu bölümde, rüzgar türbinleri için dijital ikiz tabanlı yaklaşımların geleceğine yönelik öngörüler ele alınmakta ve literatürde henüz sınırlı biçimde ele alınmış açık araştırma alanları tartışılmaktadır.

7.1. Gerçek Zamanlı Ve Adaptif Dijital İkizler

Mevcut dijital ikiz uygulamalarının önemli bir bölümü çevrim dışı (offline) analizlere veya sınırlı güncelleme sıklığına sahip sistemlere dayanmaktadır. Oysa rüzgar türbinleri; rüzgar hızındaki ani değişimler, türbülans ve yük spektrumundaki dalgalanmalar gibi oldukça dinamik koşullar altında çalışmaktadır. Bu nedenle gelecekte geliştirilecek dijital ikizlerin, gerçek zamanlı veriyle sürekli güncellenen ve adaptif yapılar olarak tasarlanması gerekmektedir (Lu et al., 2020).

Adaptif dijital ikizler, yalnızca fiziksel sistemin anlık durumunu yansıtmakla kalmamakta; aynı zamanda model parametrelerini operasyonel koşullara göre güncelleyerek kendini yeniden kalibre edebilmektedir. Bu özellik, özellikle bileşen yaşlanması ve saha-özel davranışların doğru biçimde temsil edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

7.2. Fizik-Bilgili Öğrenme Ve Model Genellenebilirliği

Dijital ikizlerin geleceğinde öne çıkan araştırma alanlarından biri, fizik-bilgili yapay zeka yaklaşımlarının daha yaygın biçimde kullanılmasıdır. Fizik-bilgili sinir ağları(Physics-informed neural networks - PINN) gibi yöntemler, öğrenme sürecine fiziksel yasaları kısıt olarak dahil ederek hem veri ihtiyacını azaltmakta hem de modellerin genellenebilirliğini artırmaktadır (Raissi, Perdikaris, & Karniadakis, 2019).

Rüzgar türbinleri gibi fiziksel prensiplerle güçlü biçimde sınırlandırılmış sistemlerde, yalnızca veri güdümlü modellerin kullanılması çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle fizik-bilgili yaklaşımlar, dijital ikizlerin daha güvenilir ve fiziksel olarak tutarlı sonuçlar üretmesini sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmaların, bu tür yaklaşımların farklı bileşenler ve zaman ölçekleri için nasıl ölçeklenebileceğine odaklanması beklenmektedir.

7.3. Edge AI ve dağıtık hesaplama mimarileri

Dijital ikiz sistemlerinin ölçeklenebilirliği ve saha uygulanabilirliği açısından hesaplama mimarileri önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Merkezi bulut tabanlı çözümler yüksek hesaplama gücü sunmakla birlikte, gecikme süreleri ve veri iletim maliyetleri açısından sınırlılıklar içermektedir. Bu nedenle edge AI tabanlı dijital ikiz yaklaşımları, gelecekte rüzgar türbinleri için daha fazla önem kazanacaktır (Shi et al., 2016).

Edge tabanlı dijital ikizler, verinin üretildiği noktaya yakın işlenmesini sağlayarak erken anomali tespiti ve hızlı karar alma imkanı sunmaktadır. Bununla birlikte sınırlı donanım kaynakları, model karmaşıklığı ile performans arasındaki dengenin dikkatli biçimde kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu denge, gelecekte dijital ikiz mimarilerinin tasarımında belirleyici bir faktör olacaktır.

7.4. Dijital İkizlerin Yaygınlaştırılması Ve Sistem Mimarileri

Dijital ikizlerin endüstride yaygın biçimde benimsenebilmesi, yalnızca model doğruluğuna değil; sistem mimarisinin esnekliğine ve entegrasyon kabiliyetine de bağlıdır. Literatürde dijital ikizin yaygınlaşmasının önündeki en önemli engeller arasında veri bütünlüğü, model güncelleme maliyeti ve sistemler arası entegrasyon zorlukları gösterilmektedir (Fuller et al., 2020).

Bu bağlamda dijital ikizlerin geleceği, modüler ve yeniden kullanılabilir mimariler üzerinden şekillenmektedir. Dijital ikizin farklı kullanım senaryolarına uyarlanabilmesi, rüzgar enerjisi gibi heterojen sistemler için kritik bir avantaj sunmaktadır (Qi & Tao, 2018).

7.5. Açıklanabilir Yapay Zeka Ve Güven Meselesi

Dijital ikiz sistemlerinde kullanılan yapay zeka modelleri giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Bu durum, özellikle bakım ve güvenlik gibi kritik kararların alındığı uygulamalarda açıklanabilirlik ihtiyacını ön plana çıkarmaktadır. Açıklanabilir yapay zeka (Explainable AI – XAI) yaklaşımları, model çıktılarının neden ve nasıl üretildiğinin anlaşılmasını sağlamayı hedeflemektedir (Samek et al., 2021).

Rüzgar enerjisi uygulamalarında dijital ikizlerin sahada kabul görebilmesi için, üretilen çıktının yalnızca doğru değil; aynı zamanda anlaşılır ve gerekçelendirilebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle gelecekteki dijital ikiz çalışmalarının, yüksek doğruluk ile açıklanabilirlik arasında denge kuran mimarilere odaklanması beklenmektedir.

8. Sonuç

Bu bölümde rüzgar enerjisi sistemlerinde yapay zeka destekli dijital ikiz yaklaşımı; kavramsal temelleri, mimari bileşenleri ve uygulama alanlarıyla birlikte kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Rüzgar türbinlerinin karmaşık yapısı, değişken çevresel koşullar altında çalışması ve yüksek bakım maliyetleri, klasik izleme ve bakım yaklaşımlarının sınırlılıklarını açık biçimde ortaya koymaktadır. Dijital ikiz yaklaşımı, bu sınırlılıkların aşılmasına yönelik bütüncül ve esnek bir çözüm çerçevesi sunmaktadır.

Çalışma boyunca dijital ikizin yalnızca fiziksel sistemin sayısal bir kopyası olmadığı; veri, model ve karar mekanizmalarının sürekli etkileşim halinde olduğu dinamik bir yapı olduğu vurgulanmaktadır. Yapısal sağlık izleme, kestirimci bakım ve bakım optimizasyonu gibi temel uygulama alanlarında dijital ikizin sunduğu katkılar, bu yaklaşımın rüzgar enerjisi sektöründe neden giderek daha fazla ilgi gördüğünü açıklamaktadır. Özellikle yapay zeka yöntemlerinin dijital ikiz mimarilerine entegre edilmesi, sistem davranışının daha doğru yorumlanmasını ve geleceğe yönelik öngörülerin güçlenmesini sağlamaktadır.

Literatür incelemesi ve tartışmalar, rüzgar türbinleri için geliştirilen dijital ikiz çözümlerinin henüz tek tip ve olgun bir yapıdan ziyade, farklı ihtiyaçlara göre şekillenen yaklaşımlar sunduğunu göstermektedir. Fizik tabanlı modeller, veri güdümlü yapay zeka yöntemleri ve hibrit yaklaşımlar; kullanım amacı, ölçek ve saha koşullarına bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlılıklar barındırmaktadır. Bu durum, dijital ikiz tasarımında “tek doğru çözüm” yerine probleme özgü ve dengeli mimarilerin tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte dijital ikizlerin rüzgar enerjisi alanında yaygın biçimde benimsenmesinin önünde halen önemli zorluklar bulunmaktadır. Gerçek zamanlılık, hesaplama maliyeti, veri kalitesi, standartlaşma ve açıklanabilirlik gibi konular, hem akademik hem de endüstriyel çalışmalar açısından çözülmesi gereken temel başlıklar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle açıklanabilir yapay zeka yaklaşımlarının dijital ikizlerle bütünleştirilmesi, saha kullanıcılarının sisteme duyduğu güvenin artırılması açısından kritik önem taşımaktadır.

Sonuç olarak yapay zeka destekli dijital ikiz yaklaşımı, rüzgar enerjisi sistemlerinde yalnızca teknik bir yenilik değil; bakım, işletme ve karar alma süreçlerini dönüştüren stratejik bir araç olarak

değerlendirilmektedir. Gelecekte bu yaklaşımın daha yaygın biçimde uygulanabilmesi; gerçek zamanlı ve adaptif sistemlerin geliştirilmesine, ölçeklenebilir mimarilerin tasarlanmasına ve saha doğrulamalı çalışmaların artırılmasına bağlıdır. Bu doğrultuda geliştirilecek dijital ikiz çözümlerinin, rüzgar enerjisinin güvenilirliği, sürdürülebilirliği ve ekonomik verimliliği açısından önemli katkılar sunması beklenmektedir.

Kaynakça

- Annoni, J., Gebraad, P.M., Scholbrock, A.K., Fleming, P.A., & Wingerden, J.V. (2016). Analysis of axial-induction-based wind plant control using an engineering and a high-order wind plant model. *Wind Energy*, 19, 1135-1150.
- Bastankhah, M., & Porté-Agel, F. (2014). A new analytical model for wind-turbine türbin ızs. *Renewable Energy*, 70, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.002>
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital twin—The simulation aspect. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic futures* (pp. 59–74). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Churchfield, M. J., Lee, S., Moriarty, P. J., Martinez, L. A., Leonardi, S., Vijayakumar, G., & Brasseur, J. G. (2012). A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics. *Wind Energy*, 15(5), 693–710. <https://doi.org/10.2514/6.2012-537>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Knudsen, T., Bak, T., & Svenstrup, M. (2015). Survey of wind farm control—Power and fatigue optimization. *Wind Energy*, 18(8), 1333–1351. <https://doi.org/10.1002/we.1768>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- NedZero. (23.12.2025). How to deal with wake effects and wake theft. Erişim adresi: <https://nedzero.nl/en/news/how-to-deal-with-wake-effects-and-wake-theft>
- Porté-Agel, F., Bastankhah, M., & Shamsoddin, S. (2020). Wind-turbine and wind-rüzgar enerji santrali flows: A review. *Boundary-Layer Meteorology*, 174(1), 1–59. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- Samek, W., Montavon, G., Lapuschkin, S., Anders, C. J., & Müller, K.-R. (2021). Explaining deep neural networks and beyond: A review of

- methods and applications. *Proceedings of the IEEE*, 109(3), 247–278. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3060483>
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
- Stevens, R. J. A. M., & Meneveau, C. (2017). Flow structure and turbulence in wind farms. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 49, 311–339. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010816-060206>
- Tao, F., & Qi, Q. (2019). Make more digital twins. *Nature*, 573(7775), 490–491. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin driven smart manufacturing. *Proceedings of the IEEE*, 107(11), 2285–2303.
- Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61, 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>
- Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., & Crespo, A. (2003). Wind turbine türbin iz aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39(6–7), 467–510. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(03)00078-2)
- Zhang, H., Zhang, G., & Yan, Q. (2019). Digital twin-driven cyber-physical production system towards smart shop-floor. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10, 4439–4453. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-1125-4>