

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar ve Değerlendirmeler I

Editör: Serdal Arslan

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar ve Değerlendirmeler I

Editör:

Serdal Arslan



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şhitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgur yayinlari.com

✉ info@ozgur yayinlari.com

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar ve Değerlendirmeler I

Editör: Serdal Arslan

Language: Turkish-English

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8554-65-6

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1128>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Arslan, S. (ed) (2025). *Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar ve Değerlendirmeler I*. Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1128>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgur yayinlari.com/>



Ön Söz

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ve içerdiği alt disiplin alanları, güncel yaşamın hemen hemen her alanının da araştırma ihtiyacını ve etkisini hissettirmektedir. Bu kitap, içeriği bakımından mühendislik konusu disiplinlerin güncel uygulama ve araştırma alanlarına odaklanarak alana katkı sunmayı amaçlamaktadır. Kitap yedi (7) bölümden oluşmakta olup, her bir bölüm Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği'nin farklı alt anabilim dalları kapsamında ele alınan konularda yapılan özgün içermektedir.

Kitabın birinci bölümünde, IP66 gibi yüksek koruma sınıflarında kullanılan dolgu malzemelerinin önemi ele alınmakta; bu malzemelere ait bağıl dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün tahmin edilmesine yönelik yaklaşımlar incelenmektedir. İkinci bölümde, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Nesnelerin Yapay Zekâsı (AIoT) kavramları ele alınmış; IoT sistemlerinin hızla artan veri üretimi ve gerçek zamanlı karar verme gereksinimleri doğrultusunda yapay zekâ ile bütünleşerek AIoT'ye evrilme süreci kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde, temel seviye geliştiricilerden ileri seviye uygulama geliştiricilere kadar geniş bir kullanıcı kitlesine hitap eden Deneyap Kart ailesine ait farklı modellerin teknik özellikleri incelenmiş ve donanımsal farklılıkları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ise sensör tabanlı sistemlerin ürettiği zaman serisi verilerinin yönetiminde kullanılan temel yaklaşımlar ve kavramlar üzerinde durulmuştur.

Beşinci bölümde, hidroelektrik santrallerinde kullanılabilecek en uygun senkron generatör tipinin belirlenmesi amacıyla, üç farklı generatör topolojisi çok kriterli karar verme yaklaşımıyla değerlendirilmiş ve makine parametreleri üzerinden karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Altıncı bölümde ise dalga enerjisi uygulamaları için sürekli mıknatıslı doğrusal jeneratörler ayrıntılı biçimde incelenmiş; ayrıca bir akı anahtarlama, tüp tipi doğrusal jeneratör için mıknatıs seçimi değerlendirilmiştir. Yedinci ve son bölümde ise NASA CMAPSS referans veri setine odaklanılmış ve turbofan motor sensör verileri kullanılarak gerçekleştirilen arıza tahmini için kapsamlı bir çerçeve sunulmuştur.

İlk serisini sunduğumuz bu kitabın, içerdiği çalışmalarla Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği alanındaki ulusal ve uluslararası literatüre katkı sağlamasını temenni ederken, kitaba katkı sunan yazarlara ve Özgür Yayınlarına teşekkür ederim.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

IP66 Koruma Sınıflı Güç Elektronik Uygulamalarında Kullanılan Dolgu Malzemesinin Ters Karakterizasyonu: CE Testi Verilerinden Dielektrik Özelliklerin (ϵ_r , $\tan \delta$) Tahmin Edilmesi	1
<i>Murat Demir</i>	

Bölüm 2

IoT ve AIoT'ye Giriş: Kavramlar, Mimari Yaklaşımlar ve Uygulama Alanları	21
<i>Ahmet Özmen</i>	

Bölüm 3

Deneyap Geliştirme Kartı Ailesinin Donanım Özellikleri ve Uygulama Alanları	43
<i>Süleyman Burçin Şüyyun</i>	

Bölüm 4

Zaman Serisi Verilerinin Yönetimi ve Nesnelerin İnterneti Tabanlı Yenilikçi Uygulama Mimarileri	61
<i>Süleyman Burçin Şüyyun</i>	

Bölüm 5

Hidroelektrik Santrallerinde Senkron Generatör Seçimi için AHP-VIKOR Tabanlı Çok Kriterli Bir Karar Yaklaşımı	79
<i>Gülsüm Yıldız</i>	
<i>Emin Yıldız</i>	

Bölüm 6

Dalga Enerjisi Uygulamaları İçin Akı-Anahtarlamalı Tüp Tipi Doğrusal Jeneratörde Kalıcı Mıknatıs Seçiminin Etkisi	91
<i>Serdal Arslan</i>	

Bölüm 7

Machine Learning–Based Fault Prediction Using Industrial Sensor Data: A Data-Driven Approach	115
<i>Hasan Uzel</i>	

IP66 Koruma Sınıflı Güç Elektroniği Uygulamalarında Kullanılan Dolgu Malzemesinin Ters Karakterizasyonu: CE Testi Verilerinden Dielektrik Özelliklerin (ϵ_r , $\tan \delta$) Tahmin Edilmesi

Murat Demir¹

Özet

Güç elektroniği dönüştürücüler, elektromanyetik girişim (EMI) açısından hassas yapılara sahiptir ve özellikle IP66 gibi yüksek koruma sınıflarında kullanılan dolgu (potting) malzemeleri, sistemin elektromanyetik davranışını doğrudan etkileyen kritik bir bileşen haline gelir. Bu malzemeler, devre bileşenlerini çevresel etkilere karşı korurken aynı zamanda devre-yapı arasındaki dielektrik ortamı değiştirir ve parazitik kapasitansları artırarak rezonans kaynaklı iletkenlik emisyonu (CE) piklerinin yükselmesine neden olabilir. Bu çalışmada, bir güç elektroniği modülünde gözlemlenen 2.438 MHz frekansındaki CE limit aşımının, dolgu malzemesinin bağlı dielektrik sabiti (ϵ_r) ve kayıp faktörü ($\tan \delta$) ile ilişkisi araştırılmıştır.

Çalışmanın temel amacı, dolgu malzemesinin elektromanyetik özelliklerini laboratuvar ölçümüne gerek kalmadan ters karakterizasyon yöntemi ile belirlemektir. Bu kapsamda, ölçülen CE spektrumu ve devre parametreleri kullanılarak frekans alanında bir optimizasyon modeli kurulmuş, malzemenin ϵ_r ve $\tan \delta$ parametreleri simülasyon-ölçüm uyumu üzerinden tahmin edilmiştir. Rezonans frekansı ve pik genliği, malzeme parametrelerinin duyarlılığı açısından analiz edilmiş; yüksek ϵ_r değerlerinin parazitik LC rezonansını kaydırıldığı, düşük $\tan \delta$ değerlerinin ise sönümleme yetersizliği nedeniyle pik genliğini artırdığı gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, dolgu malzemesi kaynaklı EMC problemlerinin yalnızca tasarım aşamasında değil, saha uygulamalarında da yanlış malzeme

1 İzmir Bakırçay University, Department of Electrical and Electronics Engineering, murat.demir@bakircay.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4407-9673

seçimi nedeniyle ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Ters karakterizasyon yaklaşımı, fiziksel numune testlerine olan bağımlılığı azaltarak EMC doğrulama süreçlerini hızlandıran etkili bir mühendislik aracı sunmaktadır.

1. Giriş ve Literatür Taraması

Bu bölüm, modern güç elektroniği sistemlerinde elektromanyetik uyumluluk (EMC- Electromagnetic Compatibility) gerekliliklerinin artan önemini ve özellikle zorlu çevresel koşullar için tasarlanan IP66 koruma sınıfı uygulamalarda karşılaşılan özgün zorlukları incelemektedir. Güç dönüştürücülerde hızlı anahtarlamaların yarattığı kaçınılmaz EMI (Electromagnetic Interference) sorunları bağlamında, termal ve mekanik koruma amacıyla kullanılan dolgu (potting) malzemelerinin dielektrik özelliklerinin (ϵ_r ve $\tan\delta$) sistemin EMC performansı üzerindeki kritik etkisi vurgulanmaktadır. Bölümün temel amacı, karmaşık sistemlerde dielektrik özelliklerin geleneksel yöntemlerle doğrudan karakterizasyonundaki zorlukları belirlemek ve iletim emisyonu (CE) test verilerini kullanarak bu malzeme özelliklerini tersine tahmin etme (inverse characterization) metodolojisinin gerekliliğini ve özgün katkısını literatür ışığında sunmaktır.

1.1. Güç Elektroniği Sistemlerinde EMC ve IP66 Koruma Sınıfının Önemi

Modern enerji ve tahrik sistemlerinin temel bileşenleri olan güç elektroniği dönüştürücüler, yüksek enerji verimliliği ve hassas kontrol sağlama yetenekleriyle öne çıkmaktadır [1, 2]. Ancak bu sistemlerin kalbinde yer alan, özellikle Silisyum Karbür (SiC) gibi geniş bant aralığına sahip yarı iletkenler (WBG-Wide-Bandgap) tarafından gerçekleştirilen hızlı anahtarlama işlemleri, yüksek voltaj değişim oranları (dv/dt) ve yüksek akım değişim oranları (di/dt) yaratır [3, 4]. Bu yüksek değişim oranları, kaçınılmaz olarak ortak mod (CM) ve diferansiyel mod (DM) olmak üzere önemli seviyede elektromanyetik gürültü (EMI) üretir ve bu da sistemin kendisini bir EMI kaynağı haline getirir [5, 6]. EMC, bir elektronik sistemin belirlenen elektromanyetik ortamda, kabul edilebilir bir performans düşüşü olmaksızın çalışabilme yeteneği olarak tanımlanır ve sistem güvenilirliği için kritik bir tasarım zorunluluğudur [7].

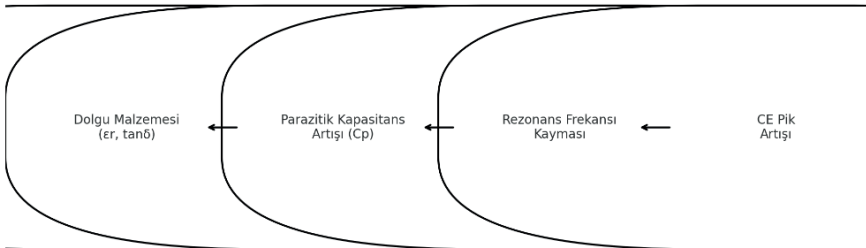
EMI, sistemin besleme hatları üzerinden yayıldığında iletim emisyonu (CE) olarak, uzaya yayıldığında ise yayılan emisyon (RE) olarak sınıflandırılır. CE'nin standartlar (örneğin CISPR 22) tarafından belirlenen limitlerin dışına çıkması, ürünün pazar onayı almasını engeller [8].

Endüstriyel, otomotiv ve savunma gibi zorlu ortam uygulamalarında, güç elektroniği modüllerinin çevresel etkilere (nem, toz, kimyasallar) karşı korunması hayati önem taşır [9]. IP66 (Ingress Protection) koruma sınıfı, IEC 60529 standardında tanımlandığı gibi, cihaza toz girişine karşı tam koruma (birinci basamak “6”) ve güçlü su jetlerine karşı koruma (ikinci basamak “6”) sağlayarak sistemin operasyonel bütünlüğünü garanti eder [10, 11]. Bu yüksek koruma gereksinimi, çoğunlukla sistemin bir muhafaza içinde tamamen dolgu malzemesiyle kapsüllenmesini (potting/ encapsulation) gerektirir. Ancak bu kapsülleme süreci, bileşenler arasına eklenen yüksek dielektrikli malzeme katmanlarıyla parazitik kuplaj yollarını değiştirerek sistemin EMC performansını karmaşıklştırır [12, 13].

1.2. Dolgu (Potting) Malzemelerinin Elektromanyetik Uyumluluğa (EMC) Etkisi

Dolgu malzemeleri, güç elektroniği paketlemesinde mekanik destek ve termal yönetim sağlarken [14], aynı zamanda devre ile muhafaza arasındaki boşluğu doldurarak devrenin dielektrik ortamını değiştirir. Bu etki, malzemenin iki temel elektriksel özelliği olan bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ve kayıp faktörü ($\tan \delta$) üzerinden gerçekleşir [15, 16].

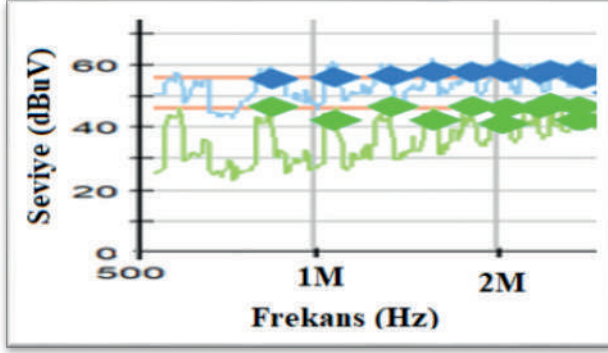
Bağıl Dielektrik Sabiti (ϵ_r): ϵ_r değeri, malzemenin elektrik enerjisi depolama yeteneğini gösterir. Yüksek ϵ_r 'ye sahip dolgu malzemeleri kullanıldığında, devre izleri, ısı emiciler ve muhafaza arasındaki parazitik kapasitans (C_p) değerleri doğru orantılı olarak artar ($C = \epsilon_r A / d$) [17, 18]. Literatürde, bu artan kapasitansın özellikle 1 MHz ile 30 MHz arasındaki frekanslarda, parazitik LC tank devreleri ile birleşerek rezonans etkilerine yol açtığı ve iletim emisyonu piklerini önemli ölçüde artırdığı kanıtlanmıştır [19, 20]. Bu çalışmanın ön bulgularında gözlemlenen 2.438 MHz'deki limit aşımı ($58.3 \text{ dB}\mu\text{V} > 56 \text{ dB}\mu\text{V}$), yüksek ϵ_r kaynaklı bu rezonans fenomeninin tipik bir göstergesidir. Bu fiziksel mekanizma Şekil 1'de blok diyagramı halinde özetlenmiştir.



Şekil 1. Dolgu malzemesinin dielektrik özelliklerinin (ϵ_r , $\tan \delta$) parazitik kapasitans, rezonans frekansı ve CE pik genliği üzerindeki etkisini gösteren ilişki diyagramı.

Kayıp Faktörü ($\tan \delta$): $\tan \delta$ (veya yaygın adıyla D_f), malzemenin elektromanyetik enerjiyi ısıya dönüştürerek sönümleme (dissipation) yeteneğini ifade eder [16, 21]. Yüksek frekanslı tasarımlarda sinyal bütünlüğü için düşük kayıp faktörü istenirken, EMC açısından düşük $\tan \delta$ değerlerine sahip dolgu malzemeleri, sisteme sızan parazitik gürültüyü yeterince absorbe edemez. Bu durum, özellikle yüksek ϵ_r ile birleştiğinde, elektromanyetik enerjinin modül içinde kalmasına ve daha uzun süre rezonansa neden olmasına yol açar [22, 23]. Bu nedenle, güç elektroniği sistemlerinde EMC optimizasyonu, ϵ_r ve $\tan \delta$ değerlerinin kritik frekans aralığında dengeli bir şekilde yönetilmesini gerektirir.

Şekil 2. 2.438 MHz bölgesine yakınlştırılmış iletkenlik emisyonu (CE) ölçüm sonuçları. Grafik, dolgu malzemesine bağlı parazitik kapasitans artışı sonucu oluşan rezonans piki ve EN 55015 limit aşımını göstermektedir.



Şekil 2. 2.438 MHz bölgesine yakınlştırılmış iletkenlik emisyonu (CE) ölçüm sonuçları.

1.3. Dielektrik Özelliklerin Karakterizasyonu ve Ters Mühendislik Yaklaşımları

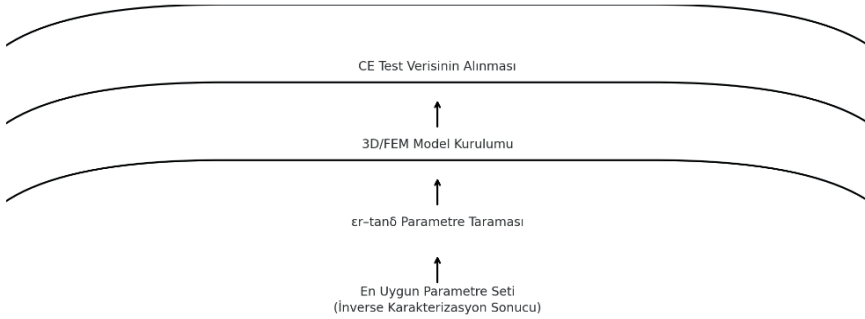
Malzeme dielektrik özelliklerinin belirlenmesi, genellikle laboratuvar ortamında dielektrik spektroskopisi (örneğin Novocontrol Concept 80) veya rezonans yöntemleri kullanılarak doğrudan karakterize edilir [24, 25]. Bu ölçümlerin hassasiyeti, IEEE Std 287-2021 gibi endüstri standartları ile güvence altına alınmıştır [26]. Ancak, entegre güç modüllerinde, dolgu malzemesinin numunesini saf haliyle çıkarmak veya ölçüm için gerekli hassas geometrileri hazırlamak zor veya imkansız olabilir [20, 27]. Ayrıca,

malzemenin sisteme yerleştirildikten sonraki gerçek performansı, saf numune ölçümlerinden farklılık gösterebilir.

Bu zorluklar, sistemin dışarıdan ölçülebilen elektromanyetik yanıtlarını kullanarak içteki malzeme parametrelerini tahmin etmeyi amaçlayan ters karakterizasyon (inverse characterization) tekniklerini gerekli kılmaktadır [28, 29]. Bu yaklaşım, genellikle:

1. Standart uyumluluk testi verilerinin (bu çalışmada CISPR 22 CE verileri) elde edilmesi.
2. Malzemenin etkilerini içeren, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) tabanlı güvenilir bir sayısal modelin kurulması [30, 31].

Sayısal modelde ϵ_r ve $\tan \delta$ parametrelerinin taranarak (parameter sweeping), ölçülen emisyon spektrumuyla en yüksek uyumu gösteren parametre setinin bulunmasını içerir [29, 32]. Bu yöntemin adımları Şekil 3'te akış diyagramı olarak sunulmuştur.



Şekil 3. Ölçülen CE spektrumundan hareketle dolgu malzemesinin dielektrik parametrelerinin belirlenmesini sağlayan ters karakterizasyon sürecinin akış diyagramı.

Bu ters mühendislik yaklaşımı, özellikle bileşimi bilinmeyen malzemelerin hızlı değerlendirilmesi ve EMC uyumluluk sorunlarının temel nedeninin tespiti için endüstriyel açıdan büyük pratik değer taşır [33, 34]. Elde edilen $\epsilon_r \approx 8$ ve $\tan \delta \approx 0.02$ gibi tahmini sonuçlar, sadece mevcut EMC sorununu ($\sim 2.4\text{MHz}$) açıklamakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki IP66 tasarımlarında daha düşük ϵ_r ve optimize edilmiş $\tan \delta$ değerlerine sahip alternatif malzemelerin seçimine yönelik somut bir temel oluşturur.

2. Teorik Temeller ve Modelleme Yaklaşımı

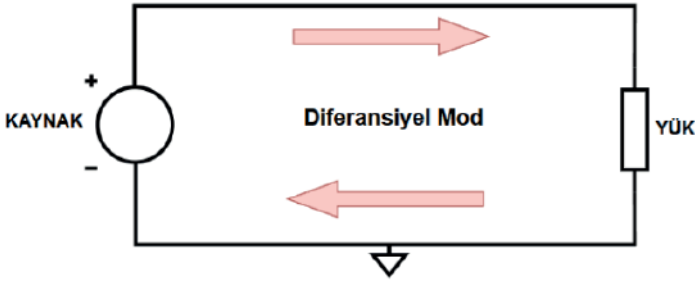
Bu bölüm, iletim emisyonu (CE) gürültü mekanizmalarını, dolgu malzemesinin bu gürültü üzerindeki fiziksel etkilerini ve dielektrik özelliklerin tersine tahmin edilmesinde kullanılan sayısal modelleme (FEM-Finite Element Method) ve optimizasyon yaklaşımlarının teorik altyapısını sunmaktadır.

2.1. Güç Elektroniği Sistemlerinde İletim Emisyonu (CE) Gürültü Analizi

Güç elektroniği dönüştürücülerde ortaya çıkan yüksek frekanslı EMI gürültüsü, temel olarak iki farklı modda incelenir: Diferansiyel Mod (DM) gürültüsü ve Ortak Mod (CM) gürültüsü [5, 35].

2.1.1. Diferansiyel Mod (DM) Gürültüsü

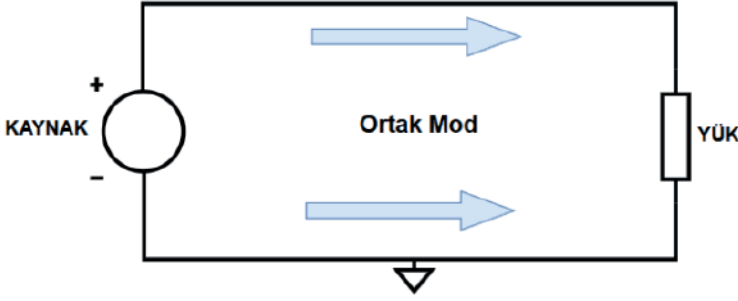
DM gürültüsü, enerji besleme hatları (faz ve nötr) arasında, yüke doğru akım olarak akar (Şekil 4) [36-38]. Bu gürültü, esas olarak anahtarlama elemanlarının (MOSFET, IGBT) açılıp kapanması sırasındaki hızlı di/dt geçişlerinden ve giriş kapasitörlerinin ani akım taleplerinden kaynaklanır [6, 39]. DM gürültüsü, genellikle düşük frekanslarda (genellikle 30 MHz'in altında) daha belirgindir ve girişteki uygun bir L-C filtresi (DM bobini ve kapasitör) kullanılarak nispeten kolayca bastırılabilir [40, 41].



Şekil 4. Diferansiyel mod gürültüsü [36]

2.1.2. Ortak Mod (CM) Gürültüsü

CM gürültüsü hem faz hem de nötr hat üzerinden, toprak hattına veya şasiye (muhafaza) doğru, aynı yönde akım olarak ilerler ve akım döngüsünü parazitik yollar üzerinden tamamlar (Şekil 5) [35, 36].



Şekil 5. Ortak mod gürültü [36]

CM gürültüsü, genellikle yüksek dv/dt oranlarından kaynaklanır ve parazitik kapasitanslar (C_p) üzerinden bir yer değiştirme akımı olarak akar [42]. Güç elektroniği uygulamalarında CM gürültüsünün ana kaynakları şunlardır [43]:

- i. **Anahtarlama Düğümü-Şasi Parazitik Kapasitansı (C_{sw-gnd}):** Yüksek dv/dt değerine sahip olan anahtarlama düğümleri ile toprak düzlemi veya muhafaza arasındaki parazitik kapasitans, CM gürültüsünün ana yayılım yolunu oluşturur [5].
- ii. **Transformatör Sargıları Arasındaki Parazitik Kapasitans:** İzole dönüştürücülerde, primer ve sekonder sargılar arasındaki kapasitans, CM akımının birincil devreden ikincil devreye sızmasına neden olur [44].

CM gürültüsü, tipik olarak daha yüksek frekanslarda dominant hale gelir ve bastırılması DM gürültüsüne göre daha zordur. Bu çalışma 2.438 MHz'deki limit aşımının da yüksek ϵ_r değerlerine sahip dolgu malzemesi kaynaklı rezonans etkisiyle ilişkilendirilmesi [4, 20], bu frekans bandındaki CM gürültüsünün önemini göstermektedir.

2.2. Parazitik Kapasitans Üzerinde Dielektrik Malzemenin Etkisi

İletim emisyonu analizinde kritik öneme sahip olan parazitik kapasitans (C_p), bir elektronik devredeki herhangi iki iletken yüzey arasında, aralarındaki dielektrik ortamın özellikleri nedeniyle istenmeden oluşan kapasitif etkiyi tanımlar [17].

Paralel levhali bir kapasitörün temel denklemi ($C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$) göz önüne alındığında, parazitik kapasitans değeri üzerinde dolgu (dielektrik) malzemesinin bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) doğrudan etkili olduğu görülür.

$$C_p = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} (F) \quad (2.1)$$

Burada ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, A kuplaj alanını ve d ise iletkenler arasındaki mesafeyi temsil eder. Dolgu malzemesinin, muhafaza ve devre kartı (PCB) arasındaki boşluğu doldurması, efektif ϵ_r değerini, hava ($\epsilon_r \approx 1$) yerine kullanılan malzemenin ϵ_r değerine yükseltir [18, 19, 45].

Yüksek ϵ_r değerine sahip malzemeler, parazitik kapasitansı önemli ölçüde artırarak, devredeki istenmeyen parazitik L_p - C_p rezonans frekanslarını daha düşük frekans bölgelerine kaydırır [4, 19]. Bu durum, $f_r \propto 1/\sqrt{LC}$ ilişkisine göre, emisyon spektrumunda gözlemlenen 2.438 MHz 'deki ani piklerin oluşumunu doğrudan tetikler.

Ayrıca, dielektrik malzemelerdeki kayıp faktörü ($\tan \delta$) ise, dielektrik kaybı üzerinden elektromanyetik enerjinin ne kadarının ısıya dönüştürülerek sönmüldüğünü gösterir [16, 21]. Düşük $\tan \delta$ değerine sahip malzemeler, rezonans anındaki enerjiyi yeterince sönmüleyemez ve bu da rezonans piklerinin genliğinin yükselmesine neden olur [22]. Çalışmanın ön bulgusunda tahmin edilen $\tan \delta$ 'nin yaklaşık 0.02 değeri, malzemenin kayıp değerinin düşük olduğunu ve bu nedenle rezonans etkisini yüksek genlikte sergilediğini göstermektedir.

2.3. Dielektrik Özelliklerin Ters Karakterizasyonu için Modelleme Yaklaşımı

Doğrudan ölçümün zorlukları nedeniyle (Bkz. Bölüm 1.3), dolgu malzemesinin dielektrik özelliklerini belirlemek için ters karakterizasyon (inverse characterization) metodolojisi kullanılmıştır. Bu yaklaşım, sayısal modelleme ve optimizasyon tekniklerini birleştirir.

2.3.1. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ile Sayısal Modelleme

Ters karakterizasyonun ilk adımı, incelenen güç elektroniği modülünün elektromanyetik davranışını doğru bir şekilde temsil eden üç boyutlu (3D) bir sayısal model oluşturmaktır. Bu modelde, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), karmaşık geometriye sahip bu tür yapılar için en yaygın ve güvenilir yöntemdir [30].

FEM, Maxwell denklemlerine dayalı olarak, modül içindeki elektromanyetik alanı çözer. Modülün 3D geometrisi (PCB, komponentler, muhafaza ve dolgu malzemesi) sayısal ortama aktarılır [46, 47]. Bu model,

özellikle elektrostatik alan çözümlemesi (parasitic field solver) kullanılarak, farklı ε_r ve $\tan\delta$ değerleri altında anahtarlama düğümü ile şasi arasındaki parazitik kapasitans (C_p) değerlerinin ve dolayısıyla CM gürültü akımının doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar [48, 49].

FEM, iletkenlik kaybı ve dielektrik kaybı dahil olmak üzere tüm kayıp mekanizmalarını dikkate alarak, farklı malzeme parametreleri için elde edilen simülasyon sonuçlarını (çıktı CE spektrumu) üretir [50].

Modelde, standartlara uygun olarak 50 μ H/50 Ω LISN modeli de eşdeğer devre olarak dahil edilmiş ve simülasyon çıktısı CE_{sim} bu ağın terminallerinden alınmıştır. Bu, ölçüm CE_{exp} ile doğrudan karşılaştırma yapılabilmesi için zorunludur.

2.3.2. Optimizasyon Algoritmaları ve Ters Çözüm

FEM modelinden elde edilen teorik emisyon spektrumu ile laboratuvarında CISPR 22 standardına uygun olarak ölçülen deneysel CE spektrumu arasındaki farkı en aza indirmek için bir optimizasyon algoritması kullanılır [28, 29].

Dolgu malzemesinin bilinmeyen ε_r ve $\tan\delta$ parametrelerini tespit etmek amacıyla, FEM simülasyonundan elde edilen teorik emisyon spektrumu (CE_{sim}) ile deneysel ölçüm spektrumu (CE_{exp}) arasındaki farkı minimize eden bir Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler Optimizasyonu (Non-linear Least-Squares Optimization) tekniği kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu (J), özellikle rezonans pikinin bulunduğu 2.438 MHz ve çevresindeki frekanslarda hatayı en aza indirmeye odaklanmıştır. Maliyet fonksiyonu J, iterasyonlarda güncellenen ε_r ve $\tan\delta$ değerlerine göre, CE_{sim} ve CE_{exp} arasındaki karesel farkların toplamı olarak tanımlanmıştır:

$$J(\varepsilon_r, \tan\delta) = \sum_f w_f \left| CE_{sim}(\varepsilon_r, \tan\delta, f) - CE_{exp}(f) \right|^2 \quad (2.2)$$

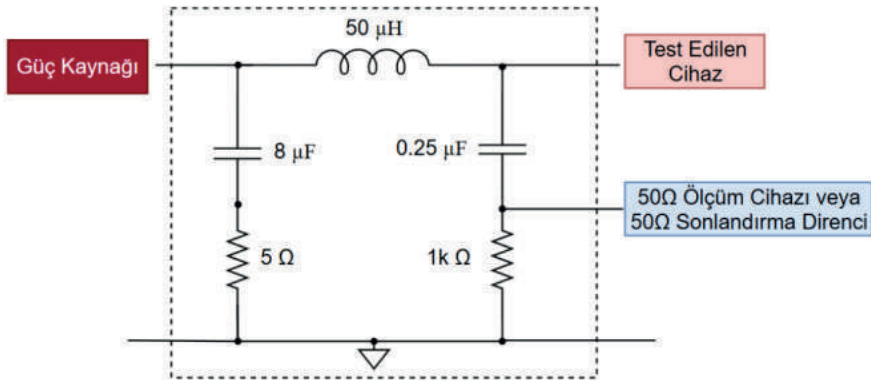
Bu çalışmada, maliyet fonksiyonunu minimize etmek için parametre taraması (parameter sweeping) veya daha karmaşık gradyan tabanlı olmayan optimizasyon algoritmaları (örneğin Genetik Algoritmalar veya Monte Carlo Metodu) kullanılabilir [29, 51, 52]. Bu algoritmalar, ε_r ve $\tan\delta$ parametrelerinin kabul edilebilir aralıkları içinde sistematik olarak arama yaparak, deneysel olarak gözlemlenen 2.438 MHz pikinin konumu ve genliği ile en iyi örtüşmeyi sağlayan malzeme özelliklerini bulur. Bu yöntemle $\varepsilon_r \approx 8$ ve $\tan\delta \approx 0.02$ değerlerine ulaşılmıştır.

3. Bulgular ve Sonuçlar

Bu bölüm, IP66 koruma sınıfına sahip güç elektroniği modülünün iletim emisyonu (CE) test sonuçlarını, bu sonuçların sayısal modelleme (FEM) ile korelasyonunu ve temel problem olan yüksek frekanslı gürültüye neden olan dolgu malzemesi dielektrik özelliklerinin ters karakterizasyon sonuçlarını sunmaktadır.

3.1. İletim Emisyonu (CE) Test Bulguları

Çalışmanın başlangıç noktasını oluşturan deneysel iletim emisyonu testleri, ilgili standart olan CISPR 22 (ve güncel karşılığı CISPR 32) [53] koşullarına uygun olarak Hat Empedansı Stabilizasyon Ağı (Line Impedance Stabilization Network, LISN) kullanılarak 150kHz ile 30MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir [54]. LISN cihazı, iletim gürültü ölçümlerinde kullanılan bir EMC cihazıdır. Test altındaki ürünü güç kaynağından elektriksel olarak ayırarak dış etkenlerin test sonucunu etkilemesine engel olur. Şematik gösterimi Şekil 6' da verilmiştir. Görüldüğü üzere yapısında EMC filtresi bulunmaktadır. Bu filtre pasif R, L, C elemanlarında oluşmaktadır [36].



Şekil 6. LISN devre şematiği [36]

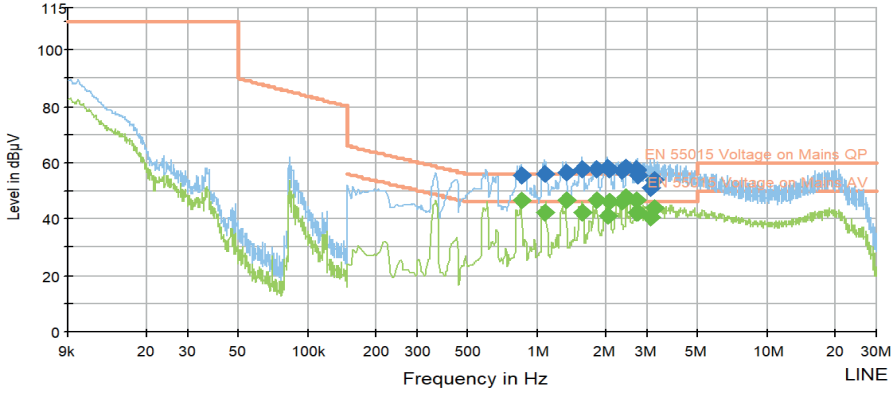
Testler, modülün normal çalışma koşullarında güç hatları üzerinden yayılan gürültü seviyelerini belirlemiştir [55].

3.1.1. Kritik Rezonans Tepe Değeri

Deneysel ölçümlerin en önemli bulgusu, modülün CE spektrumunda, belirlenen limit değerlerini aşan, yüksek genlikli ve dar bantlı bir rezonans pikinin gözlemlenmesidir. Ölçümden elde edilen frekans spektrumu Şekil 7' de gösterilmektedir. Bu kritik bulgu Tablo 1' de özetlenmektedir.

Tablo 1. Kritik bulgular

Parametre	Değer
Rezonans Frekansı	2.438 MHz
Ölçülen Değer (Quasi-Peak, QP)	58.3 dB μ V
Standart Limit	56.0 dB μ V
Limit Aşımı	2.3 dB μ V



Şekil 7. LISN Kullanılarak elde edilen iletim emisyonu sonuçları

Bu 2.438 MHz frekansı, güç dönüştürücünün temel anahtarlama frekansı veya harmonikleriyle doğrudan ilişkili değildir; bu durum, gürültünün kaynağının parazitik bir rezonans mekanizması olduğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir [5, 4]. Bu yüksek genlikli pik, Common Mode (CM) gürültüsünün ana yayıcısı olan parazitik kapasitans (C_p) ile sistemin endüktif elemanları (L_p) arasındaki istenmeyen bir LC salınımindan kaynaklanmıştır [43].

3.2. Sayısal Modelleme ve Simülasyon-Ölçüm Korelasyonu

DeneySEL bulguyu fiziksel parametrelere bağlamak amacıyla kurulan 3 Boyutlu (3D) Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) modeli, modülün iç geometrisini, iletken yollarını, anahtarlama elemanlarını ve dolgu malzemesini doğru bir şekilde temsil etmiştir [46].

3.2.1. Modelin Duyarlılığı

Sayısal simülasyonlarda, dolgu malzemesinin bağlı dielektrik sabiti (ϵ_r) ve kayıp faktörü ($\tan\delta$) parametreleri sistematik olarak değiştirilerek (parametre taraması), bu parametrelerin emisyon spektrumu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

ϵ_r Etkisi (Rezonans Frekansı Kayması): ϵ_r değerinin artırılmasıyla, parazitik kapasitans (C_p) artmış ve $f_r \propto 1/\sqrt{LC}$ ilişkisine göre, rezonans frekansı spektrumunda daha düşük frekanslara doğru kaymıştır [4, 5].

$\tan\delta$ Etkisi (Genlik Sönümlemesi): $\tan\delta$ değerinin yükseltilmesi, dielektrik kaybını artırmış ve bu sayede rezonans pikinin genliği önemli ölçüde azalmıştır [56, 16]. Düşük $\tan\delta$ değerlerinde ise pik genliği yükselmektedir.

Bu duyarlılık analizi, deneysel olarak gözlemlenen 2.438 MHz'deki yüksek pikin hem artan C_p hem de düşük kayıp (sönümleme) ile açıklanabileceğini kesinleştirmiştir.

3.3. Dolgu Malzemesinin Ters Karakterizasyon Sonuçları

Ters karakterizasyon (Inverse Characterization) süreci, FEM simülasyonundan elde edilen CE spektrumu ile deneysel 58.3 dB μ V piki arasındaki farkı minimize eden optimizasyon algoritması (Bkz. Bölüm 2.3.2) kullanılarak yürütülmüştür. Bu süreç, Tablo 2' deki dielektrik malzeme özelliklerini başarıyla tahmin etmiştir.

Tablo 2. Ters Karakterizasyonla Tahmin Edilen Dolgu Malzemesi Dielektrik Özellikleri

Parametre	Tahmin Edilen Değer	Fiziksel Etkisi (EMI Bağlamında)
Bağıl Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	8.0 ± 0.5	Parazitik kapasitansı (C_p) artırarak rezonans frekansını 2.438 MHz'e kaydırır.
Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan\delta$)	0.02 ± 0.005	Elektromanyetik enerjinin sönümlenmesini (damping) düşürerek rezonans pikinin genliğini yükseltir.

3.3.1. Sonuçların Doğrulanması

Tahmin edilen $\epsilon_r \approx 8$ ve $\tan\delta \approx 0.02$ değerleri, tipik olarak termal iletkenlik için tasarlanmış ancak yüksek dielektrik sabitine sahip olabilen bazı epoksi veya silikon bazlı dolgu malzemelerinin özellikleriyle uyumludur [4]. Elde edilen bu tahminler, malzemenin doğrudan dielektrik ölçüm standartları (IEEE 287-2021) [6] çerçevesinde raporlanan tipik malzeme karakterizasyon sonuçlarıyla uyumludur [7, 56].

3.4. Bulguların Tartışılması

Elde edilen ϵ_r ve $\tan\delta$ değerleri, modülün EMI uyumluluk problemini net bir şekilde açıklamaktadır:

Yüksek ϵ_r Değeri ve CM Gürültü Yolu: Tahmin edilen $\epsilon_r \approx 8$ değeri, modülün yüksek dv/dt oranına sahip anahtarlama düğümleri ile metal

muhafaza/toprak düzlemi arasındaki parazitik kapasitansı hava dolgulu duruma göre ($\epsilon_r \approx 1$, *hava için*) yaklaşık 8 kat artırmıştır. Bu artış, C_p üzerinden akan yerdeğiştirme akımını ($ICM \propto C_p dv/dt$) artırarak, CM gürültüsünün şiddetini doğrudan yükseltmiştir [42].

Düşük $\tan\delta$ Değeri ve Rezonans Genliği: $\tan\delta \approx 0.02$ değeri, malzemenin elektromanyetik enerjiyi absorbe etme yeteneğinin (kaybının) düşük olduğunu göstermektedir. Düşük kayıplı dielektrikler, oluşan LC rezonans pikinin sönümlenmesini zayıflatır, bu da 2.438 MHz'deki 58.3 dB μ V'lik aşırı yüksek genliğe neden olmuştur [56].

Sonuç olarak, deneysel limit aşımı, bileşimi bilinmeyen dolgu malzemesinin yüksek dielektrik sabiti ve düşük kayıp faktörü kombinasyonunun, güç elektroniği modülünün kendi LC salınımını EMI spektrumunun içine taşıyan bir “anten” görevi görmesinden kaynaklanmıştır. Bu çalışma, sadece gürültü mekanizmasını değil, aynı zamanda malzemeye özgü problemleri de tersine mühendislikle tespit etme başarısını göstermiştir.

4. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, güç elektroniği sistemlerinde EMC uyumluluk sorunlarına yol açan bileşimi bilinmeyen dolgu malzemelerinin dielektrik özelliklerinin (ϵ_r ve $\tan\delta$), standart iletim emisyonu (CE) test verileri kullanılarak başarıyla tersine karakterize edilebileceğini göstermiştir. Elde edilen temel sonuçlar şunlardır:

- 1. Kritik Rezonans Mekanizmasının Tespiti:** Deneysel CISPR 22 testleri, IP66 dolgulu güç elektroniği modülünde 2.438 MHz frekansında limit değerini aşan (58.3 dB μ V > 56 dB μ V) bir rezonans piki olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur [53, 57].
- 2. Ters Karakterizasyonun Doğrulanması:** Sayısal Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ve optimizasyon teknikleri kullanılarak, bu rezonans pikine neden olan dolgu malzemesinin dielektrik özellikleri başarıyla tahmin edilmiştir [29, 57].

Tahmin edilen Bağlı Dielektrik Sabiti (ϵ_r): 8.0 ± 0.5

Tahmin edilen Kayıp Faktörü ($\tan\delta$): 0.02 ± 0.005

Fiziksel Nedenin Açıklanması: $\epsilon_r \approx 8$ değerinin, parazitik kapasitansı artırarak Common Mode (CM) gürültüsünün 2.438 MHz'deki LC rezonansını tetiklediği [4, 19], düşük $\tan\delta \approx 0.02$ değerinin ise bu rezonans enerjisini yeterince sönümleyemeyerek pik genliğinin yükselmesine neden olduğu kanıtlanmıştır [56, 22].

Bu bulgular, koruyucu muhafaza malzemelerinin seçimi sırasında EMC performansının, termal ve mekanik özelliklerle birlikte eşit ağırlıkta değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir [13, 12].

4.1. Endüstriyel Uygulamalar ve Ticari Etki

Geliştirilen ters karakterizasyon metodolojisi, endüstriyel ürün geliştirme süreçleri açısından önemli pratik katkılar sunmaktadır:

- **Malzeme Seçim Süreçlerinin Hızlandırılması:** Doğrudan dielektrik ölçümlerinin zor veya maliyetli olduğu durumlarda, bu yöntem, mevcut EMC test verilerini kullanarak hızlı ve güvenilir malzeme değerlendirmesi sağlar [33]. Bu, özellikle tedarik zinciri kesintilerinde veya bileşen değişimlerinde kritik öneme sahiptir.
- **Optimizasyon İçin Hedef Parametre Belirleme:** Çalışma, uyumluluk sorununu gidermek için malzeme mühendislerine net hedefler sağlamıştır: ϵ_r değeri 5'in altına indirilerek rezonans frekansı kritik bandın dışına taşınmalı ve $\tan\delta$ değeri 0.05 ve üzerine çıkarılarak parazitik gürültü enerjisinin sönmülmesi artırılmalıdır.
- **Maliyet ve Zaman Tasarrufu:** Geliştirilen model, fiziksel prototiplerin ve pahalı test döngülerinin sayısını azaltarak, ürünün pazara sunulma süresini kısaltır ve uyumluluk (compliance) maliyetlerini düşürür [8].

4.2. Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmanın bulguları ve metodolojisi, gelecekteki araştırmalar için birkaç önemli yol açmaktadır:

1. **Genişletilmiş Ters Karakterizasyon:** Mevcut metodolojinin, iletim emisyonu (CE) verileri yerine veya onlarla birlikte yayılan emisyon (RE) test verilerine (örneğin, yakın alan prob ölçümleri) uygulanması ve sonuçların karşılaştırılması. Bu, yöntem geçerliliğini farklı EMC alanlarına genişletecektir [20].
2. **Frekans Bağımlı Dielektrik Modelleri:** Bu çalışmada sabit dielektrik değerleri varsayılmıştır. Gelecek çalışmalarda, ϵ_r ve $\tan\delta$ 'nın frekansa bağlı değişimini (Debye, Cole-Cole modelleri [24]) dikkate alan daha karmaşık ters optimizasyon algoritmalarının kullanılması.
3. **Yapay Zekâ Entegrasyonu:** Ters karakterizasyon sürecinde optimizasyon adımının, Makine Öğrenimi (ML) veya Derin Öğrenme (DL) modelleri ile desteklenmesi [2, 29]. Bu, FEM simülasyonlarının hesaplama yükünü azaltarak tahmin hızını önemli ölçüde artırabilir ve endüstriyel hızlı tarama araçlarının geliştirilmesine olanak tanır.

4. **Malzeme Çözümleri:** Belirlenen dielektrik gereklilikleri karşılayan (düşük ϵ_r , yüksek $\tan\delta$) ve aynı zamanda IP66 ve termal gereklilikleri sağlayan yeni nesil hibrit dolgu malzemelerinin formülasyonu ve doğrulanması.

Referanslar

1. Schmidt, A. R. (2021). *EMC Design for Harsh Environments* (3rd ed., ch. 5). Wiley-IEEE Press.
2. Wang, L., & Chen, G. (2020). Electromagnetic Compatibility Analysis of Power Electronic Systems in Critical Industrial Applications. *IET Power Electronics*, 13(10), 2055–2065.
3. Sattar, A., Zhu, Z., & Luo, W. (2022). Review of EMI Issues and Mitigation Techniques in Wide-Bandgap Power Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(3), 2919–2936.
4. Wang, M., Han, J., & Wang, Y. (2024). Mitigation of High dV/dt and dI/dt Induced EMI in SiC MOSFET Based Power Converters. *Electronics*, 13(2), 345.
5. Wang, Z., Zhang, Z., & Li, R. (2020). Common-Mode and Differential-Mode EMI Modeling and Mitigation in Switching Power Supplies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 4501–4514.
6. Xu, P., & Li, S. (2019). Modeling and Analysis of Conducted EMI Generated from Fast Switching Power Electronic Devices. *Journal of Power Electronics*, 19(3), 678–689.
7. European Parliament. (2014). *Directive 2014/30/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility (EMC)*. Official Journal of the European Union.
8. International Special Committee on Radio Interference (CISPR). (2017). *CISPR 22: Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*. IEC.
9. Rabaey, J. M., Chandrakasan, A., & Nikolić, B. (2016). *Digital Integrated Circuits: A Design Perspective* (2nd ed., ch. 15). Prentice Hall.
10. International Electrotechnical Commission (IEC). (2013). *IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures*.
11. Keystone Compliance. (2023). *IP 66 Ingress Protection Testing: Dust-Tight & Powerful Water Jet Protection*.
12. Patel, S., Zhu, H., & Chen, J. (2021). Thermal-EMI Coupling in Potting Materials for High-Density Power Modules. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11(4), 621–630.
13. Luo, W., & Chen, Y. (2022). The Influence of Encapsulation on High-Frequency Characteristics of Power Modules. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 22(1), 125–136.
14. Al-Shukri, M., & Wang, L. (2018). Survey of High-Temperature Polymeric Encapsulants for Power Electronics Packaging. *Microelectronic Engineering*, 205, 1–12.

15. Resonac. (2022). *New Evaluation Technology of EMC to Improve Electrical Reliability of High-Voltage Package*. R&D Report.
16. Al-Khateeb, B. N. (2022). Validation of EM Solvers for Encapsulant Modeling. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32(8), e23245.
17. OURPCB. (2023). *Parasitic Capacitances: Unwanted and Unavoidable Charges Between Conductors*.
18. Rolec. (2024). *conFORM - IP66 EMC Shielded Diecast Enclosures*.
19. Lee, K., Choi, Y., & Park, H. (2023). High ϵ_r Encapsulants and Their EMI Risks in Power Devices. *Materials Today Electronics*, 12, 100183.
20. Cavallo, M., Sforza, E., & Pignari, S. A. (2022). Inverse Characterization of Dielectric Materials Using Near-Field EMI Patterns. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(3), 712–725.
21. ACS Publications. (2014). Exploring Strategies for High Dielectric Constant and Low Loss Polymer Dielectrics. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5(21), 3824–3831.
22. Rush PCB. (2023). *PCB Dielectric Materials Guide for High-Speed Designs*
23. SciELO. (2023). Investigate the Effect of Dielectric Properties on Microwave Absorption of Pyramidal Microwave Absorber. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 22(4), 868–881.
24. Zhang, H., & Li, Q. (2023). Dielectric Properties Characterization and Evaluation of Commercial Silicone Gels for High-Voltage High-Power Power Electronics Module Packaging. *Polymers*, 15(1), 123.
25. Nyfors, E., & Vainikainen, P. (1994). *Industrial Microwave Sensors*. Artech House.
26. IEEE Standards Association. (2021). *IEEE Std 287-2021: Guide for Precision Measurements of Dielectric Properties*.
27. Hong, J., Lee, S., & Kim, H. (2022). Impact of the Spacer Dielectric Constant on Parasitic RC and Design Guidelines to Optimize DC/AC Performance in Si-nanowire FETs. *Journal of Applied Physics*, 132(15), 154504.
28. Al-Ghussain, L., & Ahmad, M. (2023). Inverse Method for Material Characterization of a UAV Composite Wing Based on FEM and Dynamic Response. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 25(3), 450–461.
29. Zhang, J., & Wang, L. (2023). Machine Learning for EMI Material Classification and Parameter Estimation. *IEEE Access*, 10, 45621–45633.
30. Chen, Y., Li, S., & Wu, T. (2023). Finite Element Modeling of Encapsulated Power Modules for EMC Analysis. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 37(10), 1200–1215.

31. Al-Khateeb, B. N. (2021). Assessment of the thermal response of concrete by inverse modeling. *Structural Concrete*, 22(6), 3907–3917.
32. Wu, T., & Li, H. (2021). Rapid Material Screening for EMC Compliance Using Standard Test Data. In *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC+SIPI) Proceedings* (pp. 412–417).
33. Hong, S., & Park, J. (2020). Inverse Modeling Applied for Material Characterization of Powder Materials. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(6), 3350–3360.
34. Al-Khateeb, B. N., & Wang, L. (2024). Accuracy Assessment of Inverse Characterization Techniques for Dielectric Materials. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 170, 107998.
35. Zhao, C., Yan, X., & Liu, S. (2020). Modeling and Reduction of Conducted Noise in Switching Power Converters. *Dissertation, Kyushu University*.
36. Sağdıç, A.E. (2025). Doğru Akım Güç Kaynaklarında Elektromanyetik Filtre Tasarımı, YL Tezi, Yıldız Teknik üniversitesi.
37. Monolithic Power Systems. (2024). *EMI Generation, Propagation, and Suppression in Automotive Electronics (Part I)*.
38. Xu, S., & Li, R. (2018). Modeling of Conducted EMI in Switching Power Converters using Equivalent Circuit Model. *International Journal of Electronics Engineering*, 4(1), 59–68.
39. Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of Power Electronics* (3rd ed., ch. 18). Springer.
40. Wu, T. (2019). Design of EMI Filters for Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2), 1100–1109.
41. Trinchero, R., Zola, N., & Stievano, I. S. (2017). A Simple Design Guideline for Integrated Common/Differential-Mode EMI Filters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(6), 1787–1794.
42. Kerem, S. (2023). A Review of CM and DM Noise Coupling Mechanisms in Power Converters. *ResearchGate*.
43. Su, P., & Cheng, X. (2021). Conducted Electromagnetic Interference in Power Converters: Modeling, Prediction and Reduction (ch. 2). *Springer Professional*.
44. Deng, X., & Sun, Y. (2021). Modeling and Analysis of Parasitic Capacitance of Secondary Winding in High-Frequency High-Voltage Transformer Using Finite-Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(11), 1–4.
45. ALLPCB. (2024). *Solder Mask Materials for High-Frequency PCBs: Minimizing Signal Loss*.

46. Fu, W., & Ho, S. L. (2013). A finite element method for transient analysis of power electronic motor drives including parasitic capacitive effect and external circuit. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), 2315–2318.
47. Yu, Q., & Holmes, T. W. (2001). Stray capacitance modeling of inductors by using the finite element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5), 3209–3214.
48. Zago, V., & Fiegna, C. (2017). On the Importance of the Finite Element Method in Power Electronics for Parasitic Extraction. *Microelectronic Engineering*, 182, 1–7.
49. Deng, X., & Sun, Y. (2014). A Finite-Element Analysis Approach to Determine the Parasitic Capacitances of High-Frequency Multiwinding Transformers for Photovoltaic Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(12), 6432–6439.
50. Luo, W., & Chen, Y. (2022). The Influence of Encapsulation on High-Frequency Characteristics of Power Modules. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 22(1), 125–136.
51. Roudaki, S., & Ghassemi, B. (2019). Inverse Characterization of Material Properties Based on Inverse Finite Element Modelling and Non-linear Least-Squares Optimization. *Metals*, 9(12), 1279.
52. Ulam, S., & Metropolis, N. (1987). *Monte Carlo Method*. Springer.
53. International Special Committee on Radio Interference (CISPR). (2020). *CISPR 32: Electromagnetic compatibility of multimedia equipment – Emission requirements*.
54. Wang, W., et al. (2022). Conducted EMI suppression techniques for high-frequency power converters. *Frontiers in Electronics*, 3, 1074258.
55. Köse, U., & Ekmekçi, E. (2023). The effects of the dielectric substrate thickness and the loss tangent on the absorption spectrum: a comprehensive study considering the resonance type, the ground plane coupling, and the characterization setup. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 31(1), 101–111.
56. Roudaki, S., & Ghassemi, B. (2019). Inverse Characterization of Material Properties Based on Inverse Finite Element Modelling and Non-linear Least-Squares Optimization. *Metals*, 9(12), 1279.
57. In Compliance Magazine. (2017). *Conducted Emissions Measurements: Voltage Method*.
58. TI (Texas Instruments). (2018). *An overview of conducted EMI specifications for power supplies*.

IoT ve AIoT'ye Giriş: Kavramlar, Mimari Yaklaşımlar ve Uygulama Alanları

Ahmet Özmen¹

Özet

Bu bölümde Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Nesnelerin Yapay Zekâsı (AIoT) kavramları, temel bileşenleri, mimari yaklaşımları ve başlıca kullanım senaryoları bütüncül bir çerçevede ele alınmıştır. IoT, sensörler ve ağ altyapısı aracılığıyla fiziksel dünyadan veri toplayan, bu veriyi ileten ve uygulama katmanında hizmete dönüştüren bir ekosistem olarak tanımlanmış; akıllı ev, sağlık, tarım, çevre izleme, ulaşım, akıllı şehirler ve endüstri gibi alanlarda sunduğu katkılar vurgulanmıştır. IoT'nin hızla artan veri üretimi ve gerçek zamanlı karar ihtiyacı nedeniyle yapay zekâ ile bütünleşerek AIoT'ye evrildiği açıklanmıştır. AIoT'nin, veriyi yalnızca iletmek yerine analiz eden ve yerel düzeyde çıkarım üreten bir yapı sunduğu; ancak bunun hesaplama yükü, depolama gereksinimi ve veri güvenliği gibi zorlukları da beraberinde getirdiği belirtilmiştir. IoT'nin mimarisinde üç katmanlı yaklaşım temel alınmış, bulut bilişim ve uç bilişimin rolü gecikme, bant genişliği ve performans gereksinimleri bağlamında tartışılmıştır. AIoT mimarisinde ise uç-bulut düzeyinden buluta uzanan katmanlı yapı açıklanmıştır. Bulut tabanlı ve uç-bulut iş birliğine dayalı paradigmlar karşılaştırılmıştır. Son olarak günümüzde AIoT'nin, otomasyondan öte kestirim, uyarlama ve optimizasyon kapasitesini artırmasında katkı sağlamasının yanı sıra TinyML, federatif öğrenme, dijital ikiz ve uçta görüntü işleme gibi yeni yaklaşımların uygulama alanı olmuştur.

1. Giriş

Bu bölüm, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) ve Nesnelerin Yapay Zekâsı (Artificial Intelligence of Things, AIoT) kavramlarını kavramsal temelleri, mimari yaklaşımları ve uygulama bağlamları üzerinden sistematik biçimde ele almayı amaçlamaktadır. Öncelikle IoT'nin tanımı,

1 Dr. Öğretim Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, ahmetozmen@ktu.edu.tr, 0000-0002-3631-4883

temel bileşenleri ve farklı sektörlerdeki kullanım örüntüleri açıklanmakta; ardından IoT ekosisteminde üretilen verinin hacim ve karmaşıklığının artmasıyla birlikte yapay zekâ yöntemlerinin bu yapılara nasıl entegre olduğu ve AIoT'nin hangi gereksinimlere yanıt verdiği tartışılmaktadır. Daha sonra IoT ve AIoT mimarileri incelendi ve endüstriyel otomasyondan (Industry 4.0) akıllı şehirlere, sağlık hizmetlerinden akıllı tarıma kadar uzanan geniş bir yelpazedeki çeşitli kullanım senaryoları üzerinden AIoT sistemlerinin sağladığı katkı ve verimlilik artışları bilimsel bir bakış açısıyla özetlenmektedir.

1.1. Nesnelerin İnterneti (IoT)

IoT, fiziksel nesnelerin birbirine bağlanması, çevrelerinden veri toplayabilmesi, bu verileri iletebilmesi ve diğer sistemlerle etkileşim kurabilmesi esasına dayanan bir kavramdır. Literatürde 1999'dan itibaren kavramsal bir çerçeve kazanan IoT, günümüzde farklı sektörlerdeki yaygın uygulamalarıyla gündelik yaşamın ve endüstriyel süreçlerin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Berte, 2018; Gubbi et al., 2013). Kendine özgü bir ekosistem oluşturan IoT, hem endüstriyel hem de tüketici pazarlarında geniş bir etki alanına sahip olup, dijital ve fiziksel dünya arasında kesintisiz bir veri ve hizmet akışı üretmektedir (Chakroun et al., 2022; Madakam et al., 2015).

IoT ekosistemi temelde sensörler, veri toplama sistemleri ve ağ bağlantılarından oluşur (Kabalcı et al., 2019). Bu bileşenler sayesinde nesneler fiziksel çevreyi izleyebilir, ham veriyi toplayıp iletebilir ve veri işleme süreçleri aracılığıyla belirli karar mekanizmalarını tetikleyebilir. Örneğin akıllı ev sistemleri, kullanıcıların enerji tüketimini izleyerek optimizasyonu destekler ve ev otomasyonunu daha işlevsel hâle getirir (Li, 2024). Özellikle veri analitiği ve yapay zekâ ile bütünleşen IoT uygulamaları, karmaşık veri akışlarını anlamlandırarak daha güvenilir, uyarlanabilir ve bağlam duyarlı çözümlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (DeMedeiros et al., 2023).

Son yıllardaki çalışmalar, IoT'nin çevre izleme, sağlık hizmetleri, ulaşım, tarım, arıza tespiti ve üretim gibi çok çeşitli alanlara entegre edilebilen kritik bir teknoloji olduğunu ortaya koymaktadır (Awaisi et al., 2020; Elijah et al., 2018; Lodhi et al., 2025; Misra et al., 2018; Jun Zhang et al., 2020). Bu alanlar içinde tarımsal uygulamalar, IoT'nin somut faydalarının belirginleştiği örneklerden biridir. Akıllı sensör teknolojileri ile görüntü işleme sistemlerinin bütünleştirilmesi; gerçek zamanlı zararlı tespiti, otomatik sulama kontrolü ve karar destek mekanizmalarının kurulmasını mümkün kılmakta; böylece verimliliği artırırken sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır (Miller et al., 2025). Benzer biçimde, akıllı tarım senaryoları

üretim süreçlerinin izlenebilirliğini artırarak optimizasyon yaklaşımlarının uygulanmasını kolaylaştırmaktadır (Awaisi et al., 2024).

Sağlık alanında IoT, özellikle Tıbbi Nesnelerin İnterneti (Internet of Medical Things, IoMT) kapsamında; sağlık izleme cihazları ve hasta takip sistemleri gibi uygulamalar üzerinden hizmetlerin etkinliğini artırmaktadır (Joyia et al., 2017; Rajab et al., 2024). IoT tabanlı izleme çözümleri veri toplama ve analiz süreçlerini hızlandırarak hizmet kalitesini iyileştirebilse de, güvenlik ve mahremiyet riskleri bu alanda öne çıkan temel zorluklar arasında yer almaktadır (Ande et al., 2020; Sahu & Mazumdar, 2024).

IoT'nin belirgin etkilerinin gözlendiği bir diğer alan akıllı şehir uygulamalarıdır. Sensör ağları ve veri analitiği aracılığıyla trafik yönetimi, atık yönetimi ve enerji verimliliği gibi konularda iyileştirmeler sağlanmakta; böylece kentlerin daha yaşanabilir ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesi desteklenmektedir (Kamarudin et al., 2023). Akıllı şehir uygulamaları, şehirlerin daha yaşanabilir ve sürdürülebilir hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Ulaşım ve lojistik alanında da IoT uygulamaları önemli ölçüde etkili olmaktadır. Bu teknoloji, taşıma süreçlerini otomatikleştirerek zaman kazanımına ve maliyetlerin azaltılmasına olanak tanımaktadır. Araçların ve taşıma sistemlerinin IoT ile entegre edilmesi, sürdürülebilir bir erişim sağlamaktadır (Dwivedi et al., 2021). Aynı şekilde, çevresel izleme uygulamaları da IoT'nin sağladığı imkanlarla daha etkin bir hale gelmektedir. Sensörler aracılığıyla hava kirliliği, hava durumu ve su kalitesi gibi verilere ulaşarak, çevresel yönetimi geliştirmektedir (Katie, 2024).

Günümüz endüstride IoT, ekipman performansının izlenmesi, arıza risklerinin önceden belirlenmesi ve üretim süreçlerinin daha otonom bir yapıya taşınması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. IoT cihazları endüstriyel süreçleri izlenebilir kılarak optimizasyonu destekler, insan müdahalesini azaltır ve maliyetleri düşürmeye yönelik karar mekanizmalarını güçlendirir. Bu bağlamda endüstriyel IoT uygulamaları, Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial Internet of Things, IIoT) olarak adlandırılan bir alanın gelişimini hızlandırmıştır. Endüstri 4.0 yaklaşımı, imalat süreçlerinde otomasyon ve dijitalleşmeye odaklanırken IIoT, bu dönüşümün temel teknolojilerinden biri olarak konumlanmaktadır (Awaisi et al., 2024; Jamwal et al., 2021).

Bununla birlikte IoT ağları için güvenlik, gizlilik ve veri yönetimi gibi zorlukları da önemli hale gelmiştir. IoT sistemleri yoğun veri akışını yöneten ve analiz eden dağıtık ağlar olarak çalışması saldırılara karşı önlemler alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Sonuç olarak IoT'nin sunduğu inovasyon ve verimlilik fırsatlarını değerlendirirken aynı zamanda güvenliğin

güçlendirilmesi ve veri yönetimini düzenlenmesi gerekmektedir (Sahu & Mazumdar, 2024).

1.2. Nesnelerin Yapay Zekası (AIoT)

IoT'nin hızlı gelişimi ve bağlı cihazların ürettiği verinin hacim, çeşitlilik ve hız bakımından artmasından dolayı IoT sistemlerinin yalnızca veri toplama ve iletimle sınırlı kalmayıp, veriyi işleyerek daha doğru ve kapsamlı kararlar üreten yapılara dönüşmesini gerekli kılmıştır. Bu gereksinim doğrultusunda, IoT ekosistemini veri işleme, analiz ve karar verme yetenekleriyle güçlendirmek amacıyla yapay zekâ (YZ) algoritmalarının IoT sistemlerine entegrasyonu gündeme gelmiştir. IoT tarafından üretilen büyük ölçekli veriler, aynı zamanda YZ modellerinin eğitimi için önemli bir fırsat alanı sunarak akıllı hizmet üretimini hızlandırmaktadır. Yapay zekâ ve IoT'nin bütünleştiği bu yaklaşım, AIoT olarak adlandırılmakta; akıllı elektrik şebekeleri, ulaşım sistemleri ve akıllı şehirler gibi alanlarda dikkat çekici uygulama başarılarıyla rapor edilmektedir (Derawi et al., 2020; Rahman et al., 2023; Shen et al., 2023).

AIoT'nin temel avantajı, YZ algoritmalarının (özellikle derin öğrenme temelli yaklaşımların) IoT verisini eyleme dönüştürülebilir içgörülere çevirerek daha isabetli analiz ve karar üretimini mümkün kılmasıdır. Bununla birlikte, YZ'nin hesaplama maliyeti ve depolama gereksinimi, AIoT sistem tasarımında kritik bir sınırlılık alanı oluşturmaktadır. Bu noktada dağıtık öğrenme yaklaşımları, veriyi ve modelleri farklı uç cihazlara dağıtarak tek bir sistem üzerindeki hesaplama ve depolama baskısını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır (Xu, Seng, Ang, et al., 2024).

AIoT, yapay zekâ teknolojileri ile IoT sistemleri arasında iş birliğine dayalı bir ekosistem olarak değerlendirilebilir. IoT, AIoT'nin altyapısını oluşturarak sensör verilerinin toplanmasını, veri kaynaklarının sürekliliğini ve sistemin uçtan uca işlemlerini sağlar. Yapay zekâ ise bu ekosistemin analiz ve karar verme çekirdeğini oluşturarak büyük veri kümelerinden anlamlı örüntüleri ve potansiyel bilgileri çıkarır. Bu çerçevede AIoT'nin ana mimari kurgusu, IoT temelli veri toplama ve iletişim katmanları üzerine inşa edilmektedir.

Güncel çalışmalar, AIoT çerçevelerinin farklı sensörlerden gelen ham veriyi gelişmiş veri analitiği ve makine öğrenmesi teknikleriyle işleyerek IoT operasyonlarını iyileştirdiğini, süreç verimliliğini ve otomasyonu artırdığını ve kullanıcı deneyimlerini ile operasyonel çıktıları zenginleştirdiğini vurgulamaktadır (Barkani et al., 2024; Knez et al., 2021; Wazid et al., 2021). Bu eğilim, yapay zekâ yeteneklerinin doğrudan uç cihazlara entegre edilmesini de öne çıkarmaktadır. Uçta karar verme, merkezi sistemlere

bağımlılığı azaltarak daha düşük gecikme ve daha yüksek bağlam duyarlılığı sağlayabilmektedir.

AIoT literatüründe öne çıkan bir diğer yönelim, TinyML gibi hafif makine öğrenimi yaklaşımlarının kullanımıdır. Bu yaklaşımlar, düşük güçlü mikrodenetleyiciler üzerinde model çalıştırmayı mümkün kılarak gerçek zamanlı çıkarımı uça gerçekleştirerek gecikme ve enerji tüketimini azaltmaya katkı sunmaktadır (Barkani et al., 2024; Xia & Hu, 2025). Buna ek olarak federatif öğrenme, ham veriyi paylaşmadan merkezi olmayan cihazlar arasında model eğitimi yapılmasını destekleyerek gizlilik ve veri güvenliği açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermiştir (Fu et al., 2024; Jing Zhang & Tao, 2021). AIoT ekosistemi geliştikçe, farklı endüstrilerde sürdürülebilir ve ölçeklenebilir çözümlerde beraberinde gelişmektedir. Bu durum hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için yeni fırsat alanları doğurmaktadır (Adli et al., 2023; Xu, Seng, Smith, et al., 2024; Yan, 2024)

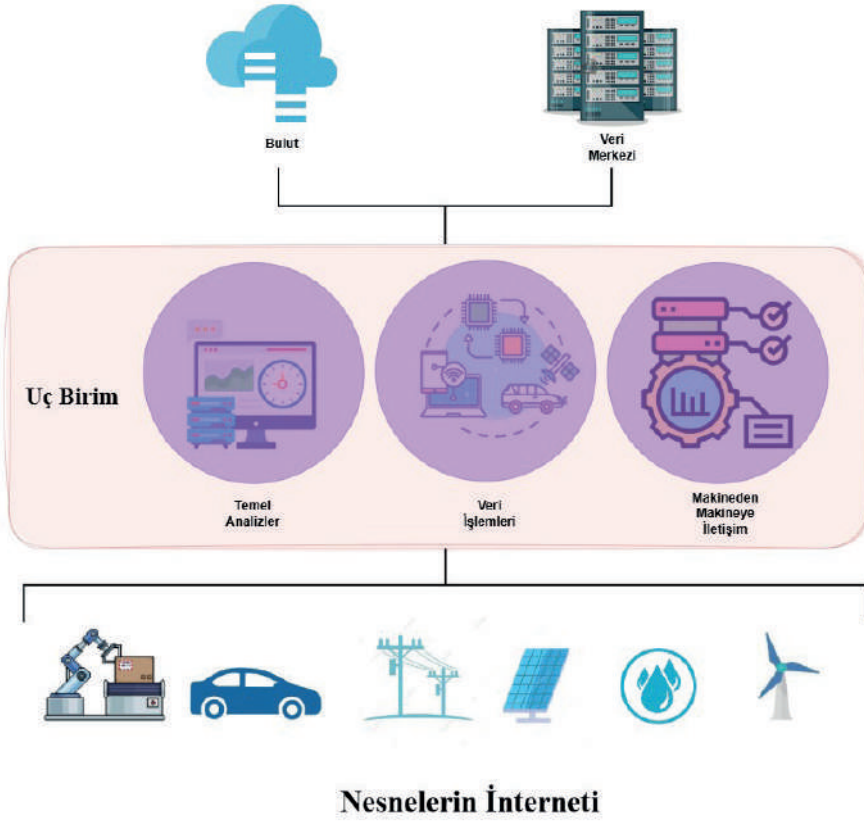
2. IoT Mimarisi

IoT, fiziksel nesnelerin küresel bir ağ üzerinden birbirine bağlanmasını sağlayarak dijital ve fiziksel dünya arasında sürekli bir veri ve hizmet akışı kurar. IoT mimarisinin kavramsal evrimi literatürde genellikle üç temel nesil üzerinden açıklanmaktadır:

Birinci Nesil: etiketli nesneler ve RFID tabanlı tanımlayıcılar ile makineden makineye (M2M) iletişimin öne çıktığı dönem (Khalid, 2021).

İkinci Nesil: iletişimin ve verinin giderek bulut tabanlı hizmetlere taşındığı dönem (Landaluce et al., 2020).

Üçüncü Nesil: bugün yaygın kabul gören Şekil 1'deki gibi üç katmanlı mimarinin yerleştiği dönem (Firouzi et al., 2020; Landaluce et al., 2020).

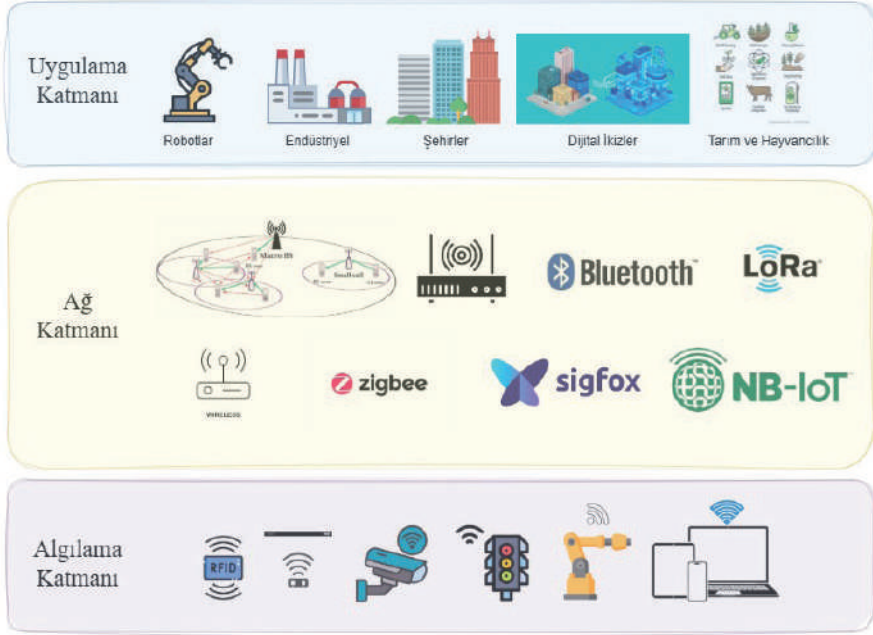


Şekil 1. IoT-Uç mimarisi (IEEE, 2023)

Şekil2’de verilen üç katmanlı mimari, modern IoT sistemlerinin tasarımında yaygın bir referans çerçevesi sunmakta ve aşağıdaki temel katmanlardan oluşmaktadır (Oliveira et al., 2024).

- **Algılama Katmanı:** Fiziksel ortamdan veri toplayan, sensörler, aktüatörler ve tanımlayıcılar gibi temel donanım bileşenlerini içerir. Bu katman, çevresel parametreleri algılayarak ham veriyi dijitalleştirir.
- **Ağ (Network) Katmanı:** Algılama katmanından toplanan verilerin güvenli ve verimli bir şekilde aktarılmasından sorumludur. Çeşitli kablolu/kablosuz teknolojiler ve iletişim protokollerini (TCP/IP, MQTT, CoAP) kapsar ve bilgiyi işleme için bir sonraki katmana yönlendirir.
- **Uygulama (Application) Katmanı:** IoT sisteminin nihai kullanıcıya yönelik hizmetleri sunduğu, veri analizi, işleme, depolama ve karar

verme süreçlerinin uygulandığı katmandır. Bu katman, Akıllı Şehirler, Endüstriyel IoT ve Akıllı Sağlık gibi belirli alanlara özgü uygulamaları barındırır.



Şekil 2. IoT genel mimarisi

Bununla birlikte üç katmanlı mimari, IoT'yi açıklamak için güçlü bir kavramsal çerçeve sunsa da özellikle gecikmeler, artan veri hacmi, bant genişliği sınırlılıkları ve güvenlik/gizlilik gereksinimleri gibi operasyonel zorluklar nedeni ile bilgi işlemin nerede yapılacağı önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda bulut bilişim (cloud computing) ve uç bilişim (edge computing), IoT mimarisi içinde birbirini tamamlayan iki kritik yaklaşım olarak öne çıkar. Bulut bilişim, veri depolama, işleme ve analiz hizmetlerini internet üzerinden ölçeklenebilir biçimde sunarak büyük miktardaki verinin merkezi sunucularda yönetilmesini mümkün kılar. Ancak özellikle gerçek zamanlı yanıt gerektiren senaryolarda gecikme ve ağ kaynaklarına bağımlılık gibi sınırlılıklar gösterebilir (Jing Zhang & Tao, 2021). Bu noktada, uç bilişim devreye girer; verilerin üretildiği yerde, yani nesnelerin kenarında işlenmesini sağlayarak yanıt sürelerini azaltır ve ağ trafiğini minimize eder (Mali & Raghuwanshi, 2024). Uç bilişim ise verinin üretildiği noktaya yakın yerde işlenmesini sağlayarak yanıt süresini düşürür, ağ trafiğini azaltır ve yerinde analiz sayesinde hızlı karar üretimini destekler (Sarkar & Misra, 2016).

Bulut-uç ilişkisi çoğunlukla tamamlayıcı bir iş bölümü çerçevesinde ele alınır. Bulut katmanı yüksek hesaplama gücü ve kapsamlı depolama kapasitesi sağlarken, uç katmanı gecikmeye duyarlı çıkarım ve hızlı kontrol kararlarını yerel düzeyde mümkün kılar. Uç tarafında yapılan ön işleme ve filtreleme ile yalnızca kritik/özet bilgilerin buluta iletilmesi, bant genişliğinin daha verimli kullanılmasına katkı sağlayabilir (Soumak, 2024). Bu bütünleşik yaklaşım; performans (düşük gecikme), verimlilik (azalan ağ yükü) ve belirli senaryolarda gizlilik avantajları gibi kazanımlar sunarken, IoT sistemlerinin daha güvenli ve etkili biçimde tasarlanmasını da destekler (Gebremichael et al., 2020). Dolayısıyla bulut ve uç bilişim, IoT uygulamalarında verinin akıllıca işlenmesi ve gerçek zamanlı kararların uygulanabilirliği açısından mimari tasarımın temel belirleyicileri arasında yer almaktadır (Toral et al., 2023).

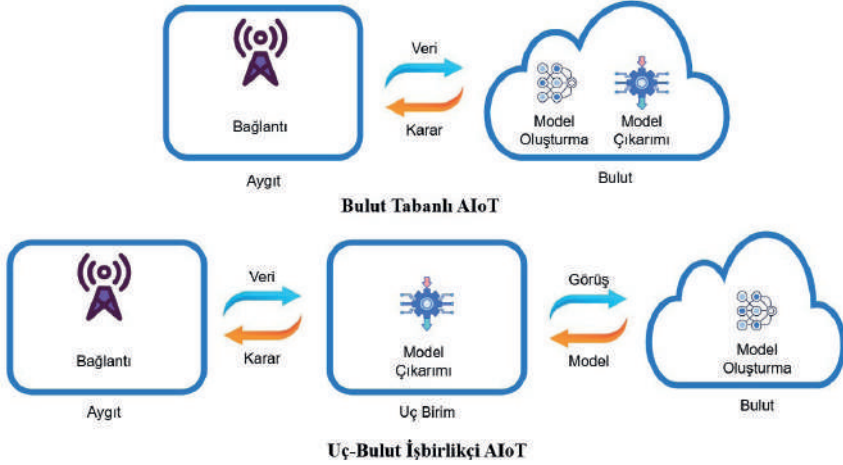
3. AIoT Mimarisi

IoT uygulamalarının evriminde, uygun maliyetli ancak işlem gücü yüksek uç donanımların (mikrodenetleyici tabanlı cihazlar ve tek kartlı bilgisayarlar) yaygınlaşması kritik bir dönüm noktasıdır. Bu donanımlar, belirli yapay zekâ (YZ) algoritmalarını çalıştırabilecek kapasiteye ulaşarak, AIoT'nin merkezinde yer alan uçta (edge) hesaplama yaklaşımını uygulanabilir hâle getirmiştir. Böylece AIoT mimarileri, yalnızca veriyi toplamak ve iletmekle sınırlı kalmayıp; veriyi uçta ön işleyen, çıkarım (inference) üreten ve gerektiğinde bulut ile iş birliği yapan katmanlı yapılara dönüşmüştür. AIoT mimarisi, işlevsel olarak üç tamamlayıcı katman üzerinden ele alınabilir:

- **Akıllı Algılama Katmanı (Edge-Endpoint AI):** Bu katmanda YZ, algılanan veriler üzerinde yerel düzeyde ön işleme, gürültü azaltma, özellik çıkarımı ve belirli senaryolarda temel sınıflandırma gibi işlemleri yürütür. Kaynak kısıtlı cihazlarda makine öğrenmesi işlevlerini mümkün kılan TinyML yaklaşımı, bu katmanda önemli bir ivme kazandırmıştır. TinyML, sıkıştırılmış ve optimize edilmiş modeller aracılığıyla düşük güç tüketimiyle hızlı çıkarım yapılmasını destekleyerek cihazların anlık karar üretebilmesini sağlar.
- **Akıllı Ağ ve Uç Katmanı (Edge AI):** Ağ katmanına yakın konumlandırılan uç düğümler, algılama katmanından gelen veriler üzerinde daha karmaşık çıkarım modellerini çalıştırır ve gecikmeye duyarlı uygulamalarda gerçek zamanlı karar üretiminin ana yükünü üstlenir. Bu düzeyde YZ; ağ trafiği optimizasyonu, kaynak yönetimi, hizmet sürekliliği ve güvenlik ihlallerinin tespiti gibi fonksiyonlarda da etkin rol oynar.

- Akıllı Uygulama ve Bulut Katmanı (Cloud AI): Bu katman, sistemin küresel optimizasyonu ve model yaşam döngüsü yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Uçtan iletilen özetlenmiş veya kritik veriler, bulutta daha büyük ölçekli modellerin eğitimi ve güncellenmesinde kullanılır. Bulut, kapsamlı öngörüselsel analizler ve uzun vadeli iş zekâsı üretirken; güncellenen modellerin yeniden uç düğümlere dağıtılması, AIoT sisteminin performansının sürekli iyileştirilmesini mümkün kılar.

AIoT altyapıları, yapay zekâ modelinin oluşturulması ve yönetimi, IoT cihaz bağlantısı, ağ iletişimi ve veri işleme/hesaplama stratejileri gibi tasarım zorlukları bağlamında bulut tabanlı AIoT ve uç-bulut iş birliğine dayalı AIoT olmak üzere iki temel kullanım altında sınıflandırılmaktadır: (Rong & Cheng, 2021). Bu iki yaklaşım Şekil 3'de özetlenmektedir.



Şekil 3. AIoT'nin iki farklı kullanımı (Rong & Cheng, 2021).

3.1. Bulut Tabanlı AIoT

Bulut tabanlı YZ ve IoT, günümüzde birçok sektörde önemli dönüşümlere neden olan iki başlıca teknolojidir. Bulut bilişim, büyük miktardaki verileri depolama, analiz etme ve işleme yeteneği sunarken, bu verilerin merkezileştirilmiş sunucular aracılığıyla erişilmesini ve analiz edilmesini sağlar. AIoT ise bulut teknolojisini kullanarak, uç cihazlara hem yerel hem de merkezi olarak depolanan bilgilere dayanarak bağımsız kararlar alabilme yeteneğini kazanır. Ayrıca bu cihazlar, ağ üzerindeki diğer bağlı sistemlerde belirli iş akışlarını tetikleme ve başlatma yetkisine sahiptir. Toplanan veriler,

güçlü ve esnek bilgi işlem ile depolama kapasitelerine sahip bulut sunucularına iletilir ve bu sunucular, makine öğrenimi modellerinin hem eğitimi hem de doğrulanması için temel platformu sağlar (Rong & Cheng, 2021).

Ancak, bu bulut temelli mimari, günümüzün ağ ve IoT cihazları tarafından üretilen hızla artan veri hacmi (Yu et al., 2017) ile birlikte, cihazlar ile uzak bulut platformu arasındaki ağ kısıtlılıkları ve iletişim gecikmeleri (Preamsankar et al., 2018) gibi ciddi zorluklarla karşı karşıyadır. Bu engellere rağmen, bulut tabanlı AIoT çözümlerinin sağladığı ölçeklenebilirlik, operasyonel esneklik ve kolay entegrasyon kabiliyetleri, akıllı uygulamaların gelecekteki gelişiminin temelini oluşturmaktadır. İşletmeler için bu mimari, üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra, erişim kontrol sistemlerini tehdit seviyelerine göre hızla genişletme veya yeniden yapılandırma esnekliği sunarak çevik ve hızlı yanıt verme ihtiyacını karşılamaktadır (Matin et al., 2023).

3.2. Uç-Bulut İş Birliğine Dayalı AIoT

Uç ve bulut iş birliğine dayalı AIoT bilişim modeli, yapay zekâ çıkarım süreçlerini doğrudan IoT cihazlarının içine entegre edilmiş uç bilişim katmanına taşıyarak önemli bir dönüşüm sağlar. Bu yaklaşım sayesinde, tüm ham verinin analiz ve işleme için uzak buluta gönderilmesi yerine, büyük bir kısmı yerel olarak çözümlenebilir. Bulut tabanlı AIoT sistemlerinin karşılaştığı zorluklar, bu işbirlikçi uç-bulut mimarisi aracılığıyla hafifletilebilir. Sonuç olarak, uç bilişim altyapısı gelişmiş yapay zekâ modellerini kullanarak hız, yüksek güvenilirlik, düşük gecikme süresi ve artırılmış kapasite gibi avantajlar sunar. Ancak, bu modellerin eğitimi için gereken yoğun hesaplama gücü nedeniyle, geleneksel bulut bilişim hâlâ vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Sensör donanımlı geleneksel ekipmanlardan kaynaklanan devasa veri kütleleri bulut veri tabanlarında depolanır; ne var ki, depolanan bu büyük hacimli veriyi organize edip anlamlı bilgiye dönüştürmek önemli bir güçlük teşkil eder. Endüstrinin ekonomik açıdan sürdürülebilir bir üretim için yapay zekâ yeteneklerine sahip olmasını sağlamak amacıyla, AIoT özellikli altyapının bu büyük veri tabanlarıyla kesintisiz bir şekilde bağlantı kurması zorunludur. Gerçek zamanlı üretim ortamlarında AIoT sistemlerini etkin bir şekilde kullanabilmek için, cihaz-sensör-depolama ve bunun tersi arasındaki sürekli iletişimi ve veri tabanlarına erişimi destekleyecek sağlam bir ağ altyapısına ihtiyaç vardır (Matin et al., 2023).

4. AIoT Uygulama Alanları ve Kullanım Senaryoları

Endüstriler ile akıllı evler, ulaşım, eğitim ve sağlık gibi alanlar için geliştirilmiş çok sayıda IoT uygulaması son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu

çerçevede akıllı fabrika yaklaşımı; makinelerin ya da endüstriyel ekipmanların, çalışma durumlarını algılayıp sürekli izleyebilen sensörler ve akıllı cihazlarla donatılmasıyla tanımlanır. Söz konusu makineler altyapıya veya merkezi bir kontrol platformuna entegre edilerek, bilgiye ve kontrol işlevlerine gerçek zamanlı erişim mümkün hâle gelir. Endüstriyel bağlamdaki AIoT çözümleri; üretkenliği artırma, operasyonları anlık olarak yönetebilme, verimlilik sağlama ve ürün kalitesini iyileştirme gibi çıktılar sunar.

Endüstride AIoT'nin kullanım alanları oldukça genişir: tahmine dayalı bakım, izleme-yönetim süreçleri, uzaktan izleme, kalite denetimi, enerji yönetimi ile iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları bu başlıklar arasında sayılabilir. Bu çözümler, makinelerin durumunu anlık izleyen ve yönetim/denetim kararlarını destekleyen kontrol sistemleri oluşturur. Farklı sensörlerden elde edilen veriler toplanır ve analiz edilerek daha ileri düzey kestirim ve analitik süreçlerinde değerlendirilir. Makine arızaları veya karmaşık operasyonel problemler ise envanter takibi, ekipman ve cihazların birbirine bağlanması gibi izleme tabanlı uygulamalarla daha sistematik biçimde ele alınabilir. Enerji yönetimi de AIoT'nin öne çıkan kullanım alanlarından biridir; enerji tüketiminin izlendiği endüstrilerde, veri modellerinin analiz edilmesiyle kullanımın optimize edilmesi, dağıtımın iyileştirilmesi ve akıllı yönetim senaryolarının geliştirilmesi hedeflenir. Benzer şekilde, üretimde kalite yönetimi; farklı aşamalardan elde edilen verilerin düzenli biçimde toplanması ve işlenmesi sayesinde daha izlenebilir ve yönetilebilir hâle gelir. Tedarik zinciri optimizasyonunda ise sevkiyatların izlenmesi ile sıcaklık ve nem gibi çevresel koşulların takibi için AIoT tabanlı uygulamalardan yararlanılmaktadır (Naseer Qureshi & Newe, n.d.).

Akıllı evlere yönelik AIoT uygulamaları; aydınlatmanın yönetimi, güvenlik kameraları, ev aletlerinin kontrolü, enerji yönetimi ve güvenlik denetimi gibi alanlarda gerçek zamanlı otomasyon ve kontrol imkânları sunar. Bu kapsamda kullanıcılar, akıllı telefon ve benzeri mobil cihazlar üzerinden evdeki sistemlere uzaktan erişerek cihazları izleyebilir ve yönetebilir. Akıllı ev ekosisteminde öne çıkan IoT/AIoT kullanım alanları arasında özellikle enerji kontrolü ve yönetimi, akıllı ölçüm ile güvenlik kontrol sistemleri yer almaktadır.

IoT tabanlı güvenlik çözümleri; erişimi ve olası riskleri yönetebilmek amacıyla hareket sensörleri, kameralar, kapı-pencere sensörleri ve akıllı kilit bileşenlerini bütünleşik bir yapıda bir araya getirir. Enerji yönetimine odaklanan uygulamalar ise merkezi ısıtma veya klima sistemlerinde sıcaklık parametrelerinin izlenmesi ve ayarlanması yoluyla enerji tüketiminin kontrol edilmesine ve daha verimli kullanım senaryolarının oluşturulmasına

katkı sağlar. Benzer biçimde akıllı aydınlatma sistemleri; zamanlama, kullanıcı tercihleri veya hareket algılama verileri gibi girdileri kullanarak ışıklandırmayı otomatikleştirebilir ve yönetebilir. Bu tür stratejiler, enerji maliyetlerini düşürmeye yardımcı olurken aynı zamanda istenen atmosferin oluşturulmasını destekler ve kullanıcı konforunu artırır.

Akıllı evlerde AIOt'ye örnek gösterilebilecek bir diğer yaklaşım da sesli asistanların kullanımıdır. Amazon Alexa veya Apple Siri gibi sistemler, ev termostatu ve sıcaklık gibi değişkenlerin sesli komutlarla kontrol edilmesine olanak tanıyarak ev içi etkileşimi daha pratik hâle getirir (Naseer Qureshi & Newe, n.d.).

IoT ağlarında yapay zekâdan yararlanılması; sunduğu çok yönlü faydalar, mevcut hizmetleri zenginleştirilmesi ve operasyonel verimliliği artırması nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır. Yapay zekâ, IoT ekosisteminin güvenilirliğini, akıllı karar üretme kapasitesini ve verimliliğini yükselterek verinin yerel (uç) düzeyde işlenmesini, analiz edilmesini ve belirli durumlarda otomatik kararların alınmasını mümkün kılar. AIOt uygulamalarının öne çıkan kullanım biçimleri aşağıda özetlenmiştir:

- **Veri Analitiği:** AIOt cihazları çok büyük hacimde veri üretir ve bu verinin anlamlı çıktılara dönüşmesi için analiz edilmesi gerekir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi, sensör verileri üzerinde örüntü, anomali ve eğilimleri belirleyerek sistemin “ne oluyor?” sorusuna yanıt vermesini sağlar; ayrıca farklı sensörlerden gelen verileri birleştirerek bağlamı zenginleştirebilir. Bu sayede olası arızalar erken fark edilir, süreç performansı izlenir ve karar vericilere operasyonu iyileştirmeye dönük somut içgörüler sunulur.
- **Karar Verme:** AI yöntemleri, uç ve bulut bilişim altyapılarıyla bütünleşmiş IoT cihazlarından gelen verileri kullanarak gerçek zamanlı karar desteği veya otomatik aksiyon üretir. Kritik ve düşük gecikme gerektiren durumlarda uç tarafta hızlı değerlendirme yapılırken, daha karmaşık senaryolarda bulut tarafında bağlamsal analiz ve politika güncellemeleri yürütülebilir. Böylece kontrol süreçleri daha çevik hâle gelir, karar kalitesi artar ve insan müdahalesi gerektiren durumlar daha doğru şekilde ayrıştırılabilir.
- **Tahmin Süreçleri:** AIOt, ekipmanların çalışma durumunu ve arıza olasılığını erken öngörmek için sensör verilerinden yararlanır. Makine öğrenmesi modelleri zaman serisi verilerindeki değişimleri izleyerek bozulma işaretlerini tanımlar, arıza gerçekleşmeden önce risk düzeyini ortaya koyar ve bakımın planlı şekilde yapılmasına imkân verir. Bu

yaklaşım plansız duruş sürelerini azaltır, üretim sürekliliğini güçlendirir ve bakım kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkı sağlar.

- **Enerji Yönetimi:** AİoT tabanlı enerji yönetimi, tüketim verilerini ve kullanım alışkanlıklarını analiz ederek enerji kullanımını dinamik biçimde ayarlamayı hedefler. Sistem; talep artışı, tarife değişimi veya çevresel koşullar gibi girdileri dikkate alarak yük dengeleme, pik saatlerde tüketimi azaltma ve kullanım senaryolarını optimize etme gibi stratejiler üretebilir. Böylece enerji tasarrufu sağlanır, maliyetler düşer ve enerji yönetimi daha ölçülebilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşur.
- **Güvenlik Uygulamaları:** Yapay zekâ, İoT ağlarında hem ağ trafiğini hem de cihaz davranışlarını izleyerek olağandışı etkinlikleri gerçek zamanlı tespit etmeye yardımcı olur. Anomali algılama ve davranış profillemeye yaklaşımlarıyla yetkisiz erişim, şüpheli veri akışı veya beklenmedik cihaz eylemleri erken belirlenebilir; gerekli durumlarda uyarı üretme, erişimi sınırlandırma veya cihazı izole etme gibi önleyici adımlar devreye alınabilir. Bu sayede güvenlik olaylarının etkisi azaltılır ve sistem dayanıklılığı artırılır.
- **Dil İşleme:** Doğal dil işleme (NLP) uygulamaları, AİoT cihazlarının kullanıcılarla sesli komutlar veya yazılı metin üzerinden daha sezgisel etkileşim kurmasını sağlar. Komutları yalnızca tanımakla kalmayıp niyet çıkarımı yaparak doğru eylemlere dönüştürür, gerektiğinde açıklayıcı geri bildirim vererek kullanım kolaylığını artırır. Böylece kullanıcı deneyimi iyileşir, erişilebilirlik genişler ve cihazların yönetimi daha pratik hâle gelir.
- **Akıllı Ev Yönetimi:** Aİ tabanlı akıllı ev uygulamaları, kullanıcının tercihlerini ve rutinlerini öğrenerek ısıtma-soğutma, aydınlatma ve cihaz kontrolünü kişiselleştirilmiş otomasyonla yönetir. Sensör verileri (hareket, ortam koşulları, enerji tüketimi gibi) davranışsal bilgilerle birleştirildiğinde, evin farklı zamanlarda farklı ihtiyaçlara göre uyarlanması mümkün olur. Bu yaklaşım hem konforu artırır hem de kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlar.
- **Trafik ve Park Yönetimi:** Yapay zekâ destekli AİoT çözümleri, GPS, kamera ve yol sensörleri gibi çoklu veri kaynaklarını kullanarak trafik akışını optimize etmeyi amaçlar. Yoğunluk tahmini, olası sıkışıklık noktalarının önceden belirlenmesi ve yönlendirme önerileriyle sürüş süreleri azaltılabilir; park tarafında doluluk tahmini ve uygun park

alanına yönlendirme gibi uygulamalar geliştirilebilir. Böylece kentsel hareketlilik daha verimli yönetilir ve trafik kaynaklı kayıplar azaltılır.

- **Akıllı Sağlık Hizmetleri:** AIoT, hastaların vücut ısısı, kalp atış hızı ve hareket gibi yaşamsal göstergelerini sürekli izleyerek erken uyarı ve uzaktan takip imkânı sunar. Toplanan veriler analiz edilerek riskli sapmalar belirlenebilir ve acil durumlarda sağlık profesyonellerine zamanında bildirim gönderilebilir. Bu yaklaşım, özellikle kronik hastalık takibi ve evde bakım senaryolarında erken müdahaleyi destekleyerek sağlık hizmetlerinin sürekliliğini güçlendirir.
- **Çevresel İzleme:** IoT sensörleri yapay zekâ ile entegre edildiğinde su kalitesi, hava koşulları ve hava kalitesi gibi çevresel değişkenler daha sürekli ve anlamlı biçimde izlenebilir. AI modelleri, yalnızca mevcut durumu raporlamakla kalmayıp çevresel değişimlerin eğilimlerini ortaya çıkarabilir, risk göstergelerini erken saptayabilir ve olası afet/kirlilik senaryolarına yönelik karar desteği üretebilir. Bu sayede çevresel yönetim, erken uyarı ve kaynak planlaması daha etkin hâle gelir.
- **Dijital İkiz (Digital Twin):** AIoT'nin öne çıkan kullanım biçimlerinden biri, fiziksel varlıkların (makine, üretim hattı, bina veya altyapı bileşenleri) sensör verileriyle sürekli güncellenen sanal bir temsilinin oluşturulmasıdır. Dijital ikiz yaklaşımı, sistemin mevcut durumunu izlemekle sınırlı kalmayıp farklı senaryoların simüle edilmesine olanak tanır; böylece ayar değişikliklerinin olası sonuçları önceden değerlendirilebilir, süreç iyileştirmeleri daha güvenli biçimde test edilebilir ve bakım/kapasite planlama kararları daha rasyonel bir zemine taşınabilir. Bu kullanım biçimi, arıza riskini azaltma, verimlilik artırma ve operasyonel kararların doğruluğunu yükseltme açısından AIoT ekosistemine stratejik bir katkı sunar.
- **Görsel Denetim ve Uçta Görüntü İşleme:** Kamera tabanlı AIoT çözümleri, sensör verilerinin tek başına yakalayamayacağı görsel ipuçlarını kullanarak kalite kontrol, güvenlik ve süreç izleme görevlerini güçlendirir. Uçta çalışan görüntü işleme modelleri; yüzey kusuru, montaj hatası, yanlış ürün sınıflaması veya güvenlik ihlali gibi durumları gerçek zamanlı tespit ederek üretim hattında hızlı müdahaleyi mümkün kılar. Ayrıca görsel verinin yerinde işlenmesi, gecikmeyi azaltırken veri taşınmasını sınırlayarak bant genişliği ve mahremiyet açısından da avantaj sağlayabilir.
- **Otonom Robotlar ve AMR Filoları:** Depo, lojistik ve üretim ortamlarında otonom mobil robotlar (AMR) ve robot filoları,

AIoT altyapısı ile entegre edildiğinde görev atama, rota planlama, çarpışma önleme ve dinamik iş akışı düzenleme gibi işlevleri daha etkin biçimde yürütebilir. Sensörler ve konum verileri üzerinden anlık durum farkındalığı oluşturulması, filonun darboğazlara göre yeniden yönlendirilmesini ve kaynakların daha dengeli kullanılmasını sağlar. Böylece hem operasyon sürekliliği güçlenir hem de insan gücüyle yürütülen tekrar eden süreçlerde verimlilik artışı elde edilebilir.

- **İş Sağlığı ve Güvenliği için Önleyici Analitik:** AIoT, iş sağlığı ve güvenliği alanında giyilebilir sensörler, ortam sensörleri ve gerektiğinde kamera verilerini birleştirerek riskleri oluşmadan önce belirlemeye yardımcı olabilir. Tehlikeli bölgeye yaklaşma, uygunsuz duruş/ergonomi, aşırı yorgunluk göstergeleri veya ortamda gaz/ısı gibi risk faktörleri gerçek zamanlı izlenerek erken uyarı mekanizmaları devreye alınabilir. Bu yaklaşım, güvenlik kültürünü desteklerken iş kazalarının azaltılmasına ve sahada proaktif risk yönetimi yapılmasına katkı sağlar.
- **Karbon Muhasebesi ve Sürdürülebilirlik Optimizasyonu:** AIoT uygulamaları enerji tüketimini izlemekle sınırlı kalmayıp süreç bazlı emisyon hesaplamaları ve sürdürülebilirlik performansının yönetimi için de kullanılabilir. Üretim, bina yönetimi veya lojistik süreçlerinden gelen tüketim verileri emisyon faktörleriyle eşleştirilerek karbon ayak izi daha doğru izlenebilir; ayrıca optimizasyon algoritmalarıyla kaynak kullanımı iyileştirilerek azaltım senaryoları geliştirilebilir. Böylece sürdürülebilirlik hedefleri ölçülebilir göstergeler üzerinden izlenir ve kurumsal raporlama süreçleri daha tutarlı hâle gelir.
- **Tarım ve Su Yönetimi için AIoT (Hassas Tarım):** Tarımda AIoT uygulamaları; toprak nemi, hava durumu, bitki gelişim verileri ve görüntü tabanlı göstergeleri bir araya getirerek sulama zamanlaması ve miktarının daha isabetli belirlenmesini sağlar. Yapay zekâ, bitki stresini erken saptayarak su kullanımını optimize edebilir, verim kaybını azaltmaya dönük karar desteği üretebilir ve kaynak yönetimini güçlendirebilir. Bu kullanım biçimi, özellikle su kıtlığı ve iklim değişkenliği koşullarında sürdürülebilir tarım uygulamalarının veri temelli şekilde planlanmasına katkı sunar.

5. Sonuç

Bu bölümde IoT genel hatlarıyla açıklanmış ve temel mimarisi ortaya konulmuştur. IoT den yola çıkarak çok yaygın kullanılan YZ teknolojisi ile AIoT mimarisinin nasıl birleştiği hem genel hatları ile hem de mimari

kullanımları ile açıklanmıştır. AIoT alanında yapılan son çalışmalar ve temel uygulamalı kısaca verilerek bu alanda çalışma yapacaklara bir yol haritası oluşturulmaya çalışılmıştır. Özellikle bulut bilişimin büyük ölçekli depolama ve analiz kapasitesiyle merkezi bir rol üstlenirken, uç bilişim gecikmeye duyarlı senaryolarda yerinde işlemeyi mümkün kılarak yanıt süresini azaltmakta ve ağ yükünü düşürdüğü vurgulanmıştır. Günümüzde akıllı şehirler, akıllı tarım, akıllı ulaşım, akıllı fabrikalar ve sağlık gibi temel alanlarda yaygın kullanılan AIoT teknolojileri iş sağlığı, sürdürülebilirlik ve uçta görüntü işleme gibi yeni uygulama alanlarında önemli bir teknoloji olacağı düşünülmektedir. Ayrıca dijital ikiz konusunda AIoT teknolojisinin kilit rol oynayacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

- Adli, H. K., Remli, M. A., Wong, K. N. S. W. S., Ismail, N. A., González-Bri-
ones, A., Corchado, J. M., & Mohamad, M. S. (2023). Recent Advan-
cements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A
Review. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s23073752>
- Ande, R., Adebisi, B., Hammoudeh, M., & Saleem, J. (2020). Internet of Thin-
gs: Evolution and Technologies From a Security Perspective. In *Sustai-
nable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101728>
- Awaisi, K. S., Hussain, S., Ahmed, M., Khan, A. A., & Ahmed, G. (2020). Le-
veraging IoT and fog computing in healthcare systems. *IEEE Internet of
Things Magazine*, 3(2), 52–56.
- Awaisi, K. S., Ye, Q., & Sampalli, S. (2024). A Survey of Industrial AIoT:
Opportunities, Challenges, and Directions. *IEEE Access*, 12(July 2024),
96946–96996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3426279>
- Barkani, M. El, Benamar, N., Talei, H., & Bagaa, M. (2024). Gas Leaka-
ge Detection Using Tiny Machine Learning. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics13234768>
- Berte, D.-R. (2018). Defining the IoT. In *Proceedings of the International Con-
ference on Business Excellence*. <https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0013>
- Chakroun, M., Sayah, J., Kallab, C., & Haddad, S. (2022). Internet of Things:
Towards a Solid Ecosystem of Interconnected Things. In *Advances in In-
ternet of Things*. <https://doi.org/10.4236/ait.2022.123004>
- DeMedeiros, K., Hendawi, A., & Álvarez, M. (2023). A Survey of AI-Based
Anomaly Detection in IoT and Sensor Networks. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s23031352>
- Derawi, M., Dalveren, Y., & Cheikh, F. A. (2020). Internet-of-Things-Based
Smart Transportation Systems for Safer Roads. *2020 IEEE 6th World
Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT48130.2020.9221208>
- Dwivedi, S. K., Roy, P., Karda, C., Agrawal, S., & Amin, R. (2021). Block-
chain-Based Internet of Things and Industrial IoT: A Comprehen-
sive Survey. In *Security and Communication Networks*. <https://doi.org/10.1155/2021/7142048>
- Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. H. D.
N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics
in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*,
5(5), 3758–3773.
- Firouzi, F., Nassif, S., & Chakrabarty, K. (2020). *Intelligent internet of things*.
- Fu, S., Dong, F., Shen, D., Chen, R., & Hao, J. (2024). DESIGN: Online De-
vice Selection and Edge Association for Federated Synergy Learning-E-

- nabled AIoT. In *Acm Transactions on Intelligent Systems and Technology*. <https://doi.org/10.1145/3673237>
- Gebremichael, T., Ledwaba, L. P. I., Eldefrawy, M. H., Hancke, G. P., Pereira, N., Gidlund, M., & Åkerberg, J. (2020). Security and Privacy in the Industrial Internet of Things: Current Standards and Future Challenges. In *Ieee Access*. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3016937>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. In *Future Generation Computer Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- IEEE. (2023). *Real-Life Use Cases for Edge Computing*. IEEE Innovation at Work. <https://innovationatwork.ieee.org/real-life-edge-computing-use-cases/>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, 11(12), 5725.
- Joyia, G. J., Liaqat, R. M., Farooq, A., & Rehman, S. (2017). Internet of medical things (IoMT): Applications, benefits and future challenges in health-care domain. *J. Commun.*, 12(4), 240–247.
- Kabalci, Y., Kabalci, E., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., & Blaabjerg, F. (2019). Internet of Things Applications as Energy Internet in Smart Grids and Smart Environments. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics8090972>
- Kamarudin, I. E., Ameen, M. A., Razak, M. F. A., & Zabidi, A. (2023). Integrating Edge Computing and Software Defined Networking in Internet of Things: A Systematic Review. In *Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics*. <https://doi.org/10.52866/ijcsm.2023.04.04.011>
- Katie, B. (2024). Internet of Things (IoT) for Environmental Monitoring. In *International Journal of Computing and Engineering*. <https://doi.org/10.47941/ijce.2139>
- Khalid, S. J. (2021). Internet of Robotic Things: A Review. In *Journal of Applied Science and Technology Trends*. <https://doi.org/10.38094/jastt203104>
- Knez, T., Machidon, O., & Pejović, V. (2021). Self-Adaptive Approximate Mobile Deep Learning. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics10232958>
- Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A Review of IoT Sensing Applications and Challenges Using RFID and Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 20(9). <https://doi.org/10.3390/s20092495>
- Li, J. (2024). Visual Perception and Deep Learning in Smart Homes and the Internet of Things. In *Highlights in Science Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.54097/bcvmxs60>

- Lodhi, E., Liu, X., Xiong, G., Khan, M. A., Lodhi, Z., Nawaz, T., Dilawar, A., Tarkoma, S., & Wang, F. (2025). SmartPV-AIoT: an AIoT-integrated framework for fault diagnosis and remote monitoring in photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management: X*, 27(June), 101117. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101117>
- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. In *Journal of Computer and Communications*. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Mali, P., & Raghuwanshi, P. P. (2024). A Review on Intrusion Detection in IoT Networks: Existing Challenges. In *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. <https://doi.org/10.55041/ijrem28454>
- Matin, A., Islam, M. R., Wang, X., Huo, H., & Xu, G. (2023). AIoT for sustainable manufacturing: Overview, challenges, and opportunities. *Internet of Things (Netherlands)*, 24(August), 100901. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100901>
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durluk, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
- Misra, D., Das, G., Chakraborty, T., & Das, D. (2018). An IoT-based waste management system monitored by cloud. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1574–1582.
- Naseer Qureshi, K., & Newe, T. (n.d.). *Artificial Intelligence of Things (AIoT): New Standards, Technologies and Communication Systems*.
- Oliveira, F., Costa, D. G., Assis, F., & Silva, I. (2024). Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing and machine learning. *Internet of Things (Netherlands)*, 26(November 2023), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101153>
- PremSankar, G., Di Francesco, M., & Taleb, T. (2018). Edge Computing for the Internet of Things: A Case Study. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 1275–1284. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2805263>
- Rahman, M. A., Hossain, M. S., Showail, A. J., Alrajeh, N. A., & Ghoneim, A. (2023). AI-Enabled IIoT for Live Smart City Event Monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 2872–2880. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3109435>
- Rajab, R. M., Abuhmida, M., Wilson, I., & Ward, R. (2024). A Review of IoMT Security and Privacy Related Frameworks. In *European Conference on Cyber Warfare and Security*. <https://doi.org/10.34190/eccws.23.1.2239>
- Rong, H., & Cheng, T. (2021). Research and Control of Underground Pressure Law of Coal Mining Face in Soft Rock Strata Based on Neural Network

- under the Background of Wireless Network Communication. *Mobile Information Systems*, 2021(1), 6560713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/6560713>
- Sahu, S. K., & Mazumdar, K. (2024). Exploring Security Threats and Solutions Techniques for Internet of Things (IoT): From Vulnerabilities to Vigilance. In *Frontiers in Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1397480>
- Sarkar, S., & Misra, S. (2016). Theoretical Modelling of Fog Computing: A Green Computing Paradigm to Support IoT Applications. In *Iet Networks*. <https://doi.org/10.1049/iet-net.2015.0034>
- Shen, L., Wang, F., Zhang, M., Liu, J., Liu, G., & Fan, X. (2023). AIoT-Empowered Smart Grid Energy Management with Distributed Control and Non-Intrusive Load Monitoring. *2023 IEEE/ACM 31st International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/IWQoS57198.2023.10188781>
- Soumak, D. (2024). A Comparative Analysis of Cloud Computing and Fog Computing: Advancing Towards Edge Intelligence. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i01.12569>
- Toral, I. M., Calvo, I., Xenakis, J., Artetxe, E., & Barambones, Ó. (2023). Architecture for Smart Buildings Based on Fuzzy Logic and the OpenFog Standard. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics12244889>
- Wazid, M., Das, A. K., & Park, Y. (2021). Blockchain-Envisioned Secure Authentication Approach in AIoT: Applications, Challenges, and Future Research. In *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2021/3866006>
- Xia, P., & Hu, F. (2025). Artificial Intelligence of Things Induced Predictive Maintenance of Computer Numerical Control Machine. In *Internet Technology Letters*. <https://doi.org/10.1002/itl2.70082>
- Xu, H., Seng, K. P., Ang, L. M., & Smith, J. (2024). Decentralized and Distributed Learning for AIoT: A Comprehensive Review, Emerging Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 12, 101016–101052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3422211>
- Xu, H., Seng, K. P., Smith, J. S., & Ang, L.-M. (2024). Multi-Level Split Federated Learning for Large-Scale AIoT System Based on Smart Cities. In *Future Internet*. <https://doi.org/10.3390/fi16030082>
- Yan, J. (2024). AIoT in Smart Homes: Challenges, Strategic Solutions, and Future Directions. In *Highlights in Science Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.54097/8hzgaf51>

- Yu, W., Liang, F., He, X., Hatcher, W. G., Lu, C., Lin, J., & Yang, X. (2017). A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 6900 – 6919. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2778504>
- Zhang, Jing, & Tao, D. (2021). Empowering Things With Intelligence: A Survey of the Progress, Challenges, and Opportunities in Artificial Intelligence of Things. In *Ieee Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3039359>
- Zhang, Jun, Wang, Y., Li, S., & Shi, S. (2020). An architecture for IoT-enabled smart transportation security system: A geospatial approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(8), 6205–6213.

Deneyap Geliştirme Kartı Ailesinin Donanım Özellikleri ve Uygulama Alanları

Süleyman Burçin Şüyun¹

Özet

Bu çalışmada, Deneyap Kart ailesinin teknik özelliklerini ve donanım mimarisi ayrıntılı bir bakış açısı ile değerlendirilmiştir. Deneyap Kart ailesi ile sensör tabanlı sistemlerdeki uygulama potansiyeli kapsamlı işlenmektedir. Nesnelerin interneti tabanlı uygulamalardaki alabileceği görevlerden bahsedilmektedir. Deneyap Kart 1.0, Deneyap Kart 1A, Deneyap Mini, Deneyap Mini v2, Deneyap Kart 1A v2 (Type C), Deneyap Kart G ve Deneyap Kart Dış Pin Modülü modelleri hem işlemci ve bellek yapıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. GPIO pinleri sayesinde giriş çıkış olanakları bakımından karşılaştırılmıştır. Kartların çoklu sensör entegrasyonu, kablosuz haberleşme modülleri ve enerji kullanım senaryoları incelenmiştir. Tüm dünyadaki geliştiriciler için uygun kart seçimine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

1. Giriş

Deneyap Kart ailesinin büyük bölümü ESP32 tabanlıdır; Kart G modeli ise RISC V mimarisi kullanmaktadır. Modellerin hepsi dahili WiFi ile Bluetooth gibi özellik nesnelerin interneti uygulamaları için avantaj sağladığı değerlendirilmektedir. Düşük enerji ile çalışma desteği standart olarak sunulmaktadır. Bu özellik sayesinde Deneyap Kart ailesinden herhangi bir üyesi enerji tasarruflu bir projede seçilmesinde kısıt getirmez. Kartların tamamında yüksek çözünürlükte analog giriş ve çok kanallı PWM çıkışları vardır. Seri haberleşme arabirimleri (UART, I2C, SPI) tüm aile üyelerinde kullanılabilir. Bu sayede farklı aile üyeleri aynı projede görev alabilir. Farklı entegreler ile genişletilebilir GPIO yapısı bulunmaktadır. Bu gerektiğinde aile içeresinden bir Deneyap Kartın seçilmesini mümkün kılar. Yeni nesil bazı modellerde USB Type C bağlantısına geçilmiştir. Aynı şekilde güç yönetimi

1 Öğr. Gör. Süleyman Burçin Şüyun, Sinop Üniversitesi, Rektörlük, Dijital Dönüşüm Ofisi, Sinop, Türkiye, suyun@sinop.edu.tr, ORCID ID:0000-0003-2808-1861

birimleri daha verimli hale getirilmiştir. Sensör tabanlı projelerde düşük gecikme sağlayan hızlı kesme yapılarına olanak sağlar. Taşınabilir sistemlerde enerji tüketimini azaltan düşük güç modları kullanılabilir. Kartların farklı uygulamalar için esnek bir yapı sunmasına katkı sağlamaktadır. Bu donanımsal bütünlük, Deneyap Kart ailesinin eğitim projelerinden mühendislik prototiplerine kadar geniş bir uygulama alanında etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Deneyap Türkiye, 2024). Deneyap Kart 1.0 ve Deneyap Kart 1A modelleri Gençlik Merkezlerinin bünyesinde bulunan Deneyap atölyelerinde ortaokul ve lise seviyesindeki öğrenciler tarafından kullanılmaktadır. Öğrenciler özellikle ileri robotik, elektronik programa ve nesnelerin interneti gibi modüllerde aktif olarak Deneyap Kart ile projeler geliştirmektedir. Benzer şekilde Teknofest ve benzeri yarışmalarda özellikle üniversite seviyesindeki takımlar Deneyap kart ailesi üyeleri ile hava araçları, otonom kara araç gibi projeleri hayata geçirilirken yaygın olarak gömülü sistem olarak Deneyap kart kullanılmaktadır. Kısaca bu bölüm, Deneyap Kart ailesi ile yürütülen eğitim, prototipleme ve sensör tabanlı uygulamalarda elde edilen uygulama deneyimleri doğrultusunda şekillendirilmiştir.

Kart modelleri arasında teknik kapasite bakımından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Deneyap Kart 1A modeli 24 adet Dijital giriş ve 20 adet Dijital çıkış GPIO pinine sahip olup çoklu ADC ve PWM kanal desteğiyle geniş ölçekli projelerde kullanılabilecek bir pin mimarisi sunar. Buna karşın Deneyap Mini ve Mini v2 modelleri 21 GPIO pini ile daha kompakt bir yapı hedeflemekte, düşük enerji tüketimi ve taşınabilirlik gerektiren projelerde tercih edilmektedir. Şekil 1’de Deneyap Kart 1A Genişletilmiş Pin Diyagramı verilmiştir (Deneyap Türkiye, 2024).



Şekil 1. Deneyap Kart 1A Genişletilmiş Pin Diyagramı (Deneyap Türkiye, 2024).

Bu çeşitlilik geliştiricilerin proje gereksinimlerine göre en uygun kartı seçmesini mümkün kılar. Pin sayısı yüksek modeller çoklu sensör entegrasyonu için avantaj sağlarken robotik uygulamalar tüm kartlar ile geliştirmek mümkündür. Yüksek PWM gereksinimi olan motor sürücü projeleri için gerekli altyapı tüm Deneyap versiyonları için özellikleri için genellenebilir. Özellikle giyilebilir ve taşınabilir projeler için daha az pinli modeller ve düşük güç tüketimi olan versiyonlarda mevcuttur. Bu versiyonların kompakt boyut avantajları tercih edilmeleri için bir başka sebeptir. Bu geniş ürün yelpazesi, Deneyap ekosisteminin farklı ölçeklerdeki projelerde esnek bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Geliştiricilere her türlü nesnelerin interneti ve robotik projelerinde hem donanımsal hem de yazılımsal açıdan zengin bir seçenek sunmaktadır.

Deneyap Kart ailesi, yapı olarak Arduino kart ailesine benzetilebilecek bir mimariye sahiptir. Modüler yapısı, farklı boyutlarda ve farklı pin sayılarında birden fazla kart sunması tercih sebebidir. Çok sayıda sensör ve modül desteğine sahip olması bu benzerliği güçlendirmektedir. Deneyap Kart 1.0, 1A, Mini ve Mini v2 modelleri, tıpkı Arduino Uno, Nano veya Mega gibi farklı kullanım amaçlarına göre seçilebilecek bir geliştirme kartlarıdır. Resmi web sitesindeki dokümanlarda da belirtildiği üzere Deneyap Kart modelleri Arduino IDE ile uyumlu şekilde programlanabilmektedir. Kart yöneticisine eklendikten sonra Arduino ortamında tam işlevli olarak kullanılabilir.

(Arduino ESP32 Core Documentation, 2025; Deneyap Türkiye, 2024). Bu özelliklerin tümü Arduino IDE'ye alışkın olan kullanıcıların Deneyap Kart IDE'ye deneyimini aktarabileceklerini göstermektedir.

Bu kapsamda Deneyap Kart IDE, Deneyap ekosistemine özel olarak geliştirilmiş yerli bir geliştirme ortamı olarak öne çıkar. Bu IDE, kod yazma, derleme, hata ayıklama ve proje yönetimini tek bir bütünleşik arayüzde sunmaktadır. Arduino IDE benzeri bu özelliklerle modül entegrasyonu, port algılama ve bağlantı yönetimi gibi adımlarda kullanıcı dostu bir geliştirme süreci sağlamaktadır (Deneyap Türkiye, 2024). Deneyap Kart IDE'nin Deneyap kullanıcılarına özel tasarlanmış olması ve Türkçe oluşu sebebi ile sıkça tercih edilmektedir. Bir başka tercih sebebi kart ve modüllerin daha hızlı tanımlanmasını ve ek bir yapılandırma gerekmeksizin projelere entegre edilmesini kolaylaştırmasıdır. Bunun yanında Arduino IDE dâhilindeki tüm kütüphaneler Deneyap Kart IDE içerisinde de ulaşılabilir.

Deneyap Kart üyeleri bağımsız geliştirme platformu üyeleri olarak tanımlanmaktadır ancak Deneyap Kartların birçoğunun mimarisi ESP32'ye dayanmaktadır, bu nedenle üyeler ESP32 mimarisini birden fazla Arduino'nun yanı sıra ESP32'nin kapsamlı kütüphane desteği ile kullanabilirler. Bu tür kütüphanelere örnek olarak Arduino IDE için sağlanan kütüphaneler verilebilir, bu kütüphanelere ayrıca Deneyap Kart IDE'si aracılığıyla da erişilebilir. Örneğin, sıcaklık ve nem sensörleri, gaz sensörleri, motor sürücüler, ekran modülleri, gerçek zamanlı saatler ve çeşitli iletişim modülleri, her iki IDE'de de kullanılacak örnek kodlarla birlikte sağlanmaktadır (Arduino Project Hub, 2025).

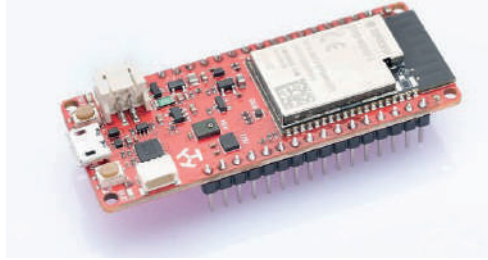
Arduino dünyasında proje paylaşımı için kullanılan Project Hub platformu geniş bir örnek uygulama havuzu sunmaktadır. Benzer bir yapı Deneyap ekosisteminde de mevcuttur. Deneyap'ın resmi proje platformunda, farklı seviyelerde hazırlanmış uygulama örnekleri, eğitim içerikleri ve kart tabanlı projeler geliştiricilere açık şekilde sunulmaktadır (Deneyap Türkiye, 2024). Bu paralellik, Deneyap Kart ailesini Arduino ekosistemine aşina olan kullanıcılar için öğrenmesi kolay ve hızlı adapte olunabilir bir geliştirme ortamı haline getirmektedir.

Kart üyeleri farklı model seçeneklerinin, sensör tabanlı izleme sistemlerinden robotik uygulamalara kadar uzanan çeşitli mimarilerde nasıl konumlandırılacağı bölümün ilerleyen kısımlarında ayrıntılı olarak incelenmektedir.

2. Deneyap Kart Ailesi

2.1. Deneyap Kart 1.0

Ailenin ilk üyesi Deneyap Kart 1.0'ın merkezinde ESP32 WROOM 32 vardır. Bu işlemci sayesinde farklı görevler için çözüm üretilebilmektedir. Bu da hem eğitim ortamlarında hem de giriş seviyesindeki mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Çift çekirdekli Tensilica LX6 işlemcisi, 240 MHz'e kadar çalışma frekansı ile uygulamalar için uygun donanım alt yapısı sunmaktadır. Bununla beraber dahili WiFi Bluetooth bağlantı desteği sayesinde kablosuz veri aktarımına ihtiyaç duyulan nesnelerin interneti projeleri için iyi bir performans sunar. Kart üzerinde 24 adet dijital I/O pini, çoklu PWM çıkışları vardır. 12 bit çözünürlüğe sahip ADC kanalları ayrıntılı sensör ölçümünü mümkün kılar. UART, SPI, I2C gibi temel haberleşme arabirimleri bulunmaktadır. USB Mikro B arabirimi üzerinden programlanabilir olması, kolay kullanımı tercih sebebidir. Hafif robotik uygulamalar, sensör okuma projeleri gibi temel veri toplama sistemleri için ideal bir başlangıç kartıdır. Deneyap Kart 1.0 modeli LSM6DSM tabanlı dahili IMU içermektedir. Kart üzerinde IMU ve bağımsız sıcaklık algılayıcılar sayesinde ek bir donanım olmadan kullanıcıya sensör verileri sunulabilmektedir. Bu özellik gerçek zamanlı denge işlemlerinde kartı merkez veya ortamdaki sıcaklık bilgisini toplama işlemlerinde uç birim olarak görev almasını sağlamaktadır. Şekil 2'de Deneyap Kart 1.0 verilmiştir.

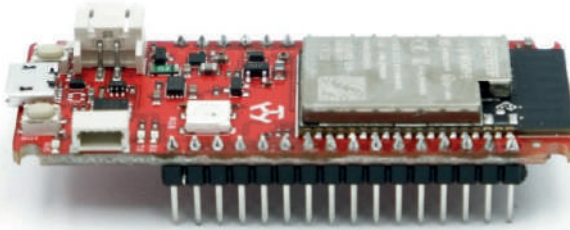


Şekil 2. Deneyap Kart 1.0 (Deneyap Türkiye, 2024).

2.2. Deneyap Kart 1A

Deneyap Kart 1A, Deneyap ailesinin en gelişmiş ve en çok pin desteği sunan modellerinden biridir. Şu anda en çok tercih edilen aile bireylerinden biridir. ESP32 WROVER E işlemci modülü ile donatılan bu model, 24 dijital giriş pini, 20 dijital çıkış pini, 16 ADC kanalı, gelişmiş PWM birimleri

ve genişletilmiş bellek kapasitesiyle çok sensörlü ve karmaşık sistemlerin tasarlanmasına izin verir. Kartın USB Mikro B portu sayesinde daha hızlı ve kararlı bir bağlantı olanağı sağlar. Dâhili PSRAM yapısı görüntü işleme ve gerçek zamanlı veri analizi gibi bellek yoğunluğunu yaratan uygulamalarda önemli avantaj sunar. Kamera bağlantısı sayesinde görüntü yakalama işlemleri için kullanılabilir. Yüksek pin sayısı ve gelişmiş analog, dijital yetenekleri nedeniyle robotik sistemler ve mühendislik prototipleri için güçlü bir platform görevi görür. Şekil 3'te Deneyap Kart 1 A verilmiştir.



Şekil 3. Deneyap Kart 1A (Deneyap Türkiye, 2024)

2.3. Deneyap Mini

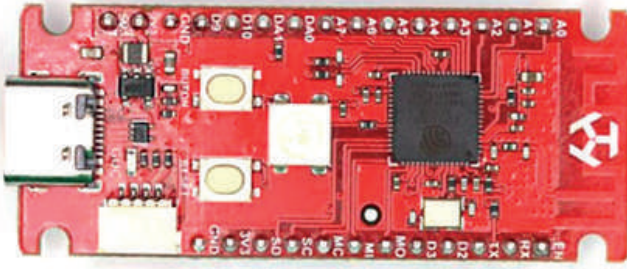
Deneyap Mini, küçük tasarımı ve düşük güç tüketimiyle mini projelerde gözde bir geliştirme kartıdır. Özellikle taşınabilir veya giyilebilir teknoloji projeleri için geliştirilmiş bir modeldir. ESP32 PICO D4 modülünü temel alan işlemciye sahiptir. Tek bir çip içinde işlemci, bellek, kristal osilatör ve RF birimlerini barındıran entegre bir mimarisi vardır. 21 adet GPIO pini, 9 ADC kanalı ve temel PWM çıkışları ile sensör okuma kabiliyetine sahiptir. Bu da küçük ölçekli kontrol sistemleri ve kablosuz iletişim gerektiren hafif projeler için yeterli donanımı sunar. USB Mikro B bağlantısı üzerinden kolayca programlanabilir. Kart, düşük boyutlu yapısı sayesinde mini robotlar, nesnelerin interneti tabanlı taşınabilir cihazlar için uygundur. Düşük enerji ihtiyacı akıllı cihaz uygulamalarında sıklıkla tercih edilir. Minimal yapısına rağmen ESP32'nin sunduğu tam WiFi, Bluetooth kapasitesini sağlaması en önemli özelliklerindendir. Ailenin en küçüklerinden olan bu kart küçük hacimli projelerde oldukça güçlü bir seçenek haline getirir. Bununla birlikte, sınırlı GPIO ve ADC kapasitesi nedeniyle çok sensörlü endüstriyel sistemlerde daha büyük kartlara kıyasla bazı kısıtlar barındırmaktadır. Şekil 4'de Deneyap Mini verilmiştir.



Şekil 4. Deneyap Mini (Deneyap Türkiye, 2024).

2.4. Deneyap Mini v2

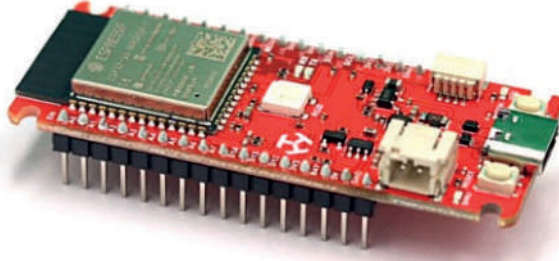
Deneyap Mini v2, ilk nesil Mini modelinin geliştirilmiş versiyonudur. Merkezindeki ESP32 PICO V3 modülünü vardır. Uyumlu donanımı ile kararlı bir mimari sunar. USB Mikro B portunun kullanılması ile, programlama sırasında bağlantı kararlılığı sağlanmıştır. Bununla beraber güç yönetimini daha verimli hale getirmiştir. Kart üzerinde 21 GPIO pini, çoklu PWM çıkışı ve 9 adet ADC kanalı bulunmaktadır. Fiziki olarak rakiplerine göre küçük tasarımına rağmen kablosuz haberleşme gerektiren uygulamalarda donanımlı bir ESP32 performansı sağlar. RF tasarımındaki iyileştirmeler sayesinde WiFi bağlantı stabilitesi artırılmıştır. Düşük güç modları taşınabilir projelerde pil tüketimini önemli ölçüde azaltacak şekilde optimize edilmiştir. Söz konusu kart, giyilebilir cihazlar, taşınabilir ve küçük hacimli çevresel veri toplama projeleri için ideal bir geliştirme kartıdır. Pille çalışabilir oluşu özellikle ortam sıcaklığı hava kalitesi gibi uygulamalarda ek sensörler ile sıkça kullanılmasını sebep olmaktadır. Üzerindeki RGB led özellikle küçük uyarı sistemlerinin göstergesi olarak sıkça kullanılmaktadır. Şekil 5'te Deneyap Mini v2 verilmiştir.



Şekil 5. Deneyap Mini v2 (Deneyap Türkiye, 2024).

2.5. Deneyap Kart 1A v2 (Type C)

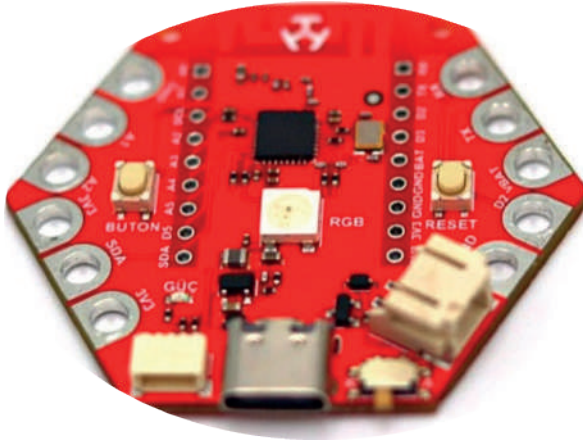
Deneyap Kart 1A v2, popüler 1A modelinin güncellenmiş sürümü olarak geliştirilmiş olup hem donanım hem de bağlantı yapısı açısından önemli iyileştirmeler içerir. Kart, ESP32 S3 tabanlı, Tensilica LX7 modülü ile 8 MB PSRAM desteğini bir araya getirmiştir. Yüksek bellek gerektiren görüntü işleme, akıllı tarama algoritmalarında güçlü bir performans sunar. Toplam 23 adet Dijital Giriş/Çıkış pinine sahip genişletilmiş pin haritası, çoklu ADC kanalları, yüksek çözünürlüklü PWM çıkışları ve birden fazla seri haberleşme birimi imkânlarını sunar. Bu da karmaşık robotik sistemler, endüstriyel prototipler ve gelişmiş nesnelerin interneti uygulamaları için yüksek donanım kapasitesi sağlar. USB Type C arayüzü, güç kararlılığını artırır. Kartın modern bağlantı standartlarına uyumunu da güçlendirmiştir. Deneyap Kart ailesindeki en güçlü modellerden biri olan 1A v2, profesyonel düzeyde donanım geliştirmek isteyenler için geniş bir teknik platform sunar. Şekil 6'da Deneyap Kart 1A v2 (Type C) verilmiştir.



Şekil 6. Deneyap Kart 1A v2 (Type C) (Deneyap Türkiye, 2024).

2.6. Deneyap Kart G

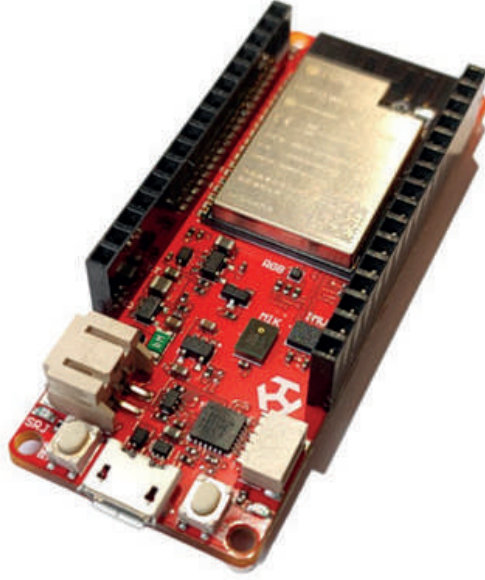
Deneyap Kart G, 160 MHz Tek Çekirdek 32 bit RISC V Mikroişlemci tabanlı gelişmiş bir model olup uç işleme uygulamalarına uygun modern bir işlemci altyapısı ile donatılmıştır. USB OTG desteği ve RISC V tabanlı mimarisi sayesinde nesne algılama ve sinyal analizi gibi yoğun hesaplama gerektiren görevlerde önemli performans artışı sağlar. Kart üzerinde 13 adet Dijital Giriş, Çıkış ve 11 adet Dikilebilir pad olarak GPIO seti, 12 bit çözünürlüğe sahip ADC kanalları, yüksek hızlı SPI arayüzü ve gelişmiş I2C haberleşme kanalları bulunmaktadır. USB Type C bağlantısı hem programlama hem de veri iletimi için çift yönlü kullanım imkânı sunarken, yerleşik gelişmiş RF tasarımı WiFi 802.11 ve Bluetooth 5.0 LE iletişimini daha stabil hale getirmiştir. Söz konusu kart; akıllı güvenlik sistemleri, makine öğrenmesi tabanlı sensör analizleri, yüksek hızlı veri toplama sistemleri ve giyilebilir teknolojiler destekli projeler gibi ileri seviye uygulamalarda güçlü bir platform görevi görmektedir. Şekil 7’de Deneyap Kart G’de verilmiştir.



Şekil 7. Deneyap Kart G (Deneyap Türkiye, 2024).

2.7. Deneyap Kart Dışı Pin Modülü

Deneyap Kart Dışı Pin Modülü, Deneyap Kart üyelerinin genişletilebilirliğini artırmak için tasarlanmış ek bir IO genişletme kartıdır. Kartın temel amacı, geliştiricinin ana kart üzerinde yer alan pinleri daha kolay erişilebilir bir yapıya taşımaktır. Özellikle öğrenci projelerinde ekleme, çıkarma işlemlerini daha kolay bir forma dönüştürmektir. Özellikle çok sensörlü projelerde kablolama karmaşasını azaltır. Modül bağlantılarını düzenlemek ve prototipleme sürecini hızlandırmak için kullanılmaktadır. Bu model üzerinden tüm GPIO, güç ve haberleşme pinleri Prototipleme kartı uyumlu bir düzene kavuşur. Eğitim ortamlarında ve hızlı prototipleme süreçlerinde Deneyap Kartın doğrudan lehim gerektirmeden kullanılabilmesini sağlayarak hem kullanım kolaylığı hem de modüler genişleme avantajı sunar. Şekil 8’de Deneyap Kart Dışı Pin Modülü verilmiştir.



Şekil 8. Deneyap Kart Dışı Pin Modülü

3. Teknik Özellikler ve Donanım Mimarisi

Bu bölümde Deneyap Kart ailesinin donanım mimarisi ve işlemci yapısı ayrıntılı işlenmiştir. Haberleşme sistemleri ve bellek düzeni gibi kritik konularda bilgi verilmektedir. Bununla beraber uygulama kapasitelerini anlatmak için enerji tüketimi ve giriş çıkış kapasiteleri ayrıntılı biçimde anlatılmıştır. Kart modellerinin temel teknik yapı bileşenlerinin anlaşılması, farklı uygulama senaryoları için uygun donanım seçiminin yapılabilmesine imkan sağlamaktadır. Aşağıdaki alt başlıklarda Deneyap Kart ailesi genelinde ortak olan mimari özellikleri verilmiştir. Ek olarak modeller arasındaki temel farklılıklar ele alınmıştır. Tablo 1’de Deneyap Kart Modellerinin Genel Karşılaştırması verilmiştir (Deneyap Türkiye, 2024). Bu bölümde performans değerlendirmesi; işlemci mimarisi, bellek kapasitesi, giriş, çıkış yetenekleri ve enerji tüketimi bileşenleri üzerinden ele alınmıştır. Bu yaklaşım, kartların uygulama gereksinimlerine göre çok ölçütlü biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Tablo 1. Deneyap Kart Modellerinin Genel Karşılaştırması

Özellik	Kart 1.0	Kart 1A	Kart 1A v2	Mini	Mini v2	Kart G
İşlemci	ESP32 WROOM 32	ESP32 WROVER E	ESP32 S3	ESP32 PICO D4	ESP32 PICO V3	RISC V
Çekirdek	Dual Core LX6	Dual Core LX6	Dual Core LX7	Tek Çekirdek LX7	Tek Çekirdek LX7	Tek Çekirdek RISC V
PSRAM	Yok	8 MB	8 MB Octal SPI PSRAM	Yok	2MB	Yok
Flash	4 MB	4 MB	4 MB	4 MB	4 MB	4 MB
GPIO	24	24 giriş 20 çıkış	23 giriş çıkış pini	21	21	13 GPIO + 11 pad
ADC	12 bit / 8 kanal	12 bit / 16 kanal	12 bit / 16 kanal	13 bit / 9 kanal	13 bit / 9 kanal	12 bit / 6 kanal
PWM	Çoklu kanal	Çoklu kanal	Çoklu kanal	Orta seviye	Orta seviye	Çoklu kanal
WiFi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n
Bluetooth	Bluetooth 4.2	Bluetooth 4.2	Bluetooth 5.0 LE	Bluetooth 4.2	Bluetooth 4.2	Bluetooth 5.0 LE
USB	Micro USB	Micro USB	Type C	Micro USB	USB Mikro B	Type C (OTG)
Enerji Tüketimi	Düşük	Orta	Orta	Çok düşük	Çok düşük	Orta
Öne Çıkan Özellik	Temel kullanım	Çok pinli yapı	Type C + geniş bellek	Kompakt tasarım	Güç optimizasyonu	İleri seviye projeler
Tipik Kullanım	Eğitim	Robotik & Nesnelerin interneti	Endüstriyel prototip	Wearable Bluetooth & Nesnelerin interneti	Taşınabilir Nesnelerin interneti	Genel amaçlı, çok seviyeli uygulamalar

Tablo 1 incelendiğinde, kartlar arasındaki donanımsal farkların doğrudan uygulama ölçeğini ve sensör entegrasyon kapasitesini etkilediği görülmektedir.

3.1. İşlemci Yapısı

Deneyap Kart ailesi, işlemci mimarisi açısından farklı yapılar içermektedir. Bünyesindeki farklı kartlar farklı uygulama alanlarının gereksinimleri için planlanmıştı. Birbirinden ayrılan mikroişlemci çözümlerini bünyesinde barındırmaktadır. Bu farklı özellikler eğitimden sanayi uygulamalarına pek çok alanda kartların kullanılmasına imkan vermektedir. Bu çeşitliliğin merkezinde, ailede yer alan modellerin, Deneyap Kart G dışında hepsinde ESP32 ailesine ait Tensilica LX tabanlı işlemciler yer almaktadır. Deneyap Kart 1.0, Deneyap Kart 1A ve Deneyap Kart 1A v2 modellerin işlemcilerinde

çift çekirdekli yapı varken, Mini modellerinde tek çekirdekli işlemciler kullanılmıştır.

Söz konusu mimariyi kullanan kartlarda işlemci yapısı çoğunlukla çift çekirdekli olarak tasarlanmıştır. Her bir çekirdek, yürütülen uygulamanın işlem yoğunluğuna bağlı olarak değişken saat frekanslarında çalışabilmekte ve belirli koşullarda 240 MHz seviyelerine ulaşabilmektedir. Bununla birlikte, Deneyap Kart ailesinin yalnızca bu mimari ile sınırlı olmadığı özellikle vurgulanmak gerekir. Aile içerisinde, daha dar kapsamlı görevler için tek çekirdekli mimariye sahip kartlar ile ESP32 ailesi dışında RISC V kullanan işlemci tabanlı çözümler de yer almaktadır. Bu işlemci değişikliği özellikle enerji tüketimini pozitif yönde etkilemektedir. ESP32 tabanlı Deneyap Kart modellerinde kablosuz haberleşme yetenekleri, donanım mimarisinin tamamlayıcı bir unsuru olarak sunulmaktadır. WiFi ve Bluetooth gibi radyo frekans temelli haberleşme birimleri, herhangi bir harici modüle ihtiyaç duyulmaksızın sistem üzerinde yonga yaklaşımıyla işlemci yapısına entegre edilmiştir. Deneyap Kart ailesinde kullanılan ESP32 WROOM, ESP32 WROVER ve ESP32 PICO işlemci tipleri ise Flash bellek kapasitesi aynıdır. RF performansı ve desteklenen çevresel birimler bakımından farklı özellikler göstermektedir. Bu farklılıklar, kartların eğitim amaçlı çalışmalardan nesnelerin interneti tabanlı uygulamalara kadar uzanan geniş bir kullanım alanında esnek biçimde konumlandırılabilmesine olanak tanımaktadır. Deneyap Kart modellerine ait işlemci mimarileri ve bellek yapılarına ilişkin karşılaştırmalı bilgiler Tablo 2’de sunulmuştur (Deneyap Türkiye, 2024).

Tablo 2. İşlemci ve Bellek Yapısı Karşılaştırması

Model	İşlemci Modülü	İşlemci Tipi	PSRAM	Flash	Not
1.0	ESP32 WROOM 32	LX6	YOK	4 MB	Temel seviye projeler
1A	ESP32 WROVER E	LX6	8 MB	4 MB	Bellek yoğun projeler için
1A v2	ESP32 S3	LX7	8 MB	4 MB	Type C ile geliştirilmiş
Mini	ESP32 PICO D4	LX7	Yok	4 MB	Mikro boyutlu projeler
Mini v2	ESP32 PICO V3	LX7	2 MB	4 MB	Optimize edilmiş RF yapısı
Kart G	RISC V	Tek Çekirdek	YOK	4 MB	Gelişmiş sensör uygulamaları

3.2. Bellek Yapısı

Kartlarda kullanılan ESP32 modüllerinin hepsinde Tablo 2’de verildiği gibi 4 MB’lık bir flash bellek içermektedir. WROVER modüllerinin bir diğer özelliği 8 MB’lık PSRAM bellek içermesidir. PSRAM bellek yapısı verilere erişmek için belirlenen zaman kısıtları dışında veri akışını sürekli sağladığı için, veri kaydıyla birlikte görüntü işleme gibi uygulamalar için hızlı ve etkin bir çözüm sunmaktadır. Diğer modüllere göre PICO modülleri entegre yapıları sayesinde biraz daha kompakt ve küçük tasarımlar yapılmasını sağlamaktadır. Deneyap Kart Modellerinin GPIO, ADC ve PWM Kapasiteleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. GPIO, ADC ve PWM Kapasiteleri

Model	GPIO Sayısı	ADC Kanalı	ADC Çözünürlüğü	PWM Kanalı	UART / I2C / SPI
1.0	24	8	12 bit	Var	Var / Var / Var
1A	24 dijital giriş + 20 dijital çıkış	16	12 bit	Var	Var / Var / Var
1A v2	23 Dijital Giriş/ Çıkış pini	16	12 bit	Var	Var / Var / Var
Mini	21	9	13 bit	Var	Var / Var / Var
Mini v2	21	9	13 bit	Var	Var / Var / Var
Kart G	13 GPIO + 11 pad	6	12 bit	Var	Var / Var / Var

Tablo 3’te anlatılmak istenenleri özetlemek gerekirse farklı GPIO sayılarına sahip modellerin farklı ADC kanalı sayıları olmasına rağmen temelde UART / I2C / SPI gibi seri iletişim yöntemlerini kullanmaya elverişlidir.

3.3. Enerji Tüketimi

Deneyap Kart ailesi, düşük güç modları sayesinde enerji tasarrufu gerektiren projelerde etkili bir kullanım sunar. ESP32 işlemcisi, modem sleep, light sleep ve deep sleep gibi enerji yönetim modlarına sahiptir. Deep sleep modunda tüketim birkaç mikroamper seviyesine kadar düşerken, WiFi aktifken tüketim milisaniyeler içinde birkaç yüz miliamper seviyesine çıkabilir. Bu yapı taşınabilir cihazlar ve batarya ile çalışan gömülü sistemler için kritik öneme sahiptir.

3.4. Haberleşme Yapısı

Tüm Deneyap Kart modellerinde dahili WiFi (802.11 b/g/n) ve Bluetooth LE desteği tüm modellerde mevcuttur; sürümler modele göre değişmektedir. RISC V tabanlı Deneyap Kart G modeli ise Bluetooth 5 LE desteği ile geliştirilmiştir. Sağlanan bu bant genişliği, daha yüksek bağlantı kararlılığı sağlar. UART, I2C ve SPI gibi kablolu haberleşme protokolleri kartların tamamında yer almaktadır. bu protokoller çok sensörlü projelerde modül entegrasyonu için temel oluşturur. Tablo 4’ de Deneyap Kart modellerinin kablosuz iletişim ve USB haberleşme özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4. Kablosuz İletişim ve USB Haberleşme Özelliklerinin Karşılaştırılması

Model	WiFi	Bluetooth	USB Türü	USB OTG
1.0	802.11 b/g/n	Bluetooth 4.2	Micro USB	Yok
1A	802.11 b/g/n	Bluetooth 4.2	Micro USB	Yok
1A v2	802.11 b/g/n	Bluetooth 5 LE	Type C	Yok
Mini	802.11 b/g/n	Bluetooth 4.2	Micro USB	Yok
Mini v2	802.11 b/g/n	Bluetooth 4.2	Micro USB	Yok
Kart G	802.11 b/g/n	Bluetooth 5 LE	Type C	Var

3.5. GPIO, ADC ve PWM Kapasiteleri

Deneyap Kart ürün ailesinde sağlanan GPIO sayısı modelden modele değişiklik göstermektedir. ADC kanalları genellikle 6 ile 16 arasında olup, 12 bit çözünürlüğe sahiptir. Tüm Deneyap Kartları, birçok görev için büyük bir esneklik sunan bir PWM mimarisine sahiptir. Servo motorları sürmek ve DC motorların hızını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda LED’in parlaklığını kontrol edebilir. Geniş pin çeşitliliği, robotik ve çoklu sensör uygulamaları için kartların esnekliğini artıran önemli bir faktördür.

3.6 Pin Yapıları ve Fonksiyonları

Deneyap Kart pin yapıları, çok işlevli pinler kullanarak giriş/çıkış işlemleri gerçekleştirme mantığına dayanmaktadır. Bir pin dijital I/O, PWM, ADC olarak ve belirli protokol fonksiyonları (UART TX/RX, I2C SDA/SCL, SPI MOSI/MISO/CLK) olarak yapılandırılabilir. Bu esneklik, daha karmaşık projelerde donanım tasarımını basitleştirir. Kartların pin düzeni, Deneyap Kart’ın resmi sitesinin belgeler bölümünde mevcuttur. Kartların özellikleri modelden modele değişmekte olup, her model için pin düzenleri yapılmıştır.

Tablo 5, Deneyap Kart modellerinin kullanım alanlarının karşılaştırmasını göstermektedir.

Tablo 5. Kullanım Alanları Karşılaştırması

Model	En Uygun Olduğu Proje Türleri
1.0	Robotik, Eğitim uygulamaları ve temel sensör projeleri
1A	Robotik, motor sürme ve çok sensörlü sistemler
1A v2	Endüstriyel prototip ve yüksek bellek gerektiren projeler
Mini	Wearable Bluetooth, mini nesnelerin interneti cihazlar, taşınabilir sistemler
Mini v2	Pil ile çalışan nesnelerin interneti sistemleri ve kompakt sensör ağları
Kart G	Yüksek performanslı veri toplama

4. Bulgular ve Tartışma

Gözlemler farklı uygulama senaryoları için kartların yeterliliklerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek sayıda pine sahip kartların, çoklu sensör entegrasyonu gerektiren sistemlerde daha esnek ve hızlı uygulanabilir çözümler sunduğu gözlemlenmiştir. Bu kartların sınıf ortamındaki öğrencilerden ileri seviyedeki uygulama geliştiricilere kadar geniş kullanıcı kitlesine hitap etmektedir. Bellek kapasitesi daha fazla olan modellerin, yoğun veri akışı gibi işlemlerde avantaj sağladığı analiz edilmiştir. Buna karşılık, Mini serisi kartların düşük güç tüketimi sayesinde enerji verimliliği ile öne çıkmaktadır. Mini serisi kartların özellikle taşınabilir ve pil destekli uygulamalarda daha uygun bir seçenek olduğu söylenebilir. Öğrencilerin kısa sürede hazır kütüphaneler yardımı ile LED kontrolü yaptığı ve I2C protokolü üzerinden LCD ekranları çalıştırabildiği gözlemlenmiştir. Robotik kodlamaya ilgisi olan öğrencilerin yapımı zaman alan mesafe sensörleri temeli PID destekli kontrol uygulamalarını gerçekleştirebilmiş ve yarışmalara katılmışlardır. Deneyap Kart 1A'nın sunduğu kamera bağlantı imkanı ile yüz tanıma gibi yapay zeka tabanlı görevleri yerine getirebildiği gözlemlenmiştir. Farklı mimarisi, USB OTG desteği ve haberleşme yetenekleri ile Deneyap Kart G modelinin ise ileri seviye veri işleme ve uç birim tabanlı uygulamalarda öne çıktığı görülmektedir.

Özetlemek gerekirse bulgular, kart ailesi içerisindeki her bir modelin belirli uygulama gereksinimlerine göre farklı avantajlar sunduğunu ve donanım seçim sürecinin proje başarısı açısından kritik bir aşama olduğunu göstermektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, Deneyap Kart ailesine ait farklı modellerin teknik özellikleri ve donanımsal farklılıkları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İşlemci mimarileri, GPIO sayıları, bellek yapıları ve haberleşme birimleri gibi temel donanım bileşenler değerlendirilmiştir. Kartların uygulama içerisindeki kapasitesi üzerinde durulmuştur. Elde edilen bulgular, kart ailesi içerisinde yer alan her bir modelin belirli uygulama senaryoları için farklı avantajlar sunduğunu göstermektedir. Çoklu sensör gerektiren projelerde yüksek pin sayısına sahip modellerin daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Enerji verimliliğinin öncelikli olduğu taşınabilir sistemlerde ise Mini serisinin öne çıktığı belirlenmiştir. Gelişmiş veri işleme ve uç birim tabanlı uygulamalarda ise Deneyap Kart G modelinin donanımsal kapasitesi ve ergonomisi ile tercih edilmektedir. Bu sonuçlar, proje planlama aşamasında doğru kart seçiminin sistem başarısı açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda, kartların uzun süreli performans testleri kritik öneme sahiptir. Farklı haberleşme protokolleri altındaki davranışları ve sensör türlerine bağlı enerji tüketim analizleri ele alınabilir. Geliştiricilere bu kartlarla yapılan tasarımlarında daha ayrıntılı nesnelerin interneti imkanı tanımak ve karar destek çerçevesi sunulması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, özellikle enerji tüketimi performans üzerine yapılacak deneysel çalışmaların ve kartların gerçek saha koşullarındaki davranışlarının daha net ortaya konmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- Arduino Project Hub. (2025). Arduino Project Hub. Arduino. <https://project-hub.arduino.cc/>
- Arduino ESP32 Core Documentation. (2025). ESP32 Arduino Core Documentation. Espressif Systems. <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/>
- Deneyap Türkiye. (2024). Deneyap Kart IDE kullanıcı rehberi. Deneyap Kart. <https://deneyapkart.org/docs/deneyap-kart-ide>
- Deneyap Türkiye. (2024). Deneyap Kart proje sayfası. Deneyap Kart. <https://deneyapkart.org/projeler>
- Deneyap Türkiye. (2024). Deneyap Kart teknik dokümanları. Deneyap Kart. <https://docs.deneyapkart.org/>

Zaman Serisi Verilerinin Yönetimi ve Nesnelerin İnterneti Tabanlı Yenilikçi Uygulama Mimarileri

Süleyman Burçin Şüyun¹

Özet

Bu çalışma, sensör temelli sistemlerin ürettiği zaman serisi verilerinin yönetiminde kullanılan temel yaklaşım ve kavramları ele almaktadır. Bu tür yapılarda ölçümler kimi zaman düzenli aralıklarla, kimi zaman ise kesintili ve yüksek tempolu olarak üretilmektedir. Bu nedenle verinin toplanması, güvenli şekilde iletilmesi, zaman odaklı yapılarda saklanması ve daha sonra işlenmesi birbirinden ayrılan fakat birbiriyle bağlantılı adımlar içinde gerçekleşir. Çalışmanın amacı, bu adımların bütünsel bir veri akışı içinde nasıl ilerlediğini teknik bir bakışla ortaya koymaktır.

Zaman serisi odaklı veri tabanlarının son dönemlerde büyük önem kazanmasının temel nedeni, klasik veri tabanı modellerinin bazı sınırlamalara sahip olmasıdır. Özellikle yazma hızının yetersiz kaldığı durumlar, sıkıştırma kapasitesinin düşük olması ve ölçek büyüdükçe performansın düşmesi, daha uygun çözümler aramayı gerektirmiştir. Bu nedenle son yıllarda geliştirilen mimari modeller, verinin kenar bölgede, ara katmanlarda ve merkezde işlenebilmesine imkan tanımaktadır. Bu yaklaşımın temel hedefi gecikmeyi azaltmak ve iletişim hattındaki yükü hafifletmektir. Böylece sistemin çalışma kararlılığı korunmuş olur.

Yapılan değerlendirmeler, zaman serisi veri yönetiminin yalnızca depolama sürecinden ibaret olmadığını açık bir şekilde göstermektedir. Verilerin işlenmesi, alışılmadık durumların fark edilmesi, belirli eşik değerlerinde uyarı üretilmesi ve bazı işlemlerin otomatik olarak yürütülmesi artık bu yapıların doğal bir parçası haline gelmiştir. Bu özelliklerin birlikte çalıştığı bütünlük bir yaklaşım, modern veri akış sistemlerinin temel gereksinimleri arasında yer almaktadır.

1 Öğr. Gör. Süleyman Burçin Şüyun, Sinop Üniversitesi, Rektörlük, Dijital Dönüşüm Ofisi, Sinop, Türkiye, ,suyun@sinop.edu.tr, ORCID ID:0000 0003 2808 1861

1. Giriş

Nesnelerin interneti kavramı, elektronik kartların dijital ağlar üzerinden birbirleriyle iletişimleri temeline dayanır. Bu iletişim ile çok büyük hacimlerde zaman serisi verisinin oluşmasını sağlamıştır. Bu veriler nesnelerin interneti aygıtları tarafından sürekli biçimde üretilen özellikle sensöre ait büyük ölçekli verilerdir. Bu verilere örnek vermek gerekirse sıcaklık, nem, basınç, konum, gaz yoğunluğu gibi çok farklı türü kapsamaktadır (Shah, Jat ve Sasidhar, 2022). Oluşan verilerin toplanması ve analiz edilmesi sistemin iyileştirilmesi bakımından büyük bir öneme sahiptir (de Oliveira ve ark., 2023).

Zaman serisi verilerinin özellikle bulut sistemlerde kayıtlarının artması bazı sıkıntılar getirilmiştir. Bu sıkıntılar ölçeklenebilirlikte ve performansta yetersizler getirmiştir. Bu sebeple, zaman damgası odaklı daha çok olayların kaydına yönelik depolama modelleri ve yüksek yazma okuma kapasitesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç sebebi ile Zaman Serisi Veri Tabanları (ZSVT) geliştirilmiştir (Shah ve ark., 2022). InfluxDB, TimescaleDB ve OpenZSVT gibi çözümler, Nesnelerin interneti çalışmalarında büyük hacimli verinin yönetimi için öne çıkan teknolojiler olmuştur.

Nesnelerin interneti çalışmalarında yalnızca verinin depolanması değil aynı zamanda kaynağının güvenilir bir biçimde izlenebilmesi de giderek önem kazanmaktadır. Veri kökeni, verinin üretildiği kaynak manasına gelmektedir. Bu kaynaktaki verilerin geçirdiği işlemler ve uğradığı değişikliklerin kaydedilmesi gerekir. Bu süreç doğrulama, hata tespiti ve güvenlik mekanizmalarında önemli katkılar sunmaktadır (Hu ve ark., 2020).

Bir başka konu nesnelerin interneti tabanlı yapıların, hem donanım kısıtları hem de sınırlı bant genişliği nedeniyle verinin sıkıştırılmasını bir gereksinim haline getirmesidir. Zaman serisi verileri önemi artan sıkıştırma yöntemleri ile depolama gereksinimini azalmaktadır. Veri aktarım hızının artması ve makine öğrenmesi modellerine uygun veri temsilleri üretmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmasını yaygınlaştırmaktadır (de Oliveira ve ark., 2023). Bu bağlamda veri yönetimi süreci dahilindeki süreçler veri toplama, veri depolama, veri işleme ve veri yönetimi/görselleştirme olmak üzere dört temel aşamadan oluşur. Bu mimari modern zaman serisi mimarilerinin çekirdeğini oluşturur (Shah ve ark., 2022).

Son yıllarda bulut, kenar ve sis katmanlarını birleştiren hibrit mimari çalışmaları hızla artmıştır. Bu mimarilerin gelişmesi ile veri işleme ve sıkıştırma adımlarının çoğu uç veya sis katmanında gerçekleştirilir. Bu işlemler gecikme süreleri azaltılmaktadır. Sistemin çalışma zamanındaki bu azalma enerji verimliliğini de artırmaktadır (de Oliveira ve ark., 2023). Bu şekilde

uçtan buluta taşınan veri akışı iyileştirilmesi ve sistemlerin ölçeklenebilirliği güçlendirilmektedir.

Bu çalışma temelde, nesnelerin interneti ortamlarında üretilen zaman serisi verilerinin toplanmasının katmanlarını içermektedir. Güvenli biçimde aktarılması, ölçeklenebilir depolama modelleriyle saklanması ve izlenmesine yönelik güncel yaklaşımları genel bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda; farklı zaman serisi veritabanı mimarileri, veri kökeni yönetimi ve zaman serisi veri sıkıştırma teknikleri birlikte değerlendirilerek nesnelerin interneti tabanlı yenilikçi uygulama mimarilerinin tasarımına yönelik kapsamlı bir çerçeve sunulmaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE / TEORİK ARKA PLAN

2.1. Zaman Serileri

Zaman serileri, belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerin her birinin bir zaman damgasıyla eşleştirildiği veri kümeleri olarak tanımlanır (Naqvi ve Yfantidou, 2017). Bu veri kümeleri, bir sistemde izlenen verilerin örneğin sıcaklık, basınç veya elektrik akımı bilgilerinin zaman içerisindeki değişimini ortaya koyar. Matematiksel yaklaşımda zaman serisinin denklemi aşağıda verilmiştir:

$$X = \{(x_i, t | t_1 < t_2 < \dots < t_n)\} \quad (1)$$

Denklemden gösterilen X değeri zaman serisini temsil eder. x_i değeri, ölçümün gerçekleştiği andaki durumu temsil eder. Örnek olarak bu bir sensör verisi zaman serisi olarak tutuluyor ise sensörden o anda alınan veridir. t ile gösterilen alan verinin alındığı zamanı temsil eder. Son olarak t_1, t_2, t_n bilgisi ise alınan bilgilerin zaman içerisinde toplandığını temsil eder. Burada zaman aralıklarının düzenli veya düzensiz bir sürekliliğe sahip olması bir başka konu başlığıdır (Shah ve ark., 2022).

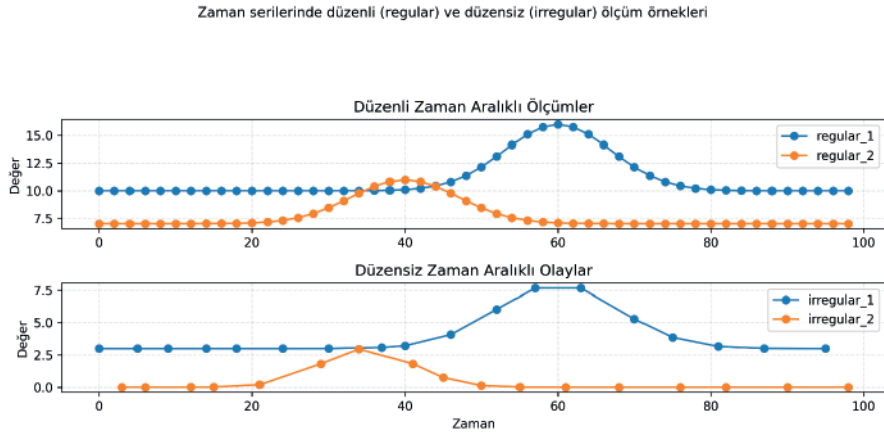
Zaman serileri; finans bilgilerinden çevresel gözlem bilgilerine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Özellikle nesnelerin interneti gibi farklı konu başlıklarında yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Shen ve ark., 2023). Nesnelerin interneti tabanlı sistemlerde sensörlerden bir düzen eşliğinde sürekli olarak aktarılan veriler zaman serisi biçiminde oluşturulur. Oluşan veriler çoğu zaman kaydedilir veya gözlemlenir. Bu verilerin analizi, sistem davranışını anlamak ve geleceğe yönelik tahminlerde bulunmak için önemli bir rol oynar (de Oliveira ve ark., 2023).

2.1.1. Zaman Serilerinde Düzenlilik

Zaman serisi verileri, ölçümlerin hangi düzenle toplandığına bağlı olarak iki temel gruba ayrılır. Bunlardan ilki düzenli yapılardır. Bu tür serilerde ölçümler eşit aralıklarla alınır ve sıcaklık, basınç ya da akım gibi sürekli değişen fiziksel büyüklüklerin zaman içindeki davranışını izlemek için uygundur. Örneğin BME280 sensörünün her saniye ürettiği sıcaklık verileri bu yapıya iyi bir örnek oluşturur.

Düzensiz serilerde ise belirli bir zaman aralığı bulunmaz. Ölçüm, çoğu zaman belirli bir olayın oluşmasına ya da bir sınırın aşılmasına bağlıdır. Gaz yoğunluğu belirli bir değerin üstüne çıktığında MQ7 veya MiCS5524 sensörlerinin ölçüm göndermesi bu duruma örnek gösterilebilir.

Bu iki yapı analiz açısından farklı özellikler taşır. Düzenli seriler sabit zaman aralığına sahip oldukları için pek çok istatistiksel yöntemle doğrudan uygulanabilir. Düzensiz serilerde ise veri aralıkları eşit olmadığı için işlemler daha farklı bir yaklaşım gerektirir. Bu tür veriler çoğu zaman yeniden örnekleme ile sabit zaman aralıklarına dönüştürülür. Bazı durumlarda eksik noktaları tamamlamak için tahmin yöntemleri kullanılır. Bu işlemler veri setinin düzenli bir yapıya kavuşturulmasını sağlar ve analiz süreçlerini kolaylaştırır. Şekil 1'de düzenli zaman aralıklı ölçümler ve düzensiz zaman aralıklı olaylar verilmiştir.



Şekil 1. Düzenli Zaman Aralıklı Ölçümler ve Düzensiz Zaman Aralıklı Olaylar

2.2. Zaman Serilerinin Nesnelerin İnterneti Uygulamalarındaki Rolü

Nesnelerin interneti teknolojilerinde zaman serisi verileri, cihazların çalışma durumunun izlenmesi sırasında beklenmedik davranışların ortaya çıkarılmasında önemli rol sahibidir. Bu sebeple zaman serisi verileri, sistemler için kritik öneme sahiptir. Bu avantaj enerji tüketiminin optimize edilmesi ve bakım faaliyetlerinin planlanması gibi birçok kritik süreçte temel bir bileşen olarak anılmaktadır. Sensörlerin üretmiş olduğu veriler uç, sis ve bulut katmanlarında işlenerek sürekli akış hâlinde zaman serisi şeklinde depolanabilir (de Oliveira ve ark., 2023). Bu tür yüksek frekanslı ve ardışık veriler, geleneksel ilişkisel veri tabanlarının ölçeklenebilirlik ve performans gereksinimlerini karşılayamaması nedeniyle özel olarak tasarlanmıştır ve Zaman Serisi Veri Tabanlarının (ZSVT) ortaya çıkmasına yol açmıştır (Naqvi ve ark., 2017; Shah ve ark., 2022).

ZSVT mimarileri, yüksek yazma performansı özelliği ve hızlı zaman aralığı sorgularını desteklemesi sayesinde nesnelerin interneti teknolojisi ile üretilen büyük hacimli verilerin yönetimini kolaylaştırmaktadır. Yapılan karşılaştırmalı performans çalışmalarında InfluxDB ve TimescaleDB gibi sistemlerin performansı diğer sistemlere göre gözle görülebilir ölçüde iyi olduğu anlaşılmıştır. Özellikle nesnelerin interneti uygulama senaryolarında veri ekleme ve sorgulama operasyonlarında oldukça yüksek verimlilik sunduğunu gösterilmiştir (Shah ve ark., 2022). Bununla beraber, Lindorm ZSVT altyapısının milyarlarca aktif zaman serisini söz konusu olduğu deneyimlere tabi tutulmuştur. Bu deneyimlerde düşük gecikmeyle işleyebildiği gözlemlenmiştir. Bu özelliği makine öğrenmesi tabanlı düzensizlik tespiti gibi ileri analiz tekniklerinin kullanılmasına elverişlidir. Bununla beraber sistem doğrudan SQL düzeyinde desteklediği bildirilmektedir (Shen ve ark., 2023). Şekil 2’de nesnelerin interneti veri akış katmanları verilmiştir.



Şekil 2. Nesnelerin İnterneti Veri Akış Katmanları.

3. YÖNTEM

3.1. Süreç Görünümü

Zaman serisi verilerinin verimli bir şekilde yönetilebilmesi, dört ana bileşenin birbirini tamamladığı bir süreç olarak ele alınır. Bunlar, veri toplama, veri depolama, veri işleme ve veri yönetimi (görselleştirme) süreçleridir. Bu aşamalar, sensör temelli düzeneklerde ve nesnelerin interneti tabanlı yapılarda uçtan, buluta doğru ilerleyen veri akışının temelini oluşturur. Sonuç olarak bu süreç sistemin bütünsel çalışma çerçevesini ortaya koyar.

3.1.1. Veri Toplama

Bu aşamada fiziksel çevreden ölçüm alınması temelini söz konudur. Sensörler çoğu zaman mikrodenetleyici ailesinden gömülü donanımları aracılığıyla bilgileri alır. Elde edilen değerler örneğin sıcaklık, nem, gaz yoğunluğu, basınç ya da akım gerilim gibi parametreler sayısal forma dönüştürülerek sistemde işlenebilir hâle getirilir. Üretilen bu veriler yoğunlukla MQTT, HTTP gibi iletişim protokolleri kullanılarak ağ üzerinden bir sonraki sisteme iletilir. Veri bütünlüğü verilerin toplanması aşamasında önemli bir başlıktır. Veri bütünlüğü ile birlikte örnekleme aralığı ve iletişim gecikmesi gibi unsurlar, sistem performansını doğrudan belirleyen temel etkiler arasında yer almaktadır.

3.1.1.1. Veri Aktarımı

Sensörlerden gelen zaman serisi verilerinin güvenli bir biçimde ve gecikme oluşmadan veri tabanına aktarılması sistemin en önemli adımlarından

biridir. Bu aşamada amaç, uç noktada üretilen verilerin kesintisiz şekilde merkezi yapıya ulaşmasını sağlamaktır. Aktarımın doğru yapılması hem veri bütünlüğü açısından hem de sistemin genel kararlılığı için kritik bir gerekliliktir.

Bu aktarım süreci için farklı yöntemler kullanılabilir. InfluxData tarafından önerilen veri alma yapısı, bilgilerin üç temel yol üzerinden veri tabanına iletilebileceğini belirtir.

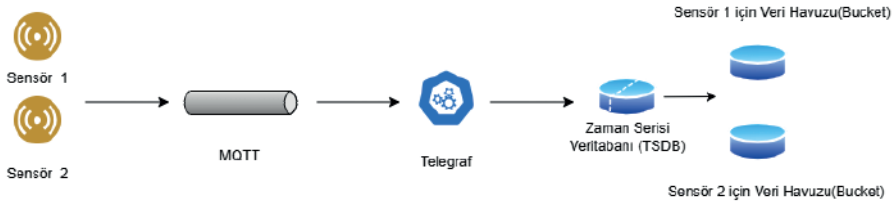
İlk yöntem doğrudan istemci bağlantısıdır. Bu yöntemde cihaz ya da yazılım, veri tabanı sağlayıcısının sunduğu kütüphaneleri kullanarak ölçümleri doğrudan yazma arayüzüne gönderir. Yapısı basit olduğu için küçük ölçekte çalışan sistemlerde tercih edilebilir. Ancak üretilen veri miktarı arttıkça bağlantı yükü de yükselir. Bu durum bazı sınırlamalara yol açabilir.

Bir diğer yöntem ise ara katman kullanılmasıdır. Çok sayıda cihazın aynı anda veri ürettiği yapılarda genellikle bir geçiş noktası görevinde çalışan bir katman bulunur. Bu yapı farklı iletişim protokollerinden gelen verileri toplar ve ortak bir şekle dönüştürerek veri tabanına iletir. Böylece protokol farklılıkları sorun oluşturmaz ve sistem daha esnek bir hale gelir. Bu yaklaşım özellikle ölçek büyüdüğünde hatalara karşı daha dayanıklı bir yapı sunar.

Üçüncü yöntem Telegraf tabanlı veri akışıdır. Telegraf, farklı veri kaynaklarından ölçüm alabilen bir eklenti yapısıdır. Örneğin mesaj tabanlı bir aktarıcı üzerinden gelen bilgiler bu eklenti tarafından işlenir ve veri tabanına uygun bir formata dönüştürülür. Bu çözüm, özellikle enerji tüketimi düşük cihazlarda veriyi doğrudan buluta göndermenin oluşturduğu yükü azaltmak için kullanılır. Telegrafın ara bellekleme ve gecikmeli yazma özellikleri, bağlantı sorunlarında veri kaybını önleyerek sistemi daha verimli hale getirir.

Veriler hangi yöntemle gelirse gelsin, veri tabanında ölçüm adı, alan bilgileri, etiketler ve zaman damgasından oluşan ortak bir yapıya dönüştürülür. Böylece farklı kaynaklardan gelen ölçümler tek bir zaman çizgisi üzerinde birleştirilmiş olur. Bu yaklaşımın önemli bir başka bileşeni ise geçici depolama mekanizmasıdır. Geçiş katmanında kullanılan geri çekilme tekniği, bağlantı koptuğunda veriyi yerelde tutar ve bağlantı yeniden kurulduğunda aktarımı tamamlar. Bu süreç sistemin sürekliliğini korur.

Genel olarak veri aktarım yapısı, esneklik sunan, hatalara tolerans gösterebilen ve protokollere bağımlı kalmadan çalışabilen bir düzen oluşturur. Bu düzen sayesinde uç noktadan merkeze doğru ilerleyen veri akışı daha verimli bir hale gelir. Şekil 3'de InfluxDB veri alma mimarisi görselleştirilmiştir.



Şekil 3. InfluxDB Veri Alma Mimarisi.

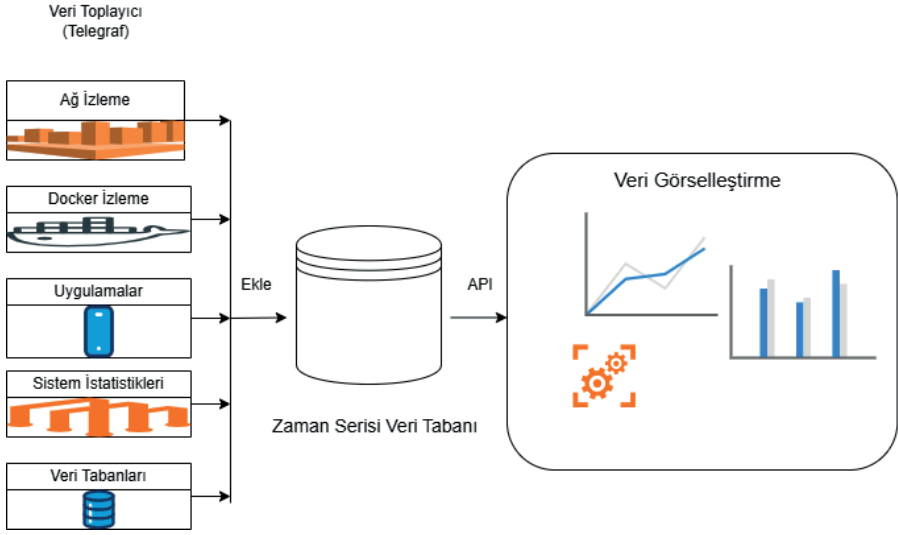
3.1.2. Veri Depolama

Veri depolama alanları, toplanan zaman serisi verilerinin uzun süre saklanmasını sağlayan temel yapılardır. Bu nedenle sisteme uygun bir zaman serisi veri tabanı ya da bulut ortamına dayalı bir depolama yöntemi seçmek önemli bir adımdır. Zaman serisi verileri genelde dört temel parça içerir. Bunlar verinin alındığı zamanı gösteren zaman damgası, ölçümün adı, ölçümle ilişkili alanlar ve açıklayıcı etiketlerdir. Bu yapı, verilerin düzenli ve okunabilir bir biçimde kaydedilmesini sağlar.

Zaman temelli veri tabanlarında bilgiler çoğu zaman veri havuzu olarak adlandırılan mantıksal bölümlerde tutulur. Bu havuzların her biri için ayrı bir saklama süresi tanımlanabilir. Örneğin basınca ait bir veri havuzunun saklama süresi bir ay olabilirken, finansal analizlerde kullanılan bir havuzda verilerin iki yıl boyunca korunması gerekebilir. Aynı veri havuzunda farklı ölçümler bir arada bulunabilir. Hava bilgisiyle ilgili bir ölçümle işlemci sıcaklığına ait bir ölçüm aynı alanda saklanabilir.

Depolama süreci belirli ilkeler üzerine kuruludur. Bunların ilki veri bütünlüğünün korunmasıdır. Zaman damgalarının ve etiketlerin doğru şekilde kaydedilmesi gerekir. Bir diğer ilke ise ölçeklenebilme özelliğidir. Gereksinime göre ölçüm sayısı ya da veri havuzu kapasitesi artırılabilir. Son olarak erişim güvenliği bulunur. Her havuzun erişim yetkisi yalnızca ilgili kullanıcı veya uygulama tarafından kullanılacak ayrı bir anahtar ile kontrol edilir.

Bu ilkeler bir arada çalıştığında sistemin bütünlüğü güçlenir ve depolama verimliliği artar. Dolaylı olarak sorguların daha hızlı yapılmasını da sağlar. Farklı kaynaklardan gelen verilerin tek bir zaman çizgisi altında düzenlenebilmesi, yönetim süreçlerini kolaylaştıran önemli bir avantaj oluşturur. Şekil 4'de InfluxDB Depolama Modeli aşamaları verilmiştir.

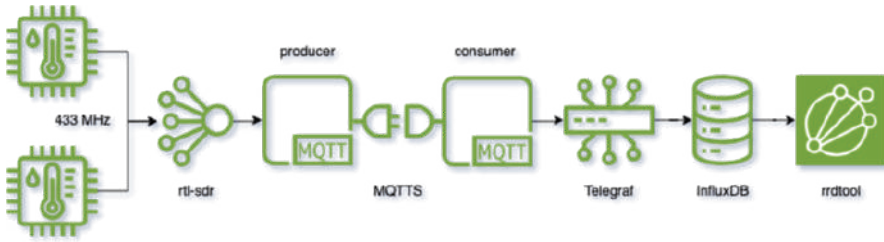


Şekil 4. InfluxDB Depolama Modeli.

3.1.2.1 InfluxDB Zaman Yapılandırılmış Birleştirme Ağacı (Time Structured Merge Tree)

InfluxDB'nin temel depolama mekanizması olan Zaman Yapılandırılmış Birleştirme Ağacı(ZYB) İngilizce karşılığı Time Structured Merge Tree (TSM) motoru, zaman serisi verilerini disk üzerinde sütun olarak saklanmasını sağlar. Bu düzende organize edilen veriler yüksek hızlı sorgu işlemlerine olanak sağlar. Bir ölçüm belirli bir zaman damgasına karşılık gelen alan değerlerini ve açıklayıcı etiketleri içeren kayıtlardan oluşturulur. Bu yapı, verinin çoğunlukla yalnızca bir kez yazıldığı mekanizma sunar. Buda birçok kez okunduğu zaman serisi uygulamaları için uygun bir mimari sunar (Shen ve ark., 2023).

Sonuç olarak ZYB tabanlı veri organizasyonu, zaman serisi verilerinin yönetiminde ölçeklenebilirlik katkı sağlar. Getirdiği avantajlar olan düşük gecikme ve enerji verimliliği açısından güçlü bir çözüm olarak değerlendirilebilir (Monotux Tech. 2024). Şekil5'de InfluxDB ZYB Motoru veri akışı görselleştirilmiştir.



Şekil 5. InfluxDB ZYB Motoru Veri Akış (Monotux Tech. 2024).

3.1.3. Veri İşleme

Zaman serisi verilerinin kullanışlı hâle getirilebilmesi için bazı işlemlere tabi tutulması gerekir. Bunların başında depolanan ölçümlerin düzenlenmesidir. Bu işlemleri özetle analiz, filtreleme ve dönüştürme işlemleri olarak sayılabilir. Bu aşamada ortalama, minimum, maksimum değer hesaplamaları, eğilim analizleri yapılır. Bu şekilde olay tespiti sağlanır. Bu işlemle makine öğrenmesi tabanlı kestirim modelleri gibi önemli veriler sağlanır. Nesne Tabanlı platformlarında bu işlemler istenildiğinde gerçek zamanlı olarak yürütebilir. Sonuç olarak sistem hem geçmiş verileri hem de o anda gelen akışı aynı anda değerlendirebilir.

Verinin işlenerek anlamlandırılması ve sistem içinde otomatik aksiyonlara dönüştürülmesi önemli bir yeniliktir. Bu veri yaşam döngüsünün üçüncü bileşenini oluşturur. Bu katman, verinin yalnızca depolanmasını değil aynı zamanda düzenli analizler sonucunda karar destek süreçlerine dönüşmesini de sağlar.

InfluxDB mimarisinde bu işlev “Görevler” bileşeni tarafından yerine getirilir. Görevler, veri işleme sorumluluğunu zamanlanmış sorgular üzerinden gerçekleştirir. Bu sorumluluk InfluxDB’nin kendi sorgu dili olan Flux ile tanımlanır. Her görev belirlenen zaman aralıklarında çalışır. Bu depolanan veri üzerinde özetleme ve filtreleme işlemi sağlar. Yeniden örnekleme veya koşul tabanlı hesaplamalar yürütebilir. Örneğin, sıcaklık sensörlerinden 10 saniyede bir toplanan ham ölçümlerin her bir dakikaya karşılık gelen ortalama değerlerinin üretildiği bir senaryo oluşturulabilir. Görevler modülü bu işlevi otomatik olarak gerçekleştirip sonuçları yeni bir veri havuzuna aktarabilir. Bu süreç hem depolama gereksinimini azaltır hem de eğilim analizi için optimize eder.

Görevler modülü yalnızca veri dönüşümünü sağlamaz. Aynı zamanda olay tabanlı uyarı mekanizmaları ile entegrasyon da sunar. Belirlenen eşik değerlerinin aşılması durumunda sistem dış servisler ile etkileşir. Örnek

vermek gerekirse Slack, HTTP Webhook gibi dış servisler üzerinden otomatik bildirimler gönderebilir. Bu özellik sayesinde InfluxDB, sadece bir veri saklama altyapısı olmaktan çıkarak. Gerçek zamanlı karar destek ve otonom olay yönetimi gerçekleştirebilen bir platform hâline gelir.

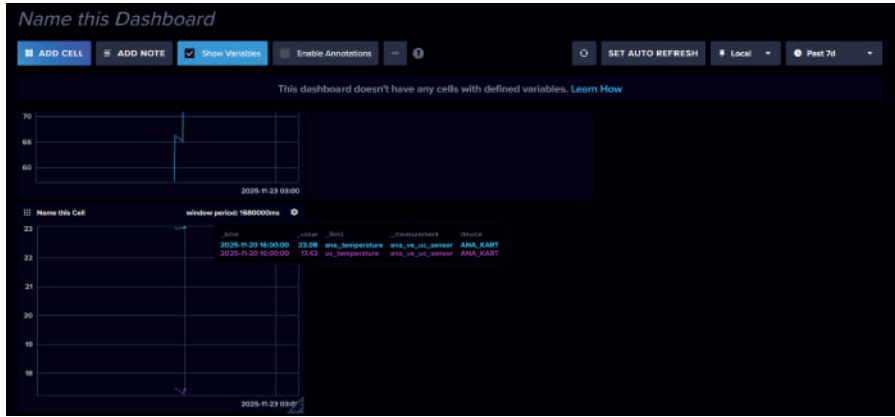
Görevler yapısı, normalde uygulama geliştiriciler tarafından manuel olarak kodlanması gerektirir. Buda birçok işlem adımını doğrudan veri tabanının içine taşır. Böylece uygulama mantığının kayda değer bir bölümü veri tabanında gömülü biçimde gerçekleşir. Sistem, yazılım katmanından bağımsız olarak kendi kendini yürüten bir mimariye dönüşür. Bu yaklaşım, klasik veri işleme modellerine kıyasla verinin işlendiği ortam ile uygulama mantığı arasındaki ayrımı azaltır. Diğer bir deyişle “gömülü işleme” anlayışını öne çıkarır.

Sonuç olarak InfluxDB Görevler modülü; zaman serisi verilerinin analiz için önemli yetenekler sunar ve uyarı üretme ve otomatik aksiyon döngüsünü bütüncül bir yapıda yönetir.

3.1.4. Veri Yönetimi ve Görselleştirme

Bu aşamada üretilen verilerin gösterimi söz konusudur. Kullanıcıların yorumlayabileceği biçimde sunulmak üzere görselleştirilir. Şekil 6'da verilen Dashboard adı verilen arayüz yapılarının dahilinde otomatik uyarı mekanizmaları ve raporlama araçları sunulur. Bu araçlar aracılığıyla sistemin genel durumu gözlemlenir. Sistemin performans göstergeleri ve olası anormallikler sürekli olarak izlenebilir. Böylece ham verilerden yola çıkarak, karar alma süreçlerini desteklenir. Veri kullanıcılar veya verinin hizmetine sunulduğu tüketiciler için anlamlı bilgilere dönüştürülmüş olur.

Bu katman aynı zamanda yetkilendirme süreçlerinin yürütür. Veri güvenliği ilkelerinin tanımlandığı ve erişim kayıtlarının tutulduğu yönetim bölümünü de kapsar. Temel amaç, operatörlerin sistem davranışını gerçek zamanlı olarak takip eder. Beklenmedik durumları erkenden tespit etmesi sağlanır. Bu doğrultuda veri odaklı kararlar verebilmesini gerçekleştir.

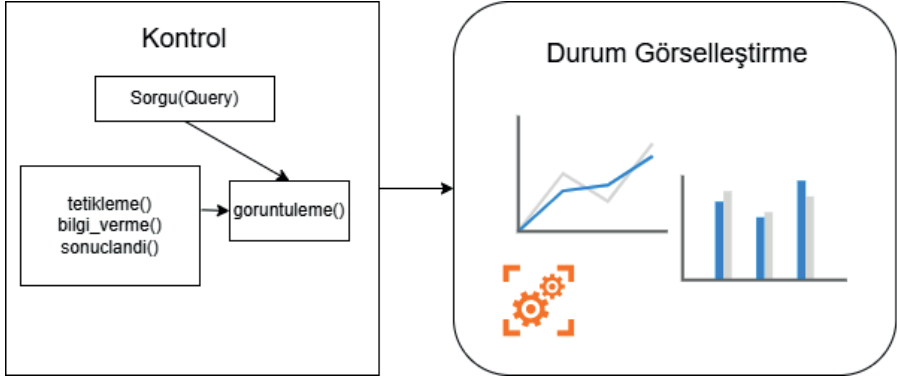


Şekil 6. InfluxDB Dashboard ekranı.

3.1.4.1. Kontrol & Uyarı Mekanizması

InfluxDB'nin "Kontrol & Uyarı" mekanizması bileşeni sunar. Bu mekanizma veri yönetimi katmanında gerçek zamanlı olay izler ve durum değerlendirme işlevi görür. Bu mekanizma, zaman serisi verileri üzerinde tanımlanan eşiklere veya beklenmeyen sapmalara dayalı olarak anomali tespit eder. Bu tür sistem için kritik durumları otomatik biçimde algılar. Buna bağlı olarak ilgili bildirim kanallarını devreye sokar. Sistemde kullanılan iki temel kontrol türü vardır. Bunlar Threshold Kontrol ve Deadman Kontrolleridir. Bu mekanizmalar sırasıyla belirlenen sınır değerlerin aşılması ile veri akışının durması veya belli süre boyunca güncellenmemesi durumunda devreye girer. Bu durumlarda uyarı üretmek üzere tasarlanmıştır. Böylelikle InfluxDB, yalnızca geçmiş veriyi geriye dönük incelemes. Bununla birlikte basit bir yapı olmaktan çıkıp, anlık olaylara tepki verebilen proaktif bir izleme platformuna dönüşmektedir.

Üretilen uyarılar, Slack, HTTP webhook gibi farklı bildirim kanalları aracılığıyla ilgili kullanıcılara sunulur. Bu şekilde operasyon ekiplerine de iletebilir. Veri yönetim katmanı, karar destek sistemleriyle entegre çalışır. Bu şekilde büyük ölçüde otonom bir izleme ve alarm altyapısına evrilmiş olur. Şekil 7'de kontrol & uyarı Akışı görseli verilmiştir.



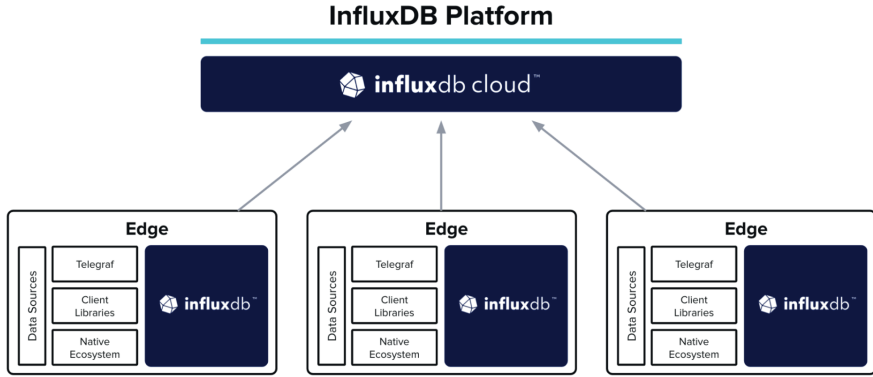
Şekil 7. Kontrol & Uyarı Akışı.

3.1.5. Uç Bulut Tabanlı Veri Yönetimi Yaklaşımı

Nesnelerin interneti mimarilerinde verilerin yalnızca merkezi bulut ortamında değil, aynı zamanda Uç katmanda da işlenmesine ihtiyaç duyulur. InfluxDB'nin Uç yaklaşımı, veri akışının hem yerel sistemlerde hem de bulut ortamında gerçekleştirir. Bu eşzamanlı işlem, sistemin tutarlı şekilde yönetilebilmesini mümkün kılar. Bu mimari modelde sensörlerden gelen ölçümler önce InfluxDB OSS üzerinde toplanır. Daha sonra ön analizlere tabi tutulur. Son olarak işlenmiş veya özetlenmiş veri kümeleri InfluxDB Cloud'a aktarılır.

Bu yapı sayesinde ağ bağlantısının kesildiği durumlarda dahi yerelde üretilen veriler kaybolmaz. Sistem çalışmaya devam eder. Bağlantı yeniden sağlandığında ise bulut tarafındaki veritabanı otomatik olarak güncellenir. Diğer bir değişle senkronizasyon tamamlanır. Bu mekanizma, gerçek zamanlı tepki vermesi gereken endüstriyel nesne tabanlı uygulamalarında önemli bir ayrıntıdır. Bu özellik gecikmenin düşürülmesine hem de bant genişliğinin daha verimli kullanılmasına katkı sunar.

InfluxDB'nin Uç mimarisi, Telegraf ile istemci kütüphanelerinin birlikte çalışması sayesinde esnek veri toplama imkanı sağlar. Telegraf'ın arabelleğe alma ve yeniden iletim kapasitesi yüksek ölçeklenebilirliğe sahip bir çözüm sunmaktadır Şekil 8'de InfluxDB Uç Bulut mimarisi: Uç cihazlardan buluta veri akışı verilmiştir(InfluxData, 2022).



Şekil 8. InfluxDB Uç Bulut Mimarisi: Uç Cihazlardan Buluta Veri Akışı(InfluxData, 2022).

3.2. Sensör Bazlı Uygulama Örnekleri

Nesnelerin interneti tabanlı uygulamalarda kullanılan sensörler, ürettikleri verinin yapısına göre düzenli veya düzensiz zaman serisi oluşturabilir. Bununla ilgili ayrıntılı bilgi 2.1 Zaman Serileri bölümünde verilmiştir. Düzenli zaman serilerinde ölçümler sabit aralıklarla elde edilir. Bu yapı akım gerilim veya ışık şiddeti gibi sürekli değişen bilgiler oluşur. Bu fiziksel olarak büyük verinin izlenmesine uygun bir temel sunar. Buna karşılık, düzensiz zaman serileri olayların gerçekleşme anlarına bağlı olarak veriler oluşur. Bu veriler çoğunlukla gaz sensörleri, mesafe sensörleri ya da anahtar temelli tetikleyiciler tarafından üretilir. Bu sensörlerin her biri farklı uygulama alanlarında kritik işlevlere sahiptir.

Düzenli ölçüm yapan DHT11, DHT21 veya BME280 gibi sensörler uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. İç ortam iklimlendirme, hava kalitesi takibi ya da enerji sistemlerinin performans değerlendirmesi gibi görevlerde etkin rol almaktadırlar. Düzensiz veri üreten sensörler ise genellikle olay tespiti gerektiren sistemlerde yer alır. Örneğin MQ2, MQ7 ya da MiCS5524 gaz sensörleri yalnızca belirli bir eşik değeri aşılması durumunda veri üretir. Bu sensörler ise güvenlik ve erken uyarı mekanizmalarının temel bileşenleridir.

Bu yapı, farklı sensör tiplerinin ürettiği veri akışlarının zaman serisi biçiminde nasıl işlendiğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Tablo 1, bu sensörlerin ölçtüğü değerleri, zaman serisi türlerini ve benimsedikleri uygulama alanlarını bütüncül bir biçimde özetlemektedir. Nesnelerin interneti sistemlerinde kullanılan sensörlerin ürettiği veri türleri ve bu verilerin zaman serisi yapıları Tablo 1’de özetlenmektedir.

Tablo 1. Nesnelerin İnterneti Sistemlerinde Kullanılan Sensörlerin Ürettiği Veri Türleri Ve Bu Verilerin Zaman Serisi Yapıları.

Sensör	Ölçtüğü Değer	Zaman Serisi Türü	Uygulama Alanı
DHT11, DHT21	Sıcaklık, Nem	Düzenli	İç ortam denetimi
BME280	Basınç, Sıcaklık, Nem	Düzenli	Hava kalitesi izleme
INA219	Akım, Gerilim	Düzenli	Güneş paneli performans ölçümü
LDR	Işık şiddeti	Düzenli	Otomatik aydınlatma
MQ2 / MQ7 / MQ135 / MiCS5524	Gaz varlığı	Düzensiz	Gaz kaçağı tespiti
HCSR04	Mesafe	Düzensiz	Otonom araç sistemleri
Reed Switch	Açık,Kapalı	Düzensiz	Güvenlik sistemleri
Alev Sensörü	Alev oluşumu	Düzensiz	Yangın erken uyarı

3.2.1 Mimari Akış Özeti

Bu bütünlük yapı, nesnelerin interneti mimarilerinde oluşturan verilerin Topla, Depola, İşle ve Yönet (Collect, Store, Process, Manage) adımlarının uygulanmasını sağlar. Bu işlemler mühendislik düzeyinde işlemler için fayda sağlar. Modüller bir yaklaşımla tasarlandığı için sistem ölçeklendirmeye uygun hâle gelir. Buda bileşenlerin farklı senaryolarda yeniden kullanılmasını mümkün kılar. Bu esneklik, mimarinin çeşitli nesneleri interneti uygulamalarına kolayca uyarlanabilmesini sağlayarak geniş kapsamlı bir kullanım alanı oluşturur.

3.3. Uygulama Alanları

Zaman serisi verilerine dayalı bu mimari yaklaşım pek çok avantaj sağlar. Bu avantajlar yalnızca teknik bir çözüm olarak sınırlanamamak gerekir. Pek çok sektörde kritik operasyonların temel altyapısı olarak kullanılmaktadır. Akıllı şehirlerden enerji yönetim sistemlerine kadar geniş bir yelpazede karşılık bulur. Bu yapı, gerçek zamanlı veri akışını işleyebilme yeteneği sayesinde sistemlerin daha verimli, güvenilir şekilde çalışmasına katkı sağlar. Ayrıca akıllı bina teknolojileri ve sağlık alanındaki uygulamalarda olduğu gibi insan odaklı süreçlerde karar destek mekanizmalarını güçlendirerek destekler. Bu

nedenle söz konusu mimari, günümüz nesnelerin interneti teknolojilerinde vazgeçilmez bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Bu mimari yapıyı özetlemek gerekirse:

- Akıllı şehir altyapıları,
- Enerji izleme sistemleri,
- Endüstriyel otomasyon,
- Tarım ve çevre izleme,
- Akıllı bina ve sağlık teknolojileri

gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde sensör tabanlı veri akışlarında kullanılan zaman serisi yönetimi değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde, cihazlardan gelen ölçümlerin ilk toplandığı katmandan başlayarak merkezi sunuculara kadar uzanan çok adımlı bir veri zinciri olduğu görülmüştür. Bu yapıda veri toplama, depolama, işleme ve sunum bölümleri birbirini tamamlayan adımlar şeklinde çalışmaktadır.

Sensörlerin çoğu zaman kısa aralıklarla veri göndermesi, klasik veri tabanlarının bu yoğun akışı karşılamasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle zaman odaklı veri tabanlarının tercih edilme nedeni daha net ortaya çıkmaktadır. Sütun temelli depolama yaklaşımının sunduğu avantajlar sayesinde, büyük veri setlerinde okuma ve yazma hızının belirgin biçimde arttığı anlaşılmaktadır.

Veri kaynağının hangi süreçlerden geçtiğini izlemeye yarayan köken takip mekanizmalarının, güvenilirlik açısından önemli bir katkı sunduğu da görülmüştür. Böyle bir izleme, hataların nerede oluştuğunu anlamayı kolaylaştırdığı için özellikle kritik uygulamalarda tercih edilmektedir.

Zaman serisi verilerinde kullanılan sıkıştırma yöntemleri de dikkate değer bir sonuç vermektedir. Depolama alanı sınırlı olan sistemlerde bu sıkıştırma işlemlerinin performansı belirgin ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Cihazların bulunduğu uç bölgelerde yapılan ön işlemler hem veri miktarını azaltmakta hem de merkezi sistemlerin yükünü hafifletmektedir. Bu iki etki birleştğinde, karar verme süreçlerinin daha hızlı yürütüldüğü görülmektedir.

Genel değerlendirmede, zaman serisi veri yönetiminin yalnızca saklama odaklı bir konu olmadığı anlaşılmaktadır. Verilerin işlenmesi, eşik değerlerine göre uyarı üretilmesi ve görsel arayüzlerde yorumlanabilir hale getirilmesi

sistem bütünlüğüne önemli katkı sağlamaktadır. Özellikle anlık izleme gerektiren uygulamalarda bu yaklaşım temel bir gereklilik haline gelmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, sensör temelli sistemlerin ürettiği zaman serisi verilerinin uç bölgeden merkezi yapılara kadar ilerleyen sürecini ele almıştır. Verinin nerede toplandığı, nasıl işlendiği ve hangi depolama tekniklerinin tercih edildiği bütüncül bir çerçevede incelenmiştir. Yapılan analizler, zaman odaklı veri tabanlarının bu sürece önemli katkı sağladığını göstermektedir. Bu tür veri tabanlarının yüksek yazma kapasitesi ve zaman temelli sorgu özellikleri, geleneksel yöntemlere göre belirgin avantaj sunmaktadır.

Uç bölgede yer alan cihazlarda yapılan ön analizler ve geçici depolama yöntemleri, gecikme süresini azaltarak sistemin daha hızlı tepki vermesini sağlamaktadır. Bu nedenle geniş kapsamlı uygulamalarda uç, sis ve merkez bölgelerin birlikte çalıştığı mimari yapıların tercih edilmeye devam edeceği öngörülmektedir.

Zaman temelli veri tabanlarının sahip olduğu görev, uyarı ve kontrol mekanizmaları da dikkat çekici bir katkı sunmaktadır. Bu mekanizmalar sayesinde veri tabanı yalnızca bir saklama alanı olmaktan çıkmakta, aynı zamanda işlem ve denetim fonksiyonları da üstlenmektedir. Özellikle enerji izleme, endüstriyel izleme gibi alanlarda insan müdahalesine gerek kalmadan tepki verebilen modeller ön plana çıkmaktadır. Gelecek dönemlerde bu otomatik karar veren yapıların daha fazla kullanılacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- de Oliveira, M. A., da Rocha, A. M., Puntel, F. E., & Cavaleiro, G. G. H. (2023). Time series compression for iot: A systematic literature review. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2023(1), 5025255. <https://doi.org/10.1155/2023/5025255>
- Hu, R., Yan, Z., Ding, W., & Yang, L. T. (2020). A survey on data provenance in IoT. *World Wide Web*, 23(2), 1441-1463. <https://doi.org/10.1007/s11280-019-00746-1>
- InfluxData. (2022, Haziran). edge data replication: Keeping your time series data safe and available. <https://www.influxdata.com/blog/edge-data-replication/>
- Khelifati, A., Khayati, M., Dignös, A., Difallah, D., & Cudré Mauroux, P. (2023). TSM bench: benchmarking time series database systems for monitoring applications. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 16(11), 3363-3376. <https://doi.org/10.14778/3611479.3611532>
- Monotux Tech. (2024, Ekim). Telegraf MQTT. <https://www.monotux.tech/posts/2024/10/telegraf-mqtt/>
- Naqvi, S. N. Z., & Yfantidou, S. (2017). Time series databases and influxdb, université libre de bruxelles. *Advanced databases winter semester, 2018*.
- Shah, B., Jat, P. M., & Sashidhar, K. (2022). Performance study of time series databases. <https://arxiv.org/abs/2208.13982>
- Shen, C., Ouyang, Q., Li, F., Liu, Z., Zhu, L., Zou, Y., ... & Li, F. (2023). Lindorm ZSVT: A cloud native time series database for large scale monitoring systems. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 16(12), 3715-3727. <https://doi.org/10.14778/3611540.3611559>

Hidroelektrik Santrallerinde Senkron Generatör Seçimi için AHP–VIKOR Tabanlı Çok Kriterli Bir Karar Yaklaşımı

Gülsüm Yıldırım¹

Emin Yıldırım²

Özet

Bu çalışmada, hidroelektrik santrallerinde elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak en uygun senkron generatör tipinin belirlenmesi amacıyla çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerine dayalı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Günümüzde enerji üretim sistemlerinde verimlilik, maliyet, güç yoğunluğu ve sürdürülebilirlik gibi kriterlerin önemi giderek artmakta; bu durum, generatör seçiminde tek bir performans göstergesine dayalı yaklaşımları yetersiz kılmaktadır. Bu kapsamda çalışma, farklı fiziksel ve elektromanyetik özelliklere sahip üç alternatif generatör topolojisini ele almaktadır: bakır iletkenli elektriksel uyartımlı senkron generatör, alüminyum iletkenli elektriksel uyartımlı senkron generatör ve sürekli mıknatıslı senkron generatör.

Seçim sürecinde; verim, stator ve rotor maliyeti, nominal yük torku, ekonomik çalışma torku ve güç yoğunluğu olmak üzere beş temel kriter dikkate alınmıştır. Kriterlerin göreceli önem ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile belirlenmiş, alternatiflerin sıralanması ise VIKOR yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. AHP sonuçları, maliyet ve verim kriterlerinin karar sürecinde en yüksek ağırlığa sahip olduğunu göstermiştir. VIKOR analizi sonuçlarına göre, düşük maliyet ve yüksek güç yoğunluğu avantajları sayesinde alüminyum uyartım sargılı senkron generatör en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Bakır uyartım sargılı generatör ikinci sırada yer alırken, yüksek mıknatıs maliyeti nedeniyle sürekli mıknatıslı senkron generatör en düşük uygunluk değerine sahip olmuştur.

1 Öğr. Gör. Dr., Düzce Üniversitesi, gulsumyildirim@duzce.edu.tr ORCID: 0000-0001-6075-7310

2 Doç. Dr., Düzce Üniversitesi, eminyildirim@duzce.edu.tr ORCID: 0000-0002-6003-6780

Elde edilen sonuçlar, hidroelektrik santrallerinde generatör seçiminin yalnızca elektromanyetik performansa değil, aynı zamanda ekonomik ve stratejik faktörlere dayalı bütüncül bir yaklaşımla yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

1. GİRİŞ

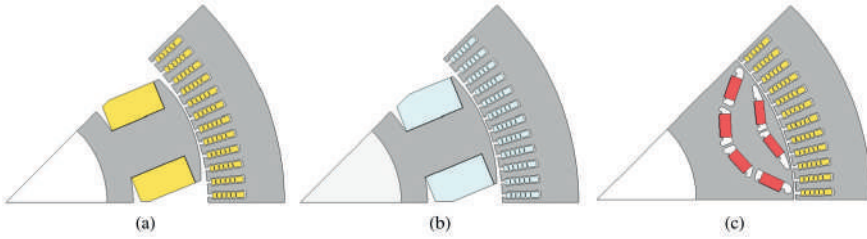
Tüm dünyada PV'e dayalı GES'lerin toplam kurulu güçteki payındaki artışın devam etmesine karşın; elektrik üretiminde termik, nükleer ve hidrolik santrallerin oranı hala oldukça büyüktür. Bu santrallerde çoğunlukla elektriksel uyartımlı senkron generatörler (EUSG) kullanılmaktadır. Bazı rüzgar türbinlerinde de senkron generatörler kullanılmaktadır ve dünyada üretilen toplam elektrik enerjisinde senkron generatörün payı %70-80 aralığındadır. Enerji üretiminin yanında senkron makineler, elektrikli araç itki sistemleri ve pek çok endüstriyel uygulamada da kullanılmaktadır. Senkron makinelerin çalışması için gerekli olan kutup manyetik alanı, elektriksel DC uyartım sargıları veya sürekli mıknatıslar ile sağlanabilir. Elektriksel uyartımlı senkron makinelerde kutup manyetik alanının DC uyartım akımı ile kolayca denetlenmesi, geniş bir tork-hız karakteristiğinde kullanılabilmelerine olanak sağlar. Bu nedenle sürekli mıknatıslı senkron makinelerle göre elektrikli araç uygulamalarında tork karakteristiği açısından avantajlıdır. Aynı tork karakteristiğini sürekli mıknatıslı senkron makineler ile elde edebilmek için karmaşık akı kontrol yöntemlerinin uygulanması gerekir. Diğer taraftan sürekli mıknatıslar ile özdeş manyetomotor kuvveti elektriksel uyartım ile sağlamak için, kutup ayaklarının ve kutup sargılarının boyutları arttırılmalıdır. Bu nedenle elektriksel uyartımlı senkron makinelerin güç yoğunlukları mıknatıslı senkron makinelerle göre daha düşüktür. Mıknatıs kullanımı, güç yoğunluğunu arttırırken maliyeti de ciddi oranda arttırır. Bu nedenle düşük maliyetli ferit mıknatısların kullanımı, mıknatıs destekli relüktans motorlar ve hatta mıknatıs kullanmayan relüktans motor ve asenkron motorların kullanımı pek çok uygulamada tartışılmaktadır.

Uygulamanın isterlerine göre seçilebilecek motor topolojileri değişkenlik gösterir. Bazı uygulamalarda hangi topolojinin seçileceği tartışılmasız bir gerçekken, bazı uygulamalarda aynı isterleri gösteren birden fazla motor topolojisi olabilir. Rüzgar türbinlerinde, rüzgar hızının kararlılığı ve değişken çalışma hızı esnekliği dikkate alınarak generatör seçimi yapılır. Örneğin, sınırlı değişken hızlı sistemlerde çift beslemeli asenkron generatör (DFIG) tek seçenek olarak gösterilir [1]. Çünkü generatörün kayma parametresi, bu generatörün senkron hızın $\pm\%25$ çalışma hızlarında çalışabilmesine olanak sağlar. Üstelik bunun için generatörün rotor sargılarına bağlanacak düşük güçlü bir güç elektroniği dönüştürücüsü kullanmak yeterlidir. Diğer

taraftan, tamamen değişken rüzgar hızlarında çalışan bir rüzgar trbisinde ise; tam güçte bir g dönüştürücü ile birlikte sürekli mıknatışlı senkron generatör (SMSG), EUSG veya sincap kafesli asenkron generatör (SCIG) tercih edilebilir.

Elektrikli araçlarda ise yüksek güç yoğunluğu ve sabit gte çalışma hız aralığı itki motor seçiminde öncelikli kriterlerdir. [2]'de elektrikli araç uygulamaları için Toyota Prius 2010 modelinde kullanılan gömülü mıknatışlı senkron motor, asenkron motor, uyarım sargılı senkron motor, senkron relüktans motor, mıknatış destekli senkron relüktans motor ve değişken akılı senkron relüktans motor verim ve güç yoğunluğu açısından karşılaştırılmıştır. Uyarım sargılı senkron motor, senkron relüktans motor ve değişken akılı senkron relüktans motor ise düşük tork yoğunluğu ve verim nedeniyle elektrikli araç uygulamaları için karşılaştırmaya dahil edilmemiştir.

Bu çalışmada hidroelektrik santrallerinde mekanik tahrik sistemleri ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak en uygun senkron generatörün (alternatörler) seçimi incelenmiştir. Sürekli mıknatışlı senkron generatör, alüminyum iletken kullanan EUSG ve bakır iletken kullanan EUSG seçim alternatifi olarak belirlenmiştir. Bakır, alüminyum ve mıknatışın senkron generatördeki varlığı generatörün fiziksel, elektriksel ve elektromanyetik performansına doğrudan etki etmektedir. 315 kW, 5000 rpm özellikleri için belirlenen seçim alternatifleri şekil 1'de görülmektedir [3]. EUSG'de, uyarım sargısı ve endüvi sargısı aynı iletken tipinde belirlenmiştir. SMSG'de ise bakır iletken kullanılmıştır.



şekil 2. a) Bakır iletkenli EUSG, b) Alüminyum iletkenli EUSG ve c) SMSG

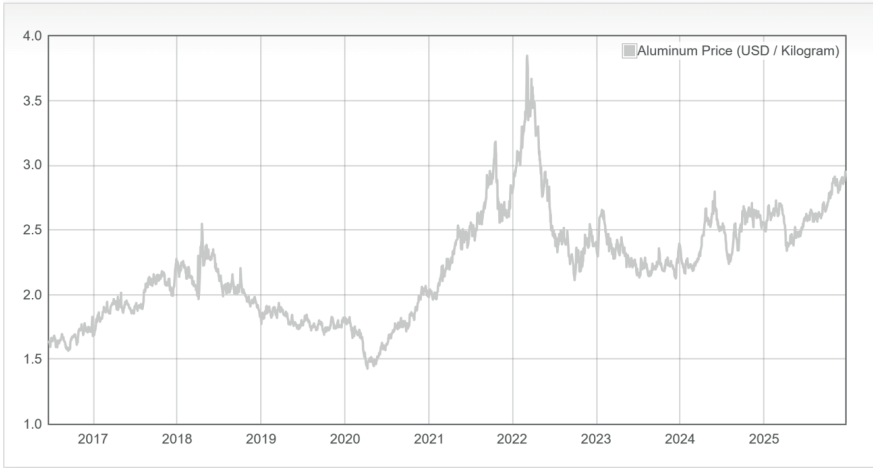
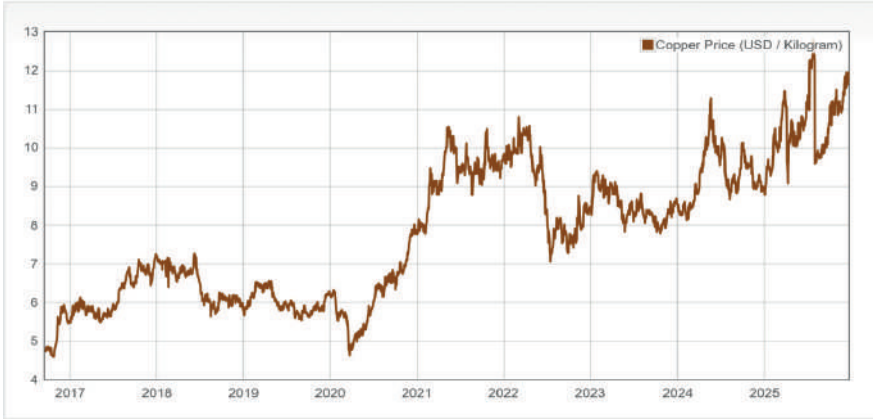
Aynı alışma isterlerini sağlayan alternatiflerden birkaçı, seçim kriterlerinden bazılarında üstünken, diğerlerinde zayıf olabilir. Bir alternatifin üstün olmadığı bir seçim kriterinde diğer alternatiflerin performansı yüksek olabilir. Bu durumda tüm seçeneklerin her bir seçim kriteri bazındaki üstünlüğü ve sakıncası dikkate alınarak bir karar vermek gerekir. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri bu amaca hizmet eder.

2. KARŞILAŞTIRMA KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ

SMSG'lerde Neodyum, disprosyum gibi nadir toprak elementlerinden üretilen yüksek manyetik enerji yoğunluklu mıknatıslar kullanılır. Elektriksel iletkenlik kayıpları olmadığından, SMSG'lerin verimlerinin de yüksek olması beklenir. Bu üstünlüklerinin yanında, çalışma koşullarına bağlı olarak mıknatısların demanyetizasyon ve korozyon riskleri vardır. Ayrıca endüstriyel anlamda kullanılan nadir toprak elementlerinin %90'ından fazlası Çin'de üretilmektedir. Günümüzde stratejik ürün olarak bu elementler, ülkelerin ticaret savaşlarında önemli bir rol oynar. SMSG'lerin üretim maliyetinde mıknatıs kaleminin yüksek olması ve temin edilebilirlik riskleri de seçimde dikkate alınmalıdır.

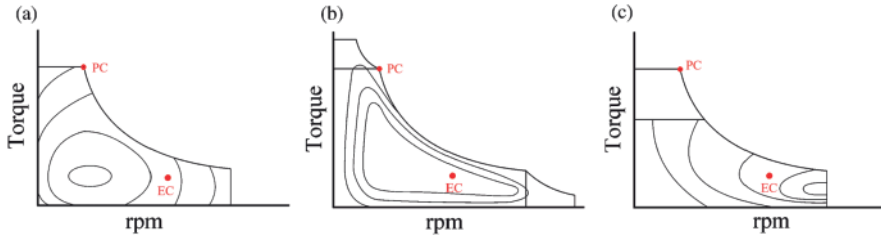
Bir senkron makinenin maliyet, güç yoğunluğu ve verimlilik gibi kritik seçim kriterlerine etki eden bir diğer önemli bileşeni sargılardır. Elektrik makinelerinde genelde bakır veya alüminyum sargılar kullanılır. Bakırın 20 °C'deki elektriksel direnci $1,68 \times 10^{-8} \Omega m$ iken alüminyumun $2,82 \times 10^{-8} \Omega m$ 'dir. Ancak bakırın korozyon dayanımı zayıftır. Ayrıca Şekil 2'de görüldüğü gibi bakır ve alüminyum fiyatları arasında dönemsel olarak farklılıklar görünse de ciddi farklılıklar vardır [4]. Bakırın özgül ağırlığı 8,8-8,95 gr/cm³ iken Alüminyumun özgül ağırlığı 2,7 gr/cm³ civarındadır. Bu nedenle makine seçiminde maliyet, ağırlık ve güç yoğunluğu önemli bir kriter ise iletken türlerinin etkisi de dikkate alınmalıdır. Güç yoğunluğu hacim başına dikkate alınabileceği gibi ağırlık başına da incelenebilir. Hidroelektrik güç santrallerinde hacimden ziyade ağırlık önemli olacağından gravimetrik güç yoğunluğu dikkate alınmalıdır.

Copper Prices for the Last 10 Years



Şekil 3. Bakır ve Alüminyumun fiyat değişimi (grafiklerin dikey eksenini birim maliyet olarak -USD/kg, yatay eksenini yıl olarak verilmiştir)

Elektrik makinelerinin yüklenme performansı, tork-hız karakteristiği üzerinden incelenir. Şekil 3'te gömülü mıkmatışlı senkron makine, DC makine ve elektriksel uyarıtımlı senkron makinenin verim haritaları karşılaştırmalı olarak verilmiştir [5]. DC motor, yüksek hız - düşük tork bölgesinde daha yüksek verimlere sahipken gömülü mıkmatışlı motor ise maksimum verimi düşük hız - düşük tork bölgesinde göstermektedirler. Bunun yanında elektriksel uyarıtımlı senkron makinenin maksimum verimde olan çalışma bölgesi oldukça geniştir. Herhangi bir uygulama için seçilecek makinenin, nominal yük torku (PC) ve yüksek hız ekonomik çalışma torku (EC) noktalarında çalışırken gösterdiği verim değerleri dikkate alınmalıdır.



Şekil 4. a) IPM, b) EUSM ve DC motorda tork-hız grafiklerine göre verim haritaları [2]

3. AHP-VIKOR YÖNTEMİ

Karar problemlerinde, seçimi belirleyen birden fazla kriter söz konusu ise ve tüm kriterler için mutlak bir birinci yoksa seçim için tek kriteri dikkate almak yanıltıcı olabilir. Tüm kriterleri aynı karar içerisinde değerlendirmek için ÇKKV yaklaşımları kullanılır [6].

En uygun seçime ulaşmak için tüm kriterler aynı önem derecesine sahip olabileceği gibi kriterlerden bazıları seçim için diğerlerinden daha önemli ve etkili de olabilir. Bu gibi durumlarda kriter ağırlıklarını belirlemek için en etkili yöntemlerden biri AHP yöntemidir [7].

AHP yöntemi için öncelikle alternatifler ve alternatiflerin seçimi için belirleyici kriterler belirlenir. Daha sonra uzman görüşü alınarak kriterlerin seçim için birbirlerine nispetle önem öncelikleri belirlenir. Bunun için kriterlerin kendi arasında ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Karşılaştırma matrisi oluşturulurken Saaty ölçeği [8] Tablo 1 kullanılır.

Tablo 1. Saaty Ölçeği [8]

Değer	Anlamı
1	Eşit derecede önemli
3	Biraz daha önemli
5	Kuvvetli derecede önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli
9	Aşırı derecede önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Tablo 2'de 7 kritere bağlı bir seçim için Karşılaştırma Matrisi örneği verilmiştir. Örnekte kriterlerin önem sırası $C1 > C2 > C3 > C4 > C5$ olacak şekilde belirlenmiştir. Karşılaştırma matrisleri belirlendikten sonra her bir

sütun Eşitlik 1'deki formülle normalize edilir. Böylece Eşitlik 2'de formülü verilen her bir satırın aritmetik ortalaması kriterlerin ağırlık vektörünü (w_i) oluşturur.

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \quad (2)$$

Tablo 2. AHP Karşılaştırma Matrisi Örneği

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	5	7	9
C2	1/3	1	3	5	7
C3	1/5	1/3	1	3	5
C4	1/7	1/5	1/3	1	3
C5	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Kriter ağırlıkları AHP ile belirlendikten sonra VIKOR yöntemi uygulayabilmek için öncelikle kriterler ve alternatiflerin karar matrisi oluşturulur [9]. Karar matrisi oluşturulduğunda kriterlerin alternatifler bakımından maksimize edilmesi mi yoksa minimize edilmesi mi faydalı olduğuna karar verilir. Böylece maksimize edilmesi istenen kriterlerin en büyük değeri ve minimize edilmesi istenen kriterlerin en küçük değeri seçimin en iyi değerlerini (f_j^*) ve maksimize edilmesi istenen kriterlerin en küçük değeri ve minimize edilmesi istenen kriterlerin en büyük değeri seçimin en kötü değerlerini (f_j^-) verir. Elde edilen en iyi ve en kötü değerler kullanılarak Eşitlik 3'de verilen " S_i " ve Eşitlik 4'te verilen " R_i " hesaplanır. " S_i " ve " R_i " alternatiflerinin en iyi çözüme uzaklığını ve en kötü çözüme uzaklığını ifade etmektedir

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (3)$$

$$R_i = \max_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (4)$$

Son olarak “ S_i ” ve “ R_i ” değerleri kullanılarak Eşitlik 5’te verilen “Çözüm indeksi (Q_i)” hesaplanır. En küçük Q_i değerine sahip alternatif en iyi alternatifi verir.

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (5)$$

Q_i değerinin güvenilir bulunması için iki şarta dikkat edilir. Şartlardan birincisi; Q_i sıralamasına göre en iyi 2 alternatif arasındaki fark $\frac{1}{m-1}$ değeri ile eşit yada büyük olmalıdır. Burada “ m ” alternatif sayısıdır. İkinci şart ise; Q_i sıralamasına göre en iyi alternatifin, “ S_i ” ve “ R_i ” sıralamalarının en az birinde daha en iyi sırada olmalıdır. Bu iki koşulun sağlanması VIKOR yöntem çözümünün tutarlılığını ortaya koyar.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, “Bakır uyartım sargılı senkron generatör (A1)”, “Alüminyum uyartım sargılı senkron generatör (A2)” ve “IPM (A3)” için “Verim (%) (K1)”, “Stator Sargısı + Rotor Bobini veya Kalıcı Mıknatısların Maliyeti (\$) (K2)”, “Nominal yük torku (Nm) (K3)”, “Ekonomik çalışma torku (Nm) (K4)” ve “Güç yoğunluğu (kW/kg) (K5)” kriterlerine göre değerlendirilerek, en uygun alternatifin bulunması amaçlanmıştır. Alternatiflerin seçiminde birden fazla kriter etkili olduğu için ÇKKV yöntemlerinde hibrit AHP-VIKOR yöntemi kullanılmıştır.

Kriterler için K1, K3, K4 ve K5 maksimize, K2 kriterinin ise minimize edilmesi alternatiflerin faydasına olduğu değerlendirilmiştir. Bu aşama alternatifler ve kriterler için oluşturulmuş Karar Matrisi Tablo 3’te verilmiştir. Tablo 3’teki veriler referans çalışmadan alınmıştır [3].

Tablo 3. Karar Matrisi [9]

Alternatifler Kriterler	A1	A2	A3
K1	97,90	97,30	97,80
K2	139,20	12,90	182,30
K3	611,00	612,00	615,00
K4	93,00	91,00	96,00
K5	6,34	8,11	6,31

Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması için kriterlerin kendi aralarında oluşturulmuş ikili karşılaştırma matrisi Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te görüleceği üzere K1 ve K2 kriterleri seçim için en önemli kriterler olarak değerlendirilmiştir ve önem ağırlıkları eş değerdir. Önem sırasını K3 kriteri takip etmektedir. K3 ve K4 kriterlerinin seçim üzerindeki önemleri diğer kriterler nispeten daha azdır.

Tablo 4. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	1	3	5	5
C2	1	1	3	5	5
C3	1/3	1/3	1	3	3
C4	1/5	1/5	1/3	1	1
C5	1/5	1/5	1/3	1	1

İkili karar matris elemanları kullanılarak Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 hesaplanmıştır. Böylece AHP yöntemi ile Tablo 5'te verilmiş olan kriter ağırlıkları (w_i) elde edilmiştir.

Tablo 5. Kriter ağırlık değerleri

Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5
w_i	0,30	0,30	0,20	0,10	0,10

VIKOR yöntemi uygulaması için öncelikle kriterlerin maksimize ya da minimize edilmesi durumuna göre alternatiflerin en iyi ve en kötü

performansları belirlenir. Belirlenmiş olan en iyi ve en kötü değerler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. En iyi ve en kötü değerler

Kriter	f^*	f^-	Yön
C1	97,9	97,3	max
C2	12,9	182,3	min
C3	615	611	max
C4	96	91	max
C5	8,11	6,31	max

Daha sonra Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'te verilen formüllerle kriter ağırlıkları da kullanılarak " S_i " ve " R_i " değerleri hesaplanır. Son olarak Eşitlik 5'te verilen formülle alternatiflerin " Q_i " değerleri hesaplanır. " S_i ", " R_i " ve " Q_i " değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Alternatiflerin performans sonuçları

Alternatif	S_i	R_i	Q_i	Sıra
A2	0,19	0,1	0	1
A1	0,36	0,3	0,44	2
A3	0,58	0,3	1	3

Nihai sonuca göre en düşük maliyet, en yüksek güç yoğunluğu ve kabul edilebilir seviyede verim özellikleri sayesinde "Alüminyum uyartım sargılı generatör" en uygun alternatif olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek verime sahip olmasına rağmen yüksek maliyete sahip olması nedeniyle "Bakır uyartım sargılı generatör" uygunluk sırasında 2. olmuştur. Tork açısından güçlü olmasına rağmen çok yüksek mıknatıs maliyetleri nedeniyle, fiyat kriterinin önem ağırlığının yüksek olmasının da katkısıyla uygun olmaya en uzak alternatifin "IPM" olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, hidroelektrik santrallerinde kullanılacak senkron generatör tipinin seçimi problemi, hibrit AHP-VIKOR yöntemi kullanılarak çok kriterli bir karar verme çerçevesinde ele alınmıştır. İncelenen alternatifler; bakır uyartım sargılı senkron generatör, alüminyum uyartım sargılı senkron generatör ve sürekli mıknatıslı senkron generatördür. Seçim sürecinde verim,

maliyet, nominal tork, ekonomik çalışma torku ve güç yoğunluğu kriterleri birlikte değerlendirilmiştir.

AHP analizi sonuçları, maliyet ve verim kriterlerinin karar sürecinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. VIKOR yöntemi ile elde edilen sıralama sonuçlarına göre, alüminyum uyarım sargılı senkron generatör en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Alternatiflerin karşılaştırmasında referans çalışmadaki veriler dikkate alınmıştır. Sonuçta, alüminyum iletkenin düşük maliyeti ve yüksek güç yoğunluğu sağlaması etkili olmuştur. Bakır uyarım sargılı senkron generatör, yüksek verim değerlerine rağmen maliyet dezavantajı nedeniyle ikinci sırada yer almıştır. Sürekli mıknatıslı senkron generatör ise yüksek mıknatıs maliyetleri ve tedarik riskleri nedeniyle uygunluk açısından son sırada kalmıştır.

Sonuç olarak, hidroelektrik santrallerinde generatör seçiminin yalnızca teknik performans kriterleriyle değil, aynı zamanda ekonomik, stratejik ve tedarik risklerini de içeren çok boyutlu bir değerlendirme ile yapılması gerektiği ortaya konulmuştur. Çalışmada kullanılan AHP-VIKOR yaklaşımı, benzer enerji üretim ve elektrik makinesi seçim problemleri için de uygulanabilir nitelikte genel bir karar destek çerçevesi sunmaktadır.

Referanslar

- [1] Patil, N. S., & Bhosle, Y. N. (2013, February). A review on wind turbine generator topologies. In 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC) (pp. 625-629). IEEE
- [2] Zhu, Z. Q., Chu, W. Q., & Guan, Y. (2017). Quantitative comparison of electromagnetic performance of electrical machines for HEVs/EVs. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 1(1), 37-47.
- [3] Petrelli, G., Nuzzo, S., Zou, T., Cutuli, G., Barater, D., & Gerada, C. (2024, September). On comparing aluminum and copper in wound field synchronous motors for traction applications. In *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1-7). IEEE.
- [4] <https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php>
- [5] De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., & Leijon, M. (2011). Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 61(2), 475-484.
- [6] Stojčić, M., Zavadskas, E. K., Pamučar, D., Stević, Ž., & Mardani, A. (2019). Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. *Symmetry*, 11(3), 350.
- [7] Podvezko, V. (2009). Application of AHP technique. *Journal of Business Economics and management*, (2), 181-189.
- [8] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- [9] Jahan, A., Mustapha, F., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., & Bahraminasab, M. (2011). A comprehensive VIKOR method for material selection. *Materials & Design*, 32(3), 1215-1221.

Dalga Enerjisi Uygulamaları İçin Akı- Anahtarlama Tipi Doğrusal Jeneratörde Kalıcı Mıknatıs Seçiminin Etkisi

Serdal Arslan¹

Özet

Dalga enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi maliyetli bir süreç olmasına karşın birim başına nispeten yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Türkiye'nin coğrafi konumu ve dalga enerjisi potansiyeli açısından önemli yere sahip olsa da gerçekleştirilen çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu bölümde literatürde dalga enerjisi üzerine yer alan özellikle doğrusal jeneratör özelinde kapsamlı araştırma gerçekleştirilmiştir. Özellikle kur kaynaklı değişimden etkilenen nadir toprak elementinin azaltılmış veya kullanılmaması önemlidir. Çalışma kapsamında NdFeB, AlNiCo, SmFeN, Samaryum S24 ve Ferrit Y30 mıknatısları kullanılarak oluşturulan akı anahtarlama tipi doğrusal jeneratör modelleri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Geçici hal analizleri sonucunda, NdFeB ve SmFeN mıknatıslarının benzer seviyelerde maksimum indüklenen gerilim ürettiği, buna karşın Ferrit ve AlNiCo mıknatısların daha düşük performans sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, SmFeN mıknatıslarının nadir toprak elementi kullanımını azaltma potansiyeli sunarken, NdFeB mıknatıslara yakın elektromanyetik performans sağlayabildiğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, dalga enerjisi uygulamalarında maliyet etkin ve sürdürülebilir mıknatıs alternatiflerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

1 Doç.Dr.Serdal Arslan, Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Meslek Yüksekokulu Elektrik Programı, Şanlıurfa, Türkiye, serdalararslan@harran.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1187-5633

1. GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin git gide azalması ve fosil yakıta bağlı yaşanan krizler enerji kaynaklarına yönelik çalışmaları gün geçtikçe artırmaktadır. Bu kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmesi; kişi başına enerji tüketiminin artışı, elektrik enerjisinin fatura maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel sebeplerden dolayı önemlidir. Son yıllarda özellikle yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde dalga enerjisi üzerine yapılan çalışmalar (ticari firmalar ve araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen) enerji hasatlama teknolojileri içerisinde de değerlendirilebilir [1]. 1799 yılında dünyanın ilk dalga enerjisi dönüştürücüsü üzerine patent alan Girard [2]'tan günümüze dalga enerjisinin teknolojik olgunluğu, bakım zorlukları ve yüksek kurulum maliyetleri düşünüldüğünde dalga teknolojisinin geliştirilmesi için devlet desteği gerekli görünmektedir [3]. Japonya, Hindistan, İngiltere, Portekiz, İsveç, Norveç, İrlanda, ABD, Danimarka vb., gibi kıyı şeridi olan ülkeler dalga enerjisi dönüştürme teknolojileri üzerine halen çalışmaktadır [4-8]. 9 nolu referansta bu alanda ilk çalışmaların çoğu Avrupa'da Salter ve Evans tarafından İngiltere'de ve Falnes tarafından Norveç'te yapıldığı belirtilmiştir. SeaBeaV1; dalga enerjisi dönüştürücüsünün kavramsal tasarımını geliştirmek için sisteme ait bileşenleri detaylı olarak vermiştir [9]. İtalya için yıllık dalga enerjisi tahmini yapılmıştır [10].

Dalga enerjisi ve teknolojileri hakkında detaylı incelemeye 3, 7, 11-15 numaralı referanslardan başlanabilir. Bu kaynaklarda dalga enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için çeşitli yöntemler incelenmiştir. 3 numaralı referansta; dalga enerjisi dönüştürücü sistemleri, jeneratör, güç elektroniği ve kontrol yöntemleri, dalga tipleri ve güç kalitesi konularına odaklanarak literatürdeki genel çalışmalar irdelenmiştir. Ayrıca 7 numaralı referansta dalga enerjisi projeleri değerlendirilmiştir. Ülkemizde gerçekleştirilen çalışmalar sınırlıdır ancak ülkemiz için dalga enerjisinin çevresel ve ekonomik açıdan önemini ele alan çalışmaların incelenmesi elzemdir [16,17]. TEMSAN ve BOREN iş birliği ile Sakarya'nın Karasu ilçesinde kıyından 100 metre açıktaki 5 kWh'lık enerji kapasiteli dalga enerjisi dönüştürücüsünden elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir [17]. Başka bir çalışmada, oluksuz bir doğrusal jeneratör nümerik analizi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir [11]. Önceki çalışmamızda Türkiye'nin dalga enerjisi potansiyeli, dalga enerjisi enerji dönüşüm sahaları, kullanılan jeneratör topolojileri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir [17,18].

Dalga enerjisi dönüştürücüleri genel bakımdan kıyıya olan konumlarına göre sınıflandırılmasına karşın enerji potansiyeli ve enerji üreten sistemler oldukça farklılaşmaktadır. Kıyıya yakın cihazlar 20 m'den daha az derinliklerde

suya konumlandırılırken [3], kıyı şeridinden uzakta veya kıyıda ek mekanik tertibatlı yerleştirilebilen nokta emiciler, her yönden enerji elde edebilir [19]. Yüksek elektrik enerjisi üretim potansiyeli nedeniyle özellikle kıyıdan uzak (açık deniz) hatta okyanus uygulamaları için tercih edilmektedir. Kıyı uygulamalarında jeneratörün şebekeye bağlanması alt yapı açısından önemli sorun olarak görülmemesine karşın açık deniz ve okyanus için şebekeye entegrasyonu oldukça önemlidir. Açık deniz ve okyanus ile kara arasındaki deniz altı kablosu, şalt uygulamaları ve şebeke entegrasyonu açık deniz rüzgâr endüstrisinin gelişmesiyle git gide kolay hale gelmiştir [7].

Dalga enerjisi kW/m olarak rüzgâr enerjisinden ve güneş enerjisinden oldukça fazla enerjiye sahiptir [14,20]. Dalga genliği ve periyodu arttıkça metre başına dalga gücü artmaktadır [4]. Dalgalardan güç üretimi; pnömatik, hidrolik ve mekanik sistemler yardımı ile elektrik jeneratörleri üzerinden sağlanmaktadır. Sistemlere bağlanacak jeneratörler temelde dairesel hareketli veya doğrusal hareketli olabilir. Bağlanacak jeneratör topolojisi sisteme göre değişiklik göstermektedir. Özellikle doğrusal hareketli jeneratörler, basit yapıda, sessiz, yüksek verimlilik ve doğrudan tahrik gibi avantajları bulunmaktadır [20,21]. Örneğin kıyıdan uzak Arşimet Dalga Salınım sisteminde doğrusal jeneratörler tercih edilirken kıyı uygulamalarında ise dairesel hareketli jeneratörler tercih edilebilmektedir. Sistem; hareketli hızını arttırmaya yönelik ara dönüştürme ekipmanı (dişli sistemi) ve jeneratörden meydana gelir [22]. Ayrıca yüzer veya suda asılı kalan şamandıralı sistemlere montajı gerçekleştirilen doğrusal jeneratörler doğrudan tahrikli dalga enerjisi dönüştürücüleri için uygundur [19]. Ancak yüzer şamandırayı ve platformu; fırtınalar, tsunamiler gibi kötü doğa olaylarından korumak için dengeli serbest su yüzeyine göre tutacak bir yöntemin geliştirilmesi elzemdir [23]. Özellikle son yıllarda geliştirilen 3 ve 6 serbestlik derecesine sahip sistemlere göre enerji toplama, teknolojik maliyeti, güvenilirliği bakımından orta performanstadır [24]. Ancak 3 veya 6 serbestlik derecesine sahip sistemler diğerlerine göre yüksek performans sınıfında ve yüksek hidrodinamik verimlilik sunmaktadır [24]. Aylık ortalama dalga gücü; yıl içinde büyük ölçüde değişir [10]. Dalga yüksekliğine göre kW/m başına dalga gücü tahmin edilebilir [10,25] ve dalga hareketi sinüzoidal olarak $x = A \sin \omega t$ verilir [23].

Dalga enerjisinden doğrusal hareketle elektrik üreten sistemlerde yavaş hareket (yaklaşık 1 m/s ve alt hızlar) söz konusudur. 10 numaralı referansta; hız 0,5 m/sn, periyot 3s olarak alınmıştır. Başka bir çalışmada [5] hareket mesafesi 1,6m, periyot = 4s olarak hız ise 0-1,25 m/s aralığında değiştiği kabul edilmiştir. Hareket mesafesi 7m, 1 MN maksimum kuvvet, maksimum 2,2 m/s hız dikkate alınan doğrusal jeneratör 400 ton ağırlığındadır [20]. Okyanus dalgaları, karakteristik süresi 7 s olan 4 m yüksekliğinde sinüzoidal

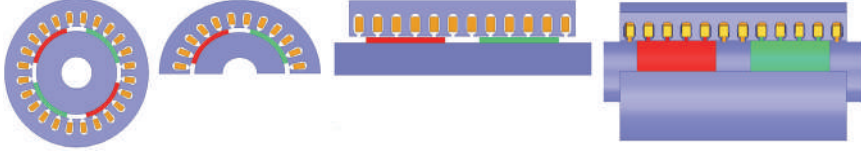
dalga değişimi olarak modellenir [26]. Düşük dalga frekanslarında (0,1Hz) elektrik enerjisi üretebilmek zor olabilir. Bu sebeple yüksek güç elde edebilmek için, yüksek reaksiyon kuvvetleri gerekmektedir ($P=Fv$). Dalga yüksekliği ve boyuna göre şamandıra çap ve yüksekliği belirlenebilir [26].

Geleneksel jeneratörler için en belirgin farklardan biri de doğrudan tahrik konseptinden dolayı yavaş hızdır [22]. Bu sebeple geleneksel jeneratörlere nazaran aynı güç değerlikleri için önemli ölçüde daha büyük ebatlara sahiptir. Dalga hareketinin hareketli kısmı düşük hızlarda tahrik edilmesinden dolayı üretilcek gerilim sınırlıdır [12]. Ayrıca dalganın değişken hız karakteristiğinden dolayı kısa süreli değişimlerini kestirilmesinin güçlüğü ortalama gücün sekiz katına varan ani güç değişimleri gösterebileceği belirtilmiştir [22]. Kısa süreli aşırı yüklenme voltaj kararlılığı için güç dönüştürücülerine ihtiyaç oluştururken uzun süreli durumlarda ısınma problemleri meydana getirir [22].

2. DOĞRUSAL HAREKETLİ JENERATÖRLERE GENEL BAKIŞ

Doğrusal sürekli mıknatıslı makineler elektriksel açıdan bakıldığında, döner sürekli mıknatıslı makineler arasında çalışma prensibi açısından önemli farklılık yoktur. Ancak tasarım eşitlikleri, geometri ve hareket eksenine dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmelidir. Döner makinelerin gücü çapın karesi ve uzunluk çarpımı ile değişir. Doğrusal makinenin geometrik yapısına bağlı olarak örneğin tek yanlı doğrusal makinelerde en ve boy çarpımı, tüp tipi doğrusal makinelerde ise çap ve boy çarpımı olarak değişir [27]. Ayrıca döner makinenin kapalı bir manyetik devresi ile doğrusal makine baş ve son noktaları açık uçlara sahiptir ve bu durum makine performansını etkileyebilmektedir [28, 29]. Dalga enerjisi uygulamalarında dairesel hareketten elektrik üretimi için ek mekanik düzenlemelere ihtiyaç vardır [30]. Doğrusal bir makinenin geometrisi, dönen bir makinenin hayali bir şekilde kesilmesi ve açılmasıyla üretilir [22] (Şekil 1). Doğrusal makine her iki ucunda açık manyetik devrelere sahipken dönen bir makinenin manyetik devresi kapalı bir devre oluşturur [22]. Bir ya da çok fazlı yapılmalarının yanı sıra en yaygın üç fazlı olarak tasarlanırlar. Aslında ister doğrusal ister dairesel hareketli olsun sistemde kullanılacak jeneratör topolojisi çok önemlidir. Doğrusal hareketi dönüştüren bir şanzımandan oluşan bir jeneratör sistemi standart döner jeneratörden daha ucuz ve oldukça verimli bir çözüm olabilir bu sebeple doğrusal jeneratörler kullanılır [31]. Kısacası; doğrudan dalga hareketinden yararlanmak, ek mekanik donanımları (doğrusaldan dönüşe aktarım mekanizmalarını) ortadan kaldırmak ve ilgili güç kayıplarını azaltmak için doğrusal jeneratör kullanılır [12]. Böylece sistemin ömrünü uzattığına

inanılan ara enerji depoları ve dişli kutuları kaldırılır [7]. Şekil 1’de dairesel hareketli sürekli mıknatıslı jeneratörün doğrusal hareketli tüp tipi jeneratöre dönüşüm süreci verilmiştir:



Şekil 1. Soldan sağa doğru sürekli mıknatıslı makinadan tüp tipi sürekli mıknatıslı doğrusal makinaya dönüşüm aşamaları

Şekil 1’deki model diğer makine topolojileri (asenكرون jeneratör/motor, akı anahtarlamalı sürekli mıknatıslı jeneratör/motor, anahtarlamalı relüktans jeneratör/motor, vernier jeneratör/motor vb.) için uygulanabilir. Dönen makinaların kullanım alanlarında olduğu gibi doğrusal makinelerinde tümü dalga enerjisi dönüşümü için uygun değildir. Doğrusal hareketli jeneratörlerin çok ağır, verimsiz ve pahalı olacağı öngörülmekteydi [15], ancak manyetik malzemeler ve elektronik kontrol ünitelerinin düşen maliyetleri, yeni doğrusal elektrik jeneratör topolojileri ile dalga enerjisinden elektrik üretiminde aktif olarak kullanılabileceği anlamına gelmektedir [15]. Ayrıca paralel bağlanmış birçok dönüştürücü düzenek ile güç artışı sağlanabilir [32]. Yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik; düşük maliyet ve kontrol edilebilirlik aranan özelliklerdir. Doğrusal jeneratörler; boyuna ve enine akı yolu olarak hareket yöne bağlı paralel ve dik olarak konumlandırılmıştır [13]. Çift beslemeli asenكرون jeneratör (ÇBAG) tipinin bakım gereksiniminin bulunması, reaktif güç ihtiyacı ve güç kontrolü yüksek ağırlık/güç oranı nedeniyle dalga uygulamaları için uygun olmadığı [14,15,33], sürekli mıknatıslı senكرون makina, enine akılı [13,34,17] veya vernier tip (bir tür değişken relüktanslı sürekli mıknatıslı) [13,15] jeneratörler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Diğer asenكرون ve sargılı senكرون jeneratörler ile karşılaştırıldığında [7,13]; yüksek kuvvet yoğunluğu, yüksek verimlilik yanı sıra düşük hızlarda makul verimlilik sunması [6,13], sargı bakır kayıplarının azalması (hareketli kısımda sadece mıknatıs bulunması) [7,13], artan maliyetlerine karşın yüksek güç yoğunluğu nedeniyle kalıcı mıknatıslı (PM) senكرون jeneratörler tercih edilmektedir [13,15]. Hava aralığı ortak gerinim (kuvvet/m²) bakımından makineler karşılaştırıldığında yüksekten küçüğe doğru enine akılı, vernier ve boyuna sürekli mıknatıslı senكرون jeneratör olarak sıralanabilir [13]. Enine ve vernier tip doğrusal jeneratörler yüksek kuvvet kütle oranı sunmasına karşın büyük yük açıları nedeniyle düşük güç faktöründen muzdariptir

[13,15,34-37]. Bu sebeple yüksek dereceli bir güç elektroniği dönüştürücüsü gerektirmekte ve büyük manyetik çekim kuvvetleri nedeniyle yatak sorunları da vardır [15]. Ancak kaçak akı azaltılmış yüksek verim sunan yeni enine akılı makine önerileri ve uygulamaları dikkat çekicidir [34,38,39]. Ayrıca üretimdeki zorluklar, yüksek senkron indüktans, karmaşık stator ve hareketli konfigürasyonları nedeniyle geleneksellere [13] nazaran dalga enerjisi sistemleri için araştırmacıları yeni alternatif doğrusal jeneratör [40] topolojilerini aramaya yöneltmiştir [13]. Dalga enerjisi sistemleri için güç yoğunluğu yüksek jeneratör dikkate alınmalıdır [41]. Ayrıca dikkat çekici çalışmalar; bölmelendirilmiş akı tersine çevirme [42] ve anahtarlamalı relüktans doğrusal jeneratör [43-45] ele alınmış ve dalga sistemleri için önerilmiştir.

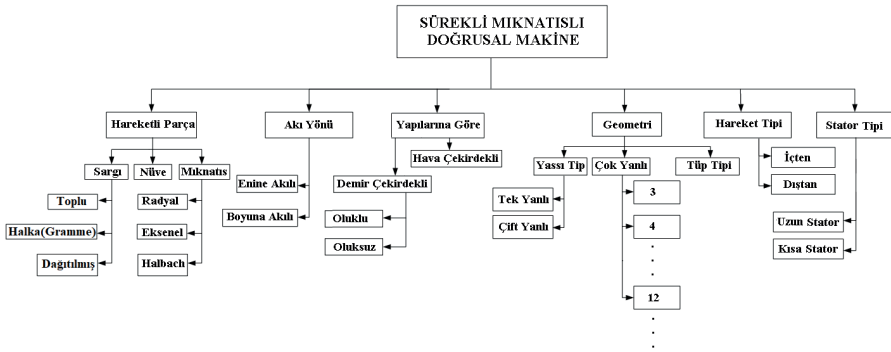
Yapısal olarak statorun (durağan kısmın) hareketli kısımdan uzun olması kayıpları artırır [22]. Bu nedenle maliyet artmasına rağmen manyetik akı yoğunluğunu yükseltmek, kayıpları azaltmak için hareketli statordan daha uzun yapılır [22]. Oluklu yapılar; oluksuz veya hava nüveli yapılara nazaran daha yüksek güç ve gerilim sunar [13]. Ancak oluksuz yapılarda dış bulunmadığından dolayı vuru kuvveti ihmal edilecek derecede çok küçüktür. Mıknatıslar manyetizasyon durumuna göre; hareketlide akı odaklayacak şekilde eksenel, hareketli yüzeyine monte edilerek radyal şekilde ve her iki yönde akı yöneliminde (eksenel ve radyal) Halbach dizilimle olabilir [46]. Eksenel manyetize edilmiş PM'ler yüksek kuvvet yoğunluğu sunmasına karşın kuvvet dalgalanması önemli bir sorundur [13]. Radyal PM düşük bir kuvvet yoğunluğu sunmasına karşın düşük maliyet sunması ve daha düşük vuru kuvveti nedeniyle tercih edilirler [13]. Analitik yöntemle hızlı hesaplama, optimizasyon ile vuru kuvveti azaltılarak sonlu elemanlar yöntemi üzerinden prototip elde edilebilir [47]. Halbach PM'nin indüklenen gerilimde düşük harmonik içermesi, yüksek verimlilik ve kuvvet yoğunluğu açısından birçok avantaja sahiptir [13]. Ancak yüksek PM maliyeti nedeniyle imalat maliyetini düşürmeye yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Güç yoğunluğu ve hareket mesafesini arttırmaya yönelik dıştan hareketli doğrusal tüp tipi sürekli mıknatıslı jeneratör dalga enerjisi uygulamalarında kullanımı da mümkündür [19]. Doğrusal akı anahtarlamalı PM jeneratör başka bir seçenektir. C nüveli bu tip jeneratör Tepki Yüzey Metodu ile optimum boyutlar elde edilmiştir [48]. Başka bir çalışmada sürekli mıknatıslı jeneratör ve aynı metod kullanılarak amaç fonksiyonları üzerinden optimizasyon gerçekleştirmişlerdir [49]. Tüp tipi akı anahtarlamalı ve radyal akılı doğrusal jeneratör ile karşılaştırarak radyal akılı'nın testlerini gerçekleştirmişlerdir [50]. Daha düşük vuru kuvveti için kutup adımı/oluk adımı oranı 2 yerine 0,66 olarak alınabilir [51]. Yüksek kuvvet değerlikleri için iç çap/dış

çap oranı 0,4-0,55 aralığında alınabilir [52,53]. Dalga enerjisi uygulamaları için akı anahtarlamalı jeneratörde nüve olarak SMC, Silisli sac, Demir tozu (Kool M μ) kullanılabilir [52-54]. SMC ve Silisli sac karşılaştırıldığında Silisli sac net kuvvet bakımından daha yüksek performans göstermektedir [52]. Ancak düşük frekanslarda SMC kaybı azalması, imalat kolaylığı ve simetrik yapısından dolayı 3B SEY analizinin karmaşık yapılara nazaran kısa sürmesi bakımından dikkat çekmektedir [52]. Çift yanlı akı anahtarlamalı 100W güçlü uygulama ve kontrol sistemi ele alınmıştır [55]. Ayrıca son yıllarda akı anahtarlamalı jeneratörlerde süperiletken kullanılması potansiyel bir seçenek olarak değerlendirilmekte ve teknolojik olgunluk bakımından yenidir [13]. Ancak ilerleyen yıllarda süperiletkenlikli jeneratörler potansiyel bir aday olarak görülmektedir [5,13]. Statorun uç tarafında PM yokluğu; son etkinin neden olduğu tutma kuvveti dikkate alınmaz [13]. Hareketli yekpare ferromanyetik malzemeden; statorda mıknatıs, sargılar ve paketlenmiş silisli saclardan meydana gelmektedir. Yüksek manyetik akı yoğunluğu nedeniyle Neodyum mıknatıslar tercih edilir. Mıknatıs maliyetlerini azaltmaya yönelik Ferrit mıknatıslarda önerilmiş ve Neodyum mıknatıslı jeneratör ile karşılaştırıldığında kablo uzunluğundaki, kütleindeki ve yük açısında artışının yanında verim düşüklüğü göstermektedir [56]. Ayrıca bu makinelerde sürekli mıknatıs kullanılması tuzdan dolayı korozyon oluşumu dezavantaj oluşturmaktadır [3]. PVC izoleli iletkenler hem havada hem de deniz suyunda uzun ömürlüdür ve sürekli çalışma sırasında 70 °C'ye dayanır [35]. Jeneratör soğuk deniz suyu ile çevrili olması stator sırtı ile deniz suyu arasında iyi bir termal bağlantı sağlarsa iletkenler soğuyabilir [35]. Mıknatıslarda demanyetizasyonunu önlemek için süperiletken sargılar kullanılabilir [5]. Süperiletken sargıların kullanımında yüksek maliyeti dikkate alınmadığında omik dirençlerinin küçük olması bakımından avantajlı olduğu söylenebilir. Sürekli mıknatıs ve süperiletken fiyatlarındaki artış nedeniyle mıknatıssız ya da daha az mıknatıs kullanımı içeren hatta süperiletken kullanımı içermeyen tasarımlar ekonomik açıdan hayata geçirilebilecek durumdadır [13].

Mekanik dişli işlevi isteyen uygulamalar (rüzgâr jeneratörleri ve elektrikli araç tahrik sistemi, vb.) gibi dalga enerjisi uygulamaları için son yıllarda doğrusal manyetik dişli içeren doğrusal jeneratör konfigürasyonu önerilmiştir [12]. Dolayısıyla, düşük hızlı dalga hareketini doğrudan yakalayarak dişli oranı yüksek hızlı hareket ettiricinin hızıyla doğrusal jeneratörü yüksek hızlarda tahrik edilebilmektedir [12]. Manyetik dişli sistemiyle, dişli ve doğrusal jeneratör dişlinin manyetik devrelerinin ayrılması ve birleştirilmesi mümkündür [12,13]. Kısacası doğrusal jeneratörle seri/paralel entegrasyonu yapılabilir [12,13]. Yüksek gerinim, verimlilik ve düşük kuvvet dalgalanması nedeniyle dikkat çekmektedir [13].

Hareketli-stator uzunluğunu, oluk/kutup sayısı, mıknatısların geometrik boyutları, hava boşluğu mesafesi, sarım sayısı ve diğer parametreler doğrusal jeneratör için önemli parametrelerdir. Tek yanlı yapı ile karşılaştırıldığında tüp tipi doğrusal makina daha yüksek alan kullanımı, daha az kaçak akı, daha büyük itme kuvveti yoğunluğu, uç sargılar yoktur ve rulmanlara radyal kuvvet uygulanmaması açısından avantajlara sahiptir [12]. Ancak tek yanlı imalatı kolay ve çok yanlı düşünülerek farklı konfigürasyonlar elde edilebilir [13]. Ayrıca tek yanlı yapı üretilen güç ve dengesiz kuvvet çekimi açısından dezavantajlı olmasına karşın çoklu yapılandırma ile dikkat çekici hale gelmiştir. Örneğin çift yanlı [5], dört yanlı [22,35], sekizgen [26] ve daha fazlası olabilir. Hareketli ve stator arasındaki kuvvetleri dengelemek için çift yanlı [31] doğrusal jeneratör modelinin simülasyon ve deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir [57]. Üretim toleransları her iki tarafta da dengesiz hava boşluğundan dolayı çekim kuvvetleri tamamen ortadan kaldırılmamış, destek yapısı ve yatak sistemi tam olarak tasarlanmalıdır [13]. Kutupların eğimi arttıkça vuruuntu kuvveti azalmakta aynı zamanda indüklenen gerilimde düşme meydana gelmektedir [57]. Hareketli boyu stator boyundan uzun olması tüm sargıları aktif kısa olması durumunda ise bazı sargıları pasif hale getirecektir [13]. Hareketlinin çalışma mesafesi gereğinden fazla uzun olması mıknatıs kullanımını ve toplam maliyeti arttıracaktır. 26. Kaynakta indüklenen gerilimdeki harmoniklerin giderilmesi için sargıyı dağıtma, kutup ayaklarının uygun şekillendirilmesi, sargı adımını kutup adımından daha kısa yapma, oluk veya mıknatısları kaydırma, stator paketini dik yerleştirme olarak düzenlemeler yapılabilir. İster içten hareketli ister dıştan hareketli yanlı veya tüp tipi doğrusal sürekli mıknatıslı jeneratörlerin vuruuntu kuvveti önemli bir sorundur. Bu durum stator veya hareketli kısımda enerji bulunmaksızın mıknatıs ile ferromanyetik dış ve uç kısımları arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir. Kenar mıknatıslarına komşu mıknatıs; çift yönlü akı kuplajı olarak bilinen simetrik olmayan akı dağılımına yol açar [13]. Son kısımlarda uç etkisi manyetik akı dağılımlarını etkilemektedir [13]. Meydana gelen dış kaynaklı net kuvvet ya da vuruuntu kuvveti mekanik titreşime ve elektromanyetik kuvvet dalgalanmasına neden olabilir [19]. Düşük hava aralığı vuruuntu kuvvetini arttırmasının yanı sıra kuvvet dalgalanmalarından dolayı mekanik parçalarda yıpranma oluştururken büyük hava aralığı ise daha düşük verimlilik sağlar [26]. Tüp tipi makinelerde mıknatıs bölümü ile armatür arasındaki manyetik normal kuvvetlerin dengelenmesini sağlamak için hava aralığı; hareketli çevresinde tek tip olması gerekir [9] aksi durumda mıknatıs ve armatür arasındaki normal kuvvet son derece büyük hale gelir ve sürtünme artar [9]. Harmonikler çıkış gücündeki karşılık gelen dalgalanmaları etkiler ve harmoniklerin bastırılması güç dalgalanmasını azaltır [26]. Bu

açından indüklenen gerilimin harmonik bileşenlerine göre dağılımı için oluk kutup kombinasyonları da dikkate alınmalıdır [26]. Ayrıca oluk ile sürekli mıknatıslar arasındaki etkileşimin neden olduğu vuruntu kuvvetin büyüklüğü en küçük ortak katı dikkate alınarak kutup ve oluk sayısı belirlenebilir. Son etkinin neden olduğu dış kuvvet bileşeni uç tarafların manyetik devresine bağlıdır [19]. Ancak yardımcı dış eklenmesi ya da mevcut son dişin boyut optimizasyonu ile dış kaynaklı kuvveti en aza indirmek mümkündür [19]. Son yıllarda doğrusal jeneratörler dikkate alınarak [40] doğrusal jeneratör çeşitlerine ait sınıflandırma grafiği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Doğrusal jeneratör çeşitlerine yönelik sınıflandırma [18]

Dalga enerjisi sistemleri iki grupta değerlendirilmekte ve bu sistemler şebekeden bağımsız (offgrid) veya şebekeye bağlı (ongrid) olarak tasarlanmaktadır [2]. Dalgaların doğal hareketinden dolayı doğrusal jeneratörden elde edilen faz gerilimleri genlik bakımından uygun olsa da frekans bakımından elektrik şebekesi için uygun değildir. Kısacası çıkış voltajları ve akımları hem genlik hem de frekans bakımından değişecektir. Ayrıca, yukarı aşağı piston her yön değiştirdiğinde fazların sırası değiştirilir, bu da diğer jeneratörlere veya bir şebekeye doğrudan bağlanmayı imkânsız hale getirir [35]. Bu sebeple jeneratör ve şebeke bağlantısında dikkate alınarak tasarlanmalıdır [7,58-59]. Bağlantı yapıları 58 ve 59. referanslarda ele alınmıştır. Genellikle çalışmalarda [6,7,60,61]; yarı iletken doğrultucularla uygun bir voltaja dönüştürülür. Sargı gerilim harmoniklerinin bastırılması bu açıdan çok önemli değildir [26]. Doğrultma, pasif diyot doğrultucular veya aktif çift yönlü AA/DA dönüştürücü ile gerçekleştirilebilir [35]. Akü/akü grubu şarj edilerek evirici yardımıyla kullanılabilecek voltaj ve şebeke frekansına dönüştürülür. Şebeke bağlantısı için güç elektronik dönüştürücü kıyıya yerleştirilir ve böylelikle karadan güç elektroniği ve kontrolle ilgili olası sorunlar kolayca çözülebilir [31].

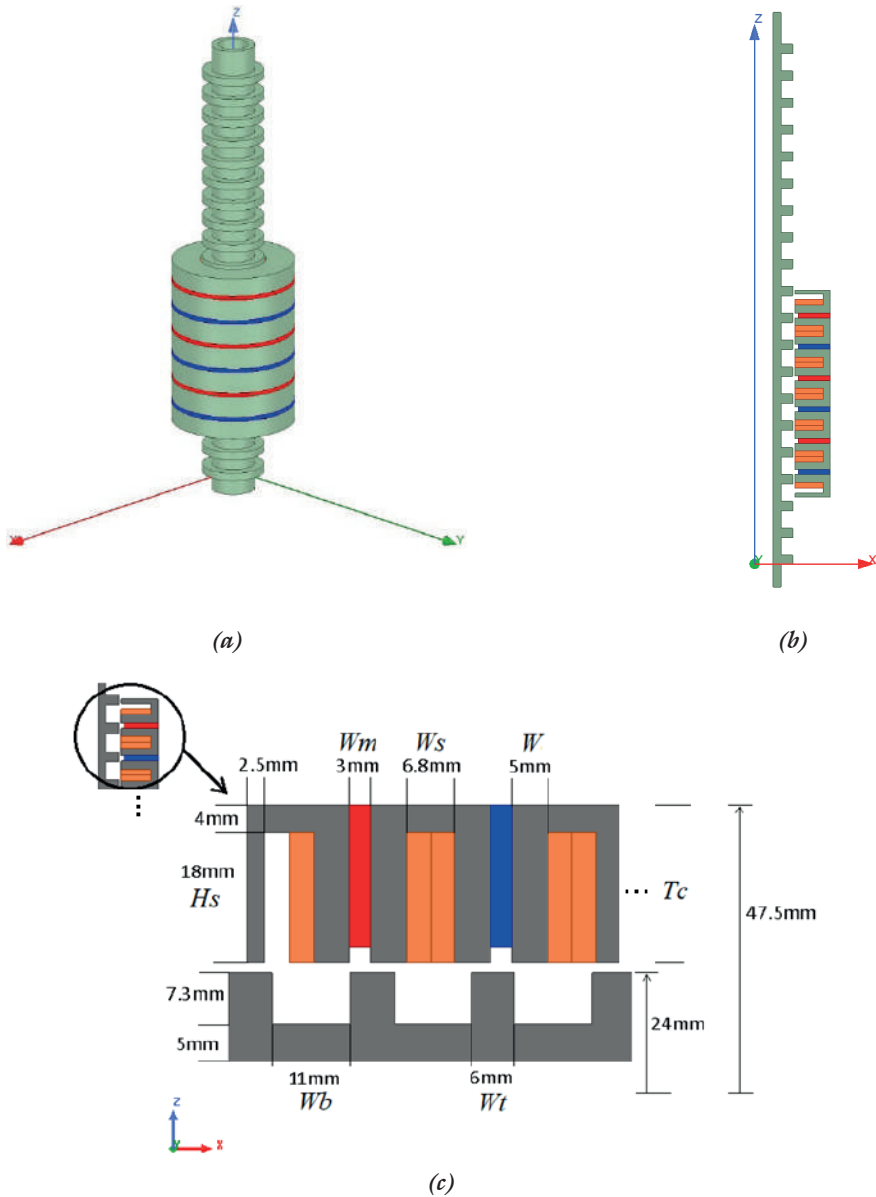
Nokta emici ve referans sistemi, dalga hareketlerinin kuvvet oluşturduğu ve jeneratörün bir damper görevi gördüğü salınımlı bir sistem oluşturur. Nokta emicinin titreşiminin kontrol edilmesi ve enerji çıkışını en üst düzeye çıkarmak için ek bir kütle de kullanabilir [62]. Sistemin sönümlenmesi, emicinin boyutu, ağırlığı, hızı dikkate alınmalıdır [22]. Tasarımlarda genellikle jeneratör hızı sabit kabul edilir [30,32,35]. Dalga hareketinin frekans değeri günün farklı saatlerinde (rüzgâr değişimine bağlı olarak) değişmektedir. Örneğin, dalga hareketinin gerçek zamanlı değişimi 6. referansın 3 numaralı a şekli incelenebilir. Dalga yüksekliği hareketli yüksekliğine çok yakındır [6] ve bu tasarımda eşit alınmıştır. Hareketli hızı dalga hareketine göre değiştiğinden dolayı jeneratörde üretilen gerilim değeri de [63] ve indüktif reaktans değeri de [32] değişmektedir. Hıza bağlı olan elektrik frekansının bu değişimi eşzamanlı olarak reaktiflik miktarını değişken bir parametre haline getirecektir [22]. Üç fazlı rezistif yüklü durum için, deniz kablosunun direnci ihmal edilirse, yük voltajının jeneratörün çıkış voltajı ile aynı olması beklenir [6]. Jeneratör ile kıyı arasındaki mesafeye bağlı olarak bağlantı kablosunun kapasitans değeri dikkate alınabilir ancak oldukça küçük olduğundan dolayı ihmal edilmektedir [6]. Ancak bazı çalışmalarda hat uzunluğu dikkate alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir [60,61]. Sönümleme kontrolünün düzenli ve düzensiz dalgalar halinde aktif ve pasif olarak deneysel olarak incelenmiştir [64]. Özellikle zorlu hava şartlarında hareketli hızını ve strok uzunluğunu (vuruş mesafesini) azaltmak için ek sönümlemeye (hidrodinamik amortisörler kullanan sistemlere) ihtiyaç duyulabilir [22].

Üç fazlı jeneratör çıkışında üç durum (sadece rezistif yük, pasif doğrultma-filtreleme ve rezonans devresi bağlanması) ayrı ayrı ele alınmıştır [6]. Çıkış güç değerlerinde önemli değişim rezonans durumunda görülmesi beklenen durum olmasına karşın verimlilik sırasıyla %90,8, %78, %66 olarak hesaplanmıştır [6]. Ucuz, basit, güvenilirlik ve verim dikkate alındığında aktif doğrultma yerine pasif doğrultma tercih edilmektedir [61,65]. Aktif doğrultma ile güç faktörü kontrol edilebilir ve faz kompanzasyon kondansatör blokları bağlanarak sistem daha karmaşık hale gelir [22]. 6. Referansta hem pasif doğrultma-filtreleme devresi hem de rezonans devresi bağlanması durumunda güç faktörü hesabı dikkate alınmıştır. Yüke daha fazla güç sağlamak için sönümleme faktörünün artırılması jeneratör çıkışına rezonans devresi bağlanarak sağlanabilir [6]. Örneğin [65]. Referansta tek fazlı bir rezonans devresi üzerinden uygulama gerçekleştirilmiş ve 60. referansta ise üç fazlı jeneratör, kontrolsüz doğrultucu, hattın π devresi üzerinden yükün beslenmesi olarak modellenir. Diğer bir çalışmada jeneratörden şebekeye kadar güç sistemi ele alınmış ve sönümleme fonksiyonun yüke göre değişimi

incelenmiştir [61]. Güç üretimini optimize etmek için optimum DA voltajının bilinmesi önemlidir [61]. Ayrıca sistemde maksimum güç ve maksimum verimin meydana geldiği optimum yük direnç değeri belirlenmelidir [63]. Dalgalardan elde edilecek elektrik enerjisini en üst düzeye çıkarmak için jeneratör gelen dalgalarla rezonansta olacak şekilde kontrol edildiğinde aktarılan güç maksimize edilir [3,66]. Jeneratöre bağlanan bir veya üç faz için yeni bir rezonans devresi önerilmiştir [48]. Aktif doğrultma ile jeneratörün terminal çıkış voltajı büyüklük olarak artırılabilir ve fazda kontrol edilebilir ve böylece doğrultucunun sürüş durumunun kontrolü ile, jeneratörün farklı çalışma durumuna göre ayarlama avantajı sunar [3,65]. Aktif gücü en üst düzeye çıkarmak ve reaktif gücü kontrol etmek için bu yöntem kullanılır [3,65]. Anahtarlama kayıpları, sistemin soğutulması ve redresörün doğrusal olmayan özelliği dikkate alınmalıdır. Nominal yükte küçük bir yük açısı, faz kompanzasyonu olmadan maksimum aktif gücün çıkarılabileceğini ve ayrıca aşırı yükte gelişmiş özelliklere yol açar [35]. Büyük yük açılarında sahip makinelerde gerekli olan faz telafisi, [27]'de kapasitör/kapasitör bankları, [28]'de ise redresör olarak aktif bir çift yönlü AA/DA dönüştürücü kullanarak ile gerçekleştirilebilir [35]. Maksimum güç takip algoritması ile çıkış gücü kontrol edilebilir [67]. Faz kompanzasyonu; akımların değişen frekansı nedeniyle karmaşıklıkla ve ek ekipman anlamına gelir [35]. Küçük yük açısına sahip bir jeneratör tasarlanıp faz kompanzasyonu yapılmaksızın doğrultucu olarak basit bir diyot devresi kullanılabilir [35]. Ayrıca maksimum güç izleme ve alan odaklı kontrol yöntemleri [33] ve kayma kipli kontrol tekniği ile sisteminin performansı etkili biçimde geliştirilebilir [55]. Güç kontrolü ve metodolojileri için 3, 58, 64-65 numaralı kaynakları inceleyiniz.

3. AKI ANAHTARLAMALI TÜP TİPİ ÜÇ FAZLI JENERATÖR MODELİ

Jeneratörün hareketli parçası tek parça olarak primer (stator) U şeklindeki silisli saclar arasına sabit mıknatısların yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Sabit mıknatısın durağan parçada olması makinenin ısı yönetimi oluşturabilir ancak çok sayıda mıknatıs ve ebatları düşünüldüğünde maliyetin artması kaçınılmazdır. Modelde çift katmanlı sargı tipi A,B,C fazları sırası ile yerleştirilmiştir. A fazı dizimi AaaA olarak verilmiştir. Diğer fazlarda benzer şekilde sıralanmaktadır. Şekil 3'te modelin hareketli dişleri hizalandıkça manyetik devre relüktansı minimum hale gelir.



3.1. Mıknatıs Çeşitleri

Motor/jeneratör uygulamaları için çeşitli mıknatıslar kullanılmaktadır. Özellikle geleneksel Neodyum mıknatısların yerine nadir toprak elementi içermeyen veya belirli oranda azaltılmış mıknatıslar halen araştırma

konusudur. Özellikle bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi nadir toprak elementi ihtiyacını azaltmak, ikincisi ise nadir toprak elementindeki kur kaynaklı dalgalanmalardır. Bu çalışmada ele alınan mıknatıs çeşitleri ve Alan Şiddeti ve Akı Yoğunluğu değerlikleri Tablo 1’de verilmiştir.

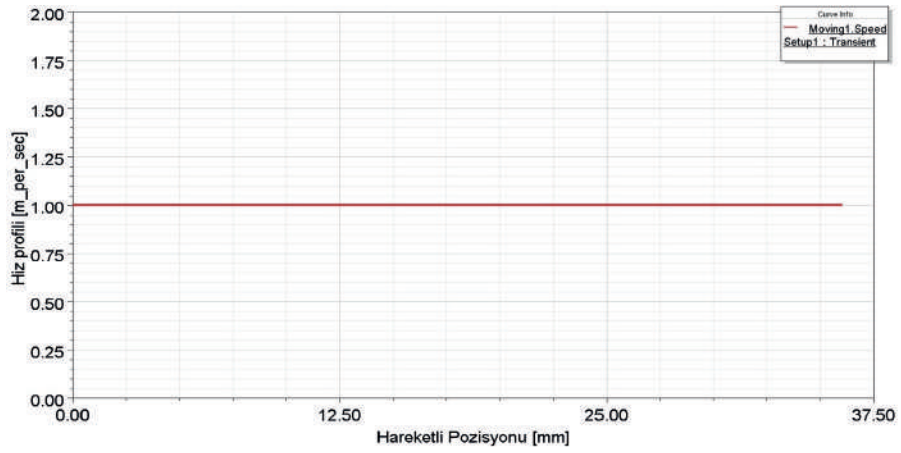
Tablo 1. Mıknatıs çeşitleri [68-72]

Mıknatıs Adı	H(A/m)	B(T)
NdFeB	-890000	1,1
AlNiCo	-119366	1,05
SmFeN	-903204	0,97
Samarium S24	-661000	0,92
Ferrit Y30	-188000	0,4

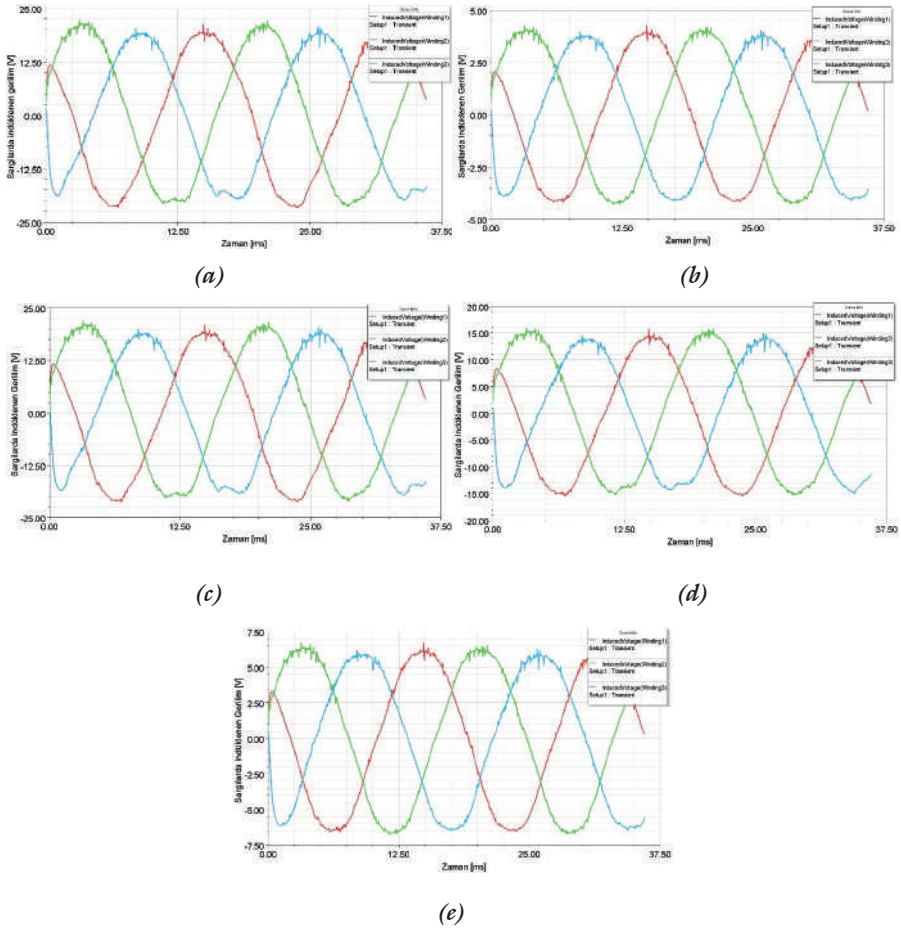
Burada H alan şiddetinin negatif işareti, malzemenin kalıcı mıknatıs olduğunu (manyetizasyon yönüne zıt alan altında çalıştığını) gösterir.

3.2. Analiz Sonuçları

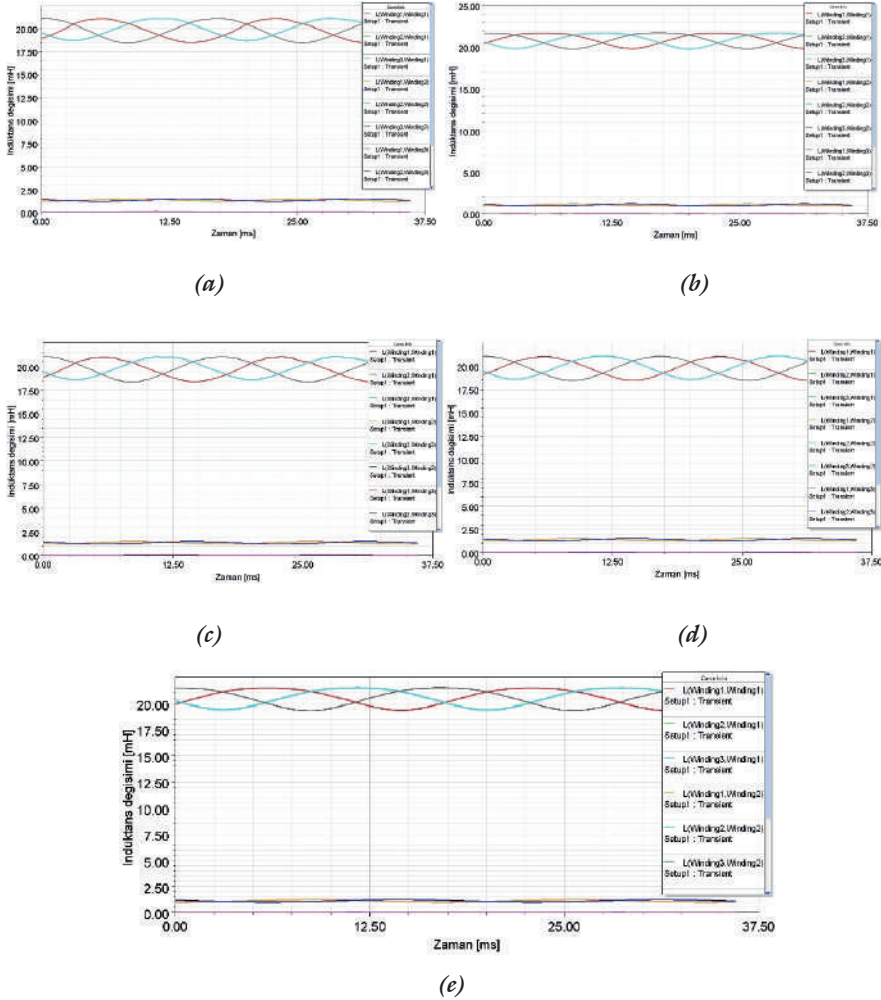
Karmaşık geometrileri sonlu elemanlar yöntemi ile çözmek hem yüksek doğruluk hem de zamandan tasarruf sağlamaktadır. Geçici hal analizi ile belirlenen hareketli hızı değişimine göre sargılarda indüklenen gerilim değişimi ve sargı indüktans değişimi Tablo 1’deki mıknatıs çeşitleri için elde edilmiştir. Hız profili dalga enerjisi sistemlerinde sinüzoidal olsa da jeneratör dalga formunu sabit hız değeri için elde etmek mümkündür. Hareketli hızı 1m/s [5,10] olarak değiştiği kabul edilmiştir. Şekil 4’te hareketli hız ve pozisyon değişimi verilmiştir.



Şekil 4. Hareketli parça hız ve pozisyon değişimi



Şekil 5. Sargılarda İndüklenen Gerilim değişimi, a)NdFeB, b)AlNiCo, c)SmFeN, d) Samaryum S24, e)Ferrit Y30



Şekil 6. İndüktans değişimi, a)NdFeB, b)AlNiCo, c)SmFeN, d)Samaryum S24, e)Ferrit Y30

4. SONUÇ

Ülkemizin coğrafi konumu düşünüldüğünde yüksek dalga enerjisi potansiyeline sahiptir. Ancak dalga enerjisi üzerine çalışan kıyı şeridi olan ülkelere nazaran ülkemizde dalga enerjisi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Özellikle doğrusal jeneratör ve topolojileri üzerine çalışmalar gittikçe artmaktadır. Teknolojik olgunluk bakımından son yirmi yılda hızlı gelişmesine karşın ilk yatırım maliyetleri bakımından oldukça yüksektir. Bu uygulamalar için doğrusal hareketli jeneratörlerin avantaj ve dezavantajları 71 nolu referansta detaylandırılmıştır. Özellikle burada yanlı

modelleri yüksek güç, tüp tipi modeller düşük güç, hava nüveli yapıların yerine demir çekirdekli, tek faz yerine üç faz modelin daha yüksek elektrik enerjisi eldesinin yanı sıra hareketli üzerine mıknatısların yerleştirilmesinin daha etkili olduğu belirtilmiştir [71]. Literatür araştırmasında doğrusal hareketli jeneratörler içerisinde boyuna akılı sürekli mıknatıslı doğrusal jeneratörler yaygın olarak tercih edilmektedir [71,72]. Ancak doğrusal hareketli vernier ve akı anahtarlamalı jeneratörler geleneksel radyal akılılara göre daha ekonomik ve bazı özellikler açısından daha iyi performans sergilediğinden dolayı son yıllarda araştırma konusu olmuştur. Ayrıca bu jeneratörlerin yapısal olarak türetilen farklı konfigürasyonları dalga enerjisi sistemleri için önerilmektedir. Dalga enerjisi sisteminde her bir bileşen için öncelikle bilgisayar benzetim modelleri kullanılarak analizleri gerçekleştirilmelidir [3]. Doğrusal jeneratör üzerinde tasarım maliyetini azaltmak için, gelişimde ilk adım olarak teorik ve sonlu elemanlar tabanlı çoklu fizik tabanlı benzetimler yapılması elzemdir. Özellikle farklı konfigürasyonlar seçilmesi ile meydana gelecek asimetri yüzünden üç boyutlu analizler oldukça uzun zaman almaktadır [73]. Dalga enerjisi, enerji dönüşümü için kullanılan jeneratör tipleri, genel özellikleri ve bu jeneratörlerin şebeke bağlanmaları hakkında literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kullanılabilecek jeneratör konfigürasyonların avantaj ve dezavantaj açısından değerlendirilmiştir. Önerilen jeneratör dalga ve 2 kat uzunluğundaki modeli süspansiyon sisteminden enerji hasadı için de önerilmiştir [74,75]. Modelin baş ve son kısımlarında vuruş kuvvetini azaltmak için dış kısaltması gerçekleştirilmiştir [75]. Düşük güçlü dalga enerjisi dönüştürücüsü olarak kullanımı araştırılmıştır. Model için kullanılan mıknatıslar sırasıyla NdFeB, AlNiCo, SmFeN, Samaryum S24, Ferrit Y30 olarak verilmiştir. Sargılarda indüklenen maksimum gerilim sırasıyla 21.3V, 4.27V, 20.99V, 15.73V, 6.71V'tur. Özellikle elde edilen gerilim açısından NdFeB ile SmFeN arasındaki fark oldukça küçüktür. SmFeN'nin performans bakımından oldukça bir fark sunmaması beklenirken gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla NdFeB mıknatısların yerini alması beklenmektedir.

Kaynakça

1. "Ocean energy," Report of the US Department of Interior, Minerals Management Service, 2007.
2. Rhinefrank, K., Agamloh, E. B., Von Jouanne, A., Wallace, A. K., Prudell, J., Kimble, K., & Schacher, A. (2006). Novel Ocean Energy Permanent Magnet Linear Generator Buoy. *Renewable Energy*, 31(9), 1279-1298.
3. Ozkop, E., & Altas, I. H. (2017). Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 106-115.
4. Özger, M. (2011). *Dalga Enerjisi Tahmini Ve Stokastik Modelleme* (Doctoral Dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
5. Farrok, O., Islam, M. R., Sheikh, M. R. I., Guo, Y., Zhu, J., & Lei, G. (2018). Oceanic wave energy conversion by a novel permanent magnet linear generator capable of preventing demagnetization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), 6005-6014.
6. Hong, Y., Eriksson, M., Castellucci, V., Boström, C., & Waters, R. (2016). Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies. *IET Renewable Power Generation*, 10(3), 349-359.
7. Greaves, D., & Iglesias, G. (Eds.). (2018). *Wave and tidal energy*. John Wiley & Sons.
8. Leijon, M., Bernhoff, H., Agren, O., Isberg, J., Sundberg, J., Berg, M., ... & Wolfbrandt, A. (2005). Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator. *IEEE Transactions on energy conversion*, 20(1), 219-224.
9. Elwood, D., Yim, S. C., Prudell, J., Stillinger, C., Von Jouanne, A., Brecken, T., ... & Paasch, R. (2010). Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off. *Renewable Energy*, 35(2), 348-354.
10. Bozzi, S. I. L. V. I. A., Miquel, A. M., Scarpa, F., Antonini, A., Archetti, R., Passoni, G. I. U. S. E. P. P. E., & Gruosso, G. I. A. M. B. A. T. T. I. S. T. A. (2013, June). Wave energy production in Italian offshore: Preliminary design of a point absorber with tubular linear generator. In *2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 203-208). IEEE.
11. Baker, N. J., Almoraya, A., Raihan, M. A., McDonald, S., & McNabb, L. (2022). Development and Wave Tank Demonstration of a Fully Controlled Permanent Magnet Drive for a Heaving Wave Energy Converter. *Energies*, 15(13), 4811.
12. Li, W., Chau, K. T., & Jiang, J. Z. (2011). Application of linear magnetic gears for pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 2624-2627.

13. Faiz, J., & Nematsaberi, A. (2017). Linear electrical generator topologies for direct-drive marine wave energy conversion-an overview. *IET Renewable Power Generation*, 11(9), 1163-1176.
14. López, I., Andreu, J., Ceballos, S., De Alegría, I. M., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434.
15. Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology.
16. Akar, S., & Akdoğan, D. A. (2016). Environmental and economic impacts of wave energy: Some public policy recommendations for implementation in Turkey. In *Handbook of research on green economic development initiatives and strategies* (pp. 285-309). IGI Global.
17. Arslan Serdal, (2016). Dalga Enerjisinden Elektrik Üreten Sistemlere Genel Bakış ve Arşimet Dalga Salınımı Sistemlerinde Kullanılan Jenaratör Topolojilerinin İncelenmesi, *International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16)* March 19-20, Kilis
18. Arslan, S., Gurdal, O. (2022). Polygonal tubular linear permanent magnet generator analysis and experimental test. *Scientia Iranica*, 29(1), 168-182. doi: 10.24200/sci.2019.50094.2739
19. Huang, L., Hu, M., Yu, H., Liu, C., & Chen, Z. (2017). Design and experiment of a direct-drive wave energy converter using outer-PM linear tubular generator. *IET Renewable Power Generation*, 11(3), 353-360.
20. Molla, S., Farrok, O., Islam, M. R., & Xu, W. (2023). A systematic approach for designing a highly efficient linear electrical generator for harvesting oceanic wave energy. *Renewable Energy*.
21. Zheng, Z. Q., Huang, P., Gao, D. X., & Chang, Z. Y. (2015). Analysis of electromagnetic force of the linear generator in point absorber wave energy converters. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(4), 10.
22. Danielsson, O., Thorburn, K., & Leijon, M. (2008). Direct Drive-Linear Generators, Chapter: 6.2. *Ocean wave energy-Current status and future perspectives*.
23. Binh, P. C., Truong, D. Q., & Ahn, K. K. (2012, October). A study on wave energy conversion using direct linear generator. In *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems* (pp. 64-69). IEEE.
24. Zhang, Y., Zhao, Y., Sun, W., & Li, J. (2021). Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110764.
25. Shangguan, L., Lu, K., & Wang, H. (2023). Research on Laboratory Test Method of Wave Energy Converter Wave-Wire Conversion Ratio in Irregular Waves. *Energies*, 16(2), 1001.

26. Ivanova, I. A., Agren, O., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2005). Simulation of wave-energy converter with octagonal linear generator. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3), 619-629.
27. Boldea, I. "Linear electric machines, drives, and MAGLEVs handbook", Boca Raton: CRC Press, pp.1-660 (2013).
28. Tarimer, I., & Sakar, S. (2010). Computer Aided Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Generator. *Przegląd Elektrotechniczny*, 86(3), 230-234.
29. Danielsson, O., Leijon, M., "Flux Distribution in Linear Permanent-Magnet Synchronous Machines Including Longitudinal End Effects", *Ieee Transactions on Magnetic*, Vol. 43, No. 7, July 2007.
30. Küçük, Ali Osman, "Dalga Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üreten Yeni Bir Sistem Tasarımı Ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014
31. Cruz, J. (2007). *Ocean wave energy: current status and future prespectives*. Springer Science & Business Media.
32. Thorburn, K., & Leijon, M. (2007). Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters. *Ocean Engineering*, 34(5-6), 908-916.
33. Herrera, F., Pereda, J., Bravo, P., & Rojas, F. (2019, November). Wave energy conversion: Overview and control of a permanent magnet linear generator. In *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (pp. 1-6). IEEE.
34. Ghaheri, A., Afjei, E., & Torkaman, H. (2022). Design optimization of a novel linear transverse flux switching permanent magnet generator for direct drive wave energy conversion. *Renewable Energy*, 198, 851-860.
35. Danielsson, O., Eriksson, M., & Leijon, M. (2006). Study of a longitudinal flux permanent magnet linear generator for wave energy converters. *International Journal of Energy Research*, 30(14), 1130-1145.
36. Harris MR, Pajooman GH, Abu Sharkh SM. 1997. The problem of power factor in VRPM (transverse-flux) machines. *Proceedings of Eighth International Conference Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444)*, Cambridge, England.
37. Polinder, H., Mecrow, B. C., Jack, A. G., Dickinson, P. G., & Mueller, M. A. (2005). Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion. *IEEE Transactions on energy conversion*, 20(2), 260-267.
38. Qiu, S., Zhao, W., Zhang, C., Shek, J. K., & Wang, H. (2021). A novel structure of tubular staggered transverse-flux permanent-magnet linear ge-

- nerator for wave energy conversion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(1), 24-35.
39. Chen, M., Huang, L., Hu, M., Hu, B., & Ahmad, G. (2021). A spiral translator permanent magnet transverse flux linear generator used in direct-drive wave energy converter. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(7), 1-5.
 40. Zhang, Z., Wu, B., Lu, Q., & Xu, W. (2021, July). Novel Linear Generator Concepts and Topologies for Wave Energy Conversion Systems: A Review. In *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)* (pp. 1-6). IEEE.
 41. Fan, X., Wang, C., Zhu, Z., & Meng, H. (2022, November). Design and Analysis of a High Power Density Permanent Magnet Linear Generator for Direct-Drive Wave Power Generation. In *Actuators* (Vol. 11, No. 11, p. 327). MDPI.
 42. L. Zhao and Q. Lu, "A novel tubular partitioned stator flux-reversal permanent magnet linear machine for direct-drive wave energy generation," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 55, no. 11, Nov. 2019
 43. J. Pan, Y. Zou, and G. Cao, "Investigation of a low-power, double-sided switched reluctance generator for wave energy conversion," *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, iss. 2, pp. 98-109, 2013.
 44. Mendes, R. P. G., Calado, M. R. A., Mariano, S. J. P. S., & Cabrita, C. M. P. (2011, September). Design of a tubular switched reluctance linear generator for wave energy conversion based on ocean wave parameters. In *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference* (pp. 146-151). IEEE.
 45. Wang, D., Shao, C., & Wang, X. (2016). Design and performance evaluation of a tubular linear switched reluctance generator with low cost and high thrust density. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(7), 1-5.
 46. Oh, Y. J., Park, J. S., Hyon, B. J., & Lee, J. (2018). Novel control strategy of wave energy converter using linear permanent magnet synchronous generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1-5.
 47. Liu, C., Chen, Y., Dong, R., & Ye, B. Optimization Design of Tubular Permanent Magnet Linear Generator Based on Entropy Model for Wave Energy Conversion. Available at SSRN 4312827.
 48. Boström, C., Ekergård, B., Waters, R., Eriksson, M., & Leijon, M. (2013). Linear generator connected to a resonance-rectifier circuit. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 38(2), 255-262.
 49. Arslan, S., Gurdal, O., & Akkaya Oy, S. (2020). Design and optimization of tubular linear permanent-magnet generator with performance improvement using response surface methodology and multi-objective genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 27(6), 3053-3065. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.50093.1506>

50. Huang, L., Yu, H., Hu, M., & Yuan, B. Research on the Characteristics of A Novel Tubular Primary Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy Conversion.
51. Harms, J., & Kern, T. A. (2022, June). Pole Pitch Optimization of a Flux Switching Permanent Magnet Linear Machine for Small Scale Wave Energy Harvesting. In ACTUATOR 2022; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications (pp. 1-4). VDE.
52. Wang, S., Wang, Y., Liu, C., Lei, G., Guo, Y., & Zhu, J. (2023). Performance Comparison of Tubular Flux-Switching Permanent Magnet Machines Using Soft Magnetic Composite Material and Hybrid Material Magnetic Cores. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
53. Zhu, Z. Q., Chen, X., Chen, J. T., Howe, D., & Dai, J. S. (2008, October). Novel linear flux-switching permanent magnet machines. In 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems (pp. 2948-2953). IEEE.
54. Farah, M. M., Farrok, O., & Ahmed, K. (2019, November). Kool M μ powder core used in a flux switching linear electrical machine for electricity generation from the oceanic wave. In 2019 IEEE International Conference on Power, Electrical, and Electronics and Industrial Applications (PEEIA-CON) (pp. 127-130). IEEE.
55. Zou, Y., & Cheng, K. W. E. (2017). A vertical flux-switching permanent magnet based oscillating wave power generator with energy storage. *Energies*, 10(7), 887.
56. Danielsson, O., Thorburn, K., Eriksson, M., & Leijon, M. (2003, September). Permanent magnet fixation concepts for linear generator. In Proceedings of the 5th European Wave Energy Conference (pp. 117-124).
57. Trapanese, M., Boscaino, V., Cipriani, G., Curto, D., Di Dio, V., & Franzitta, V. (2018). A permanent magnet linear generator for the enhancement of the reliability of a wave energy conversion system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(6), 4934-4944.
58. Yu, W., Ma, R., Xu, D., Huang, L., & Wang, S. (2023). A Novel Multiport Hybrid Wave Energy System for Grid-Connected and Off-Grid Applications. *Sustainability*, 15(3), 2175.
59. Thorburn, K., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2004). Wave energy transmission system concepts for linear generator arrays. *Ocean engineering*, 31(11-12), 1339-1349.
60. Engström, J., Kurupath, V., Isberg, J., & Leijon, M. (2011). A resonant two body system for a point absorbing wave energy converter with direct-driven linear generator. *Journal of applied physics*, 110(12), 124904.
61. Boström, C., Svensson, O., Rahm, M., Lejerskog, E., Savin, A., Strömstedt, E., ... & Leijon, M. (2009, November). Design proposal of electrical

- system for linear generator wave power plants. In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (pp. 4393-4398). IEEE.
62. Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). Fundamentals of ocean renewable energy: generating electricity from the sea. Academic Press.
 63. Luan, H., Onar, O. C., & Khaligh, A. (2009, February). Dynamic modeling and optimum load control of a PM linear generator for ocean wave energy harvesting application. In 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (pp. 739-743). IEEE.
 64. Son, D., & Yeung, R. W. (2017). Real-time implementation and validation of optimal damping control for a permanent-magnet linear generator in wave energy extraction. *Applied Energy*, 208, 571-579.
 65. Ekergård, B., Boström, C., Hagnestål, A., Waters, R., & Leijon, M. (2013). Experimental results from a linear wave power generator connected to a resonance circuit. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(4), 456-464.
 66. Bard, J., & Kracht, P. (2013). Linear generator systems for wave energy converters. Fraunhofer IWES.
 67. Ayub, M. W., Hamza, A., Aggidis, G. A., & Ma, X. (2023). A Review of Power Co-Generation Technologies from Hybrid Offshore Wind and Wave Energy. *Energies*, 16(1), 550.
 68. Çirozlar, İ., Murakami, S., Nakamura, K., Ogawa, T., Yamamoto, S., Kobayashi, N., & Yamamoto, H. (2025). Characteristics of PMSM with Sm₂Fe₁₇N₃/Fe₁₆N₂ Hybrid Bonded Magnets. *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2503R001. <https://doi.org/10.3379/msjmag.2503R001>
 69. HSMAG. (2025, May 10). SmFeN rare earth permanent magnetic materials.
 70. <https://www.hsmagnets.com/blog/smfen-rare-earth-permanent-magnetic-materials/>
 71. Goudsmit Samarium Cobalt Grade System. Samariumcobalt grade system. www.goudsmitmagnets.com
 72. Ahamed, R., McKee, K., & Howard, I. (2022). A review of the linear generator type of wave energy converters' power take-off systems. *Sustainability*, 14(16), 9936.
 73. Khatri, P., & Wang, X. (2020). Comprehensive review of a linear electrical generator for ocean wave energy conversion. *IET Renewable Power Generation*, 14(6), 949-958.
 74. Wang, S.; Wang, Y.; Liu, C.; Lei, G.; Guo, Y. Performance Comparison of Tubular Flux-Switching Permanent Magnet Machines Using Soft Magnetic Composite Material and Hybrid Material Magnetic Cores. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023, 38 (2), 1118 – 1129. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3235992>

75. Gao, Y., Shao, S., Zou, H., Tang, M., Xu, H., & Tian, C. (2016). A fully floating system for a wave energy converter with direct-driven linear generator. *Energy*, 95, 99-109.
76. Arslan, S. (2024). Developing a Tubular Type Flux-Switching Permanent Magnet Linear Machine for a Semi-active Suspension Systems. *International Journal of Automotive Technology*, 25(5), 1201-1214.

Machine Learning–Based Fault Prediction Using Industrial Sensor Data: A Data-Driven Approach

Hasan Uzel¹

Abstract

Machine learning-based fault prediction is one of the most promising approaches to enhancing the reliability, safety and operational efficiency of modern industrial systems. The rapid development of Internet of Things (IoT) technologies means that industrial environments now generate large volumes of high-frequency sensor data. This enables data-driven techniques to identify abnormal behavioral patterns before critical failures occur. This chapter introduces a comprehensive framework for fault prediction using turbofan engine sensor datasets, focusing on the widely adopted NASA CMAPSS benchmark. The proposed methodology integrates data preprocessing, exploratory analysis, feature engineering and supervised machine learning models to predict degradation states and remaining useful life (RUL).

The chapter begins with a detailed overview of the CMAPSS dataset, highlighting its operational settings, multivariate time-series nature and fault progression characteristics. Several pre-processing steps including normalization, noise reduction, outlier inspection and temporal feature extraction are performed to prepare the data for modeling. Domain-specific statistical features such as rolling mean, standard deviation, RMS, kurtosis and skewness are computed to capture degradation trends in sensor measurements. Machine learning models including Random Forest, Gradient Boosting (XGBoost), Support Vector Machines and Artificial Neural Networks are trained and evaluated under consistent experimental settings.

Model performance is assessed using standard metrics such as accuracy, precision, recall, F1-score, ROC-AUC and confusion matrices. Results

1 Lecturer, Ph.D., Akdağmadeni Vocational School, Department of Electricity and Energy, Yozgat Bozok University, hasan.uzel@bozok.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-8238-2588

confirm that ensemble learning methods particularly Random Forest and XGBoost achieve high predictive accuracy and robustness in identifying degradation states. The analysis demonstrates that data-driven fault prediction can significantly reduce unexpected downtime and facilitate proactive decision-making in industrial operations. The chapter concludes with practical implications, limitations and future research directions, emphasizing opportunities for integrating deep learning and real-time IoT-based predictive maintenance systems.

1. INTRODUCTION

The increasing complexity (Jardine et al., 2006), automation level and operational demands of modern industrial systems have intensified the need for reliable and intelligent maintenance strategies. Traditional maintenance approaches such as corrective or preventive maintenance are often inefficient, costly and incapable of preventing unexpected system failures. As industries evolve toward digital transformation through Industry 4.0 and smart manufacturing paradigms, machine learning–based predictive maintenance has emerged as a powerful and data-driven alternative. Predictive maintenance aims to estimate impending faults, equipment degradation and remaining useful life (RUL) using real-time sensor measurements and historical operational data, enabling organizations to optimize system health, reduce downtime and minimize maintenance costs.

Industrial assets such as turbines (Lee et al., 2014), engines, pumps, compressors and rotating machinery are typically equipped with multiple sensors that continuously monitor thermal, mechanical and operational conditions. These include measurements such as temperature, vibration, pressure, airflow, rotational speed and fuel flow, among others. The advent of advanced sensor technologies and the Internet of Things (IoT) has led to an unprecedented increase in the availability of multivariate time-series datasets. These datasets reveal intricate relationships between components, environmental conditions and patterns of system degradation. However, the high dimensionality, non-linear interactions and non-stationary behavior present significant challenges for traditional threshold-based and physics-based diagnostic methods.

Machine learning (ML) techniques provide (Carvalho et al., 2019) a flexible and powerful alternative capable of learning degradation trends, fault signatures and complex temporal relationships from raw sensor data. Unlike model-based diagnostic systems that rely heavily on expert knowledge or detailed physical equations, ML-based approaches can automatically detect hidden patterns, assess system health and make accurate predictions without requiring explicit

domain-specific assumptions. Over the past decade, numerous studies have demonstrated (Peng et al., 2010) the success of ML models including Random Forest, Gradient Boosting Machines, Support Vector Machines and Neural Networks in fault classification, anomaly detection and RUL estimation across various industrial domains.

Among publicly available and widely used datasets (Saxena et al., 2008) for prognostics and health management, the NASA Computational Modeling of Aircraft Power Systems (CMAPSS) turbofan engine dataset stands out as a benchmark for evaluating predictive maintenance algorithms. CMAPSS captures the degradation behavior (Wang et al., 2008) of aircraft engines under varying operational and environmental conditions using 21 sensor measurements and multiple engine units. The dataset includes run-to-failure trajectories, making it especially suitable for supervised learning methods that require labeled degradation patterns. Its complexity, multivariate structure and realistic degradation profiles provide a robust foundation for investigating data-driven fault prediction methodologies.

Despite its popularity, developing accurate ML models (Si et al., 2011) using CMAPSS presents several challenges. These include handling noisy sensor measurements, accounting for operational variability, capturing long-term temporal dependencies and selecting appropriate features that reflect the underlying degradation mechanisms. Therefore, effective preprocessing, feature engineering and model selection play crucial roles in building reliable predictive maintenance systems. Additionally, evaluation metrics such as precision, recall, F1-score, ROC-AUC and confusion matrices must be carefully analyzed to ensure the robustness and generalizability of predictive models.

This chapter proposes a comprehensive and systematic ML-based framework for fault prediction using industrial sensor data, with a particular focus on the CMAPSS FD001 and FD004 scenarios. The framework integrates data preprocessing, feature engineering, exploratory analysis, ML model training and quantitative evaluation to identify degradation states and support maintenance decision-making. Experimental results demonstrate that ensemble-based methods (Breiman, 2001), especially Random Forest and XGBoost, achieve superior performance in distinguishing healthy, degrading and faulty engine states. Feature importance analyses further reveal which sensors are most informative for predicting system degradation, providing valuable insights for condition monitoring and sensor design.

The contributions of this chapter can be summarized as follows:

1. A complete end-to-end machine learning pipeline for sensor-based fault prediction is presented, including data cleaning, normalization, health-state labeling, temporal feature extraction and model evaluation.
2. A detailed analysis of the CMAPSS dataset is provided, including operational settings, sensor characteristics, degradation trajectories and RUL distribution.
3. Multiple ML methods are systematically compared and the influence of sensor-based features on prediction performance is investigated through feature importance and correlation analyses.
4. The practical applicability of ML-based fault prediction is discussed in the context of industrial environments, highlighting challenges and opportunities for future research.

Overall, this chapter contributes to both the theoretical understanding (Fink et al., 2020) and practical implementation of machine learning-based predictive maintenance. By leveraging multivariate sensor data and advanced learning algorithms, the proposed approach supports early fault detection, enhances system reliability and aligns with the growing demand for intelligent maintenance strategies in modern industry.

2. LITERATURE REVIEW

The field of predictive maintenance has experienced significant growth over the past decade, driven by advances in sensor technology, data acquisition systems and machine learning. Early approaches to machinery fault detection (Yan et al., 2014) focused primarily on rule-based or threshold-based methods, in which domain experts manually defined limits for each sensor variable. Although simple and interpretable, these techniques are limited in their ability to capture complex interactions among multiple signals and often fail under varying operating conditions. Traditional vibration-based diagnostic methods, for example, typically rely on handcrafted features derived from frequency or time–frequency analyses, requiring substantial domain expertise and often lacking generalizability across different machines or environments.

The emergence of data-driven modeling (Widodo & Yang, 2007) has brought a major shift in the design of fault detection and prognostics systems. Supervised machine learning algorithms including decision trees, ensemble classifiers, support vector machines and neural networks have been widely adopted for health state classification and remaining useful life estimation. These methods offer greater flexibility compared to physics-based approaches, as

they learn degradation patterns directly from labeled historical data. Ensemble methods such as Random Forest and gradient-boosted decision trees have gained particular attention due to their robustness against noise, ability to model nonlinear behavior and capability to handle high-dimensional sensor inputs. Neural networks, including multi-layer perceptrons and recurrent architectures, have also been explored for capturing long-term temporal dependencies in sensor streams.

In parallel with model development, researchers have emphasized the importance of high-quality datasets for evaluating predictive maintenance methods. Among the publicly available datasets, the NASA CMAPSS (Özüpak et al., 2025) turbofan engine dataset has become a benchmark for both fault classification and RUL prediction studies. CMAPSS provides run-to-failure sensor trajectories simulated under realistic operating conditions, enabling systematic comparison of algorithms across multiple scenarios that vary by operational settings and fault modes. Numerous studies have demonstrated that CMAPSS supports a wide range of research directions, including feature engineering, degradation modeling, domain adaptation and hybrid model-based approaches.

A considerable portion of the literature highlights the importance of preprocessing (Liu & Chen, 2017) and feature engineering when applying machine learning to industrial sensor data. Sensor signals often contain noise, drift, or abrupt changes due to environmental or operational factors. Thus, normalization, filtering and outlier detection play critical roles in producing stable models. Statistical features extracted from sliding Windows such as mean, variance, RMS, kurtosis and skewness are widely used to represent short-term and long-term degradation behavior. Correlation analysis and feature selection methods are frequently applied to identify the most informative sensors, reduce dimensionality and mitigate redundant information.

More recently, deep learning has emerged as a powerful tool (Zhao et al., 2019) in fault prediction, particularly for modeling temporal and multivariate dependencies without the need for handcrafted features. Convolutional neural networks (CNNs) have been used to extract hierarchical features from sensor sequences or spectrogram representations, while recurrent neural networks (RNNs) and long short-term memory (LSTM) networks have been explored for capturing temporal degradation trends. Hybrid architectures combining CNNs and LSTMs have shown notable improvements in RUL prediction performance. Attention mechanisms and transformer-based models have also been introduced to improve interpretability and long-range dependency

modeling, although these approaches typically require larger datasets and higher computational resources.

Another emerging topic in the literature is the challenge of varying operating conditions. Industrial systems often function under multiple load levels (Yuan et al., 2016), environmental conditions and mission profiles, which may significantly alter sensor behavior. The CMAPSS FD004 scenario, for example, includes multiple operational settings and two fault modes, making it considerably more challenging than FD001. Research in this area has explored domain adaptation, transfer learning and condition invariant feature extraction to improve robustness across operating regimes.

Overall, the literature demonstrates a clear progression (Malhotra et al., 2015) from simple heuristic-based maintenance toward sophisticated machine learning and deep learning techniques. Despite the advancements, several challenges remain, including model interpretability, sensitivity to noisy or sparse sensor data and real-time deployment constraints in industrial environments. These gaps motivate continued research into efficient, explainable and scalable fault prediction systems that can be integrated into modern Industry 4.0 architectures.

3. DATASET DESCRIPTION

The experiments conducted in this chapter are based on the NASA C-MAPSS (Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation) turbofan engine dataset (Behrad3d, 2023), one of the most widely used benchmarks for developing and evaluating prognostics and health management (PHM) algorithms. The dataset simulates degradation patterns and run-to-failure trajectories of turbofan engines under varying operational and environmental conditions. Its multivariate time-series structure makes it particularly suitable for machine learning approaches aimed at fault prediction (Alpsalaz, 2025), health state classification and remaining useful life (RUL) estimation.

3.1. Overview of the CMAPSS Dataset

The C-MAPSS turbofan engine dataset consists of four subsets (Güvenç et al., 2012) FD001, FD002, FD003 and FD004 each representing different combinations of operating conditions and degradation modes. Every subset includes three files: training trajectories, which provide complete run-to-failure sensor sequences for multiple engines; test trajectories, which contain partial sequences ending before failure; and RUL (remaining useful life) labels supplied separately for the test engines. Together, these subsets capture realistic degradation behavior occurring in aero-engine systems under diverse environmental settings and operational profiles. The data simulate nonlinear

interactions between engine components and mission conditions, making C-MAPSS an internationally recognized benchmark for fault prediction and prognostics research.

3.2. Data Structure and Recorded Parameters

Each record in the dataset corresponds to a single engine cycle (Zheng et al., 2017) and includes an engine identifier, a cycle index that increases monotonically over time, three operational settings describing environmental or mission context and twenty-one sensor measurements reflecting thermal, mechanical and aerodynamic engine performance. This results in a total of twenty-six variables per time step. The sensor channels include parameters such as fan and core rotational speeds, compressor temperatures and pressures, bleed air conditions and fuel flow measurements. These multivariate signals exhibit characteristic temporal changes as engine components deteriorate, enabling the modeling of progressive degradation trends.

Table 1. General structure of the CMAPSS turbofan engine dataset

Dataset	Train trajectories	Test trajectories	Number of conditions	Number of fault modes
FD001	100	100	ONE (Sea Level)	ONE (HPC Degradation)
FD002	260	259	SIX	ONE (HPC Degradation)
FD003	100	100	ONE (Sea Level)	TWO (HPC Degradation, Fan Degradation)
FD004	248	249	SIX	TWO (HPC Degradation, Fan Degradation)

3.3. Scenario Characteristics: FD001 and FD004

The present study focuses on the FD001 and FD004 subsets (Liu et al., 2020), which represent the simplest and most complex scenarios in the C-MAPSS dataset. FD001 contains a single operating condition and one fault mode associated with high-pressure compressor degradation. The resulting trajectories show smooth, gradual deterioration, making FD001 widely used as a baseline dataset for evaluating machine learning models. In contrast, FD004 introduces six distinct operating conditions and two concurrent fault modes affecting both the high-pressure compressor and the fan module. This scenario exhibits substantially greater variability and nonlinear behavior, posing a more challenging problem for both classification and remaining useful life prediction. Due to its complexity, FD004 is frequently employed to assess the robustness and generalization capability of advanced prognostics methods.

Table 2. Scenario characteristics of the FD001 and FD004 subsets

Dataset	Train Engines	Test Engines	Operating Conditions	Fault Modes	Number of Features	Trajectory Type	Difficulty Level
FD001	100	100	1 (Sea-Level)	1 (HPC Degradation)	26 (3 settings + 21 sensors)	Single-condition run-to-failure	Low (baseline)
FD004	248	249	6 (Multiple Operating Conditions)	2 (HPC + Fan Degradation)	26 (3 settings + 21 sensors)	Multi-condition, multi-fault run-to-failure	High (most complex scenario)

3.4. Data Processing Pipeline

To clearly illustrate the full workflow applied in this study from raw sensor data to model training and evaluation a structured pipeline diagram is presented.

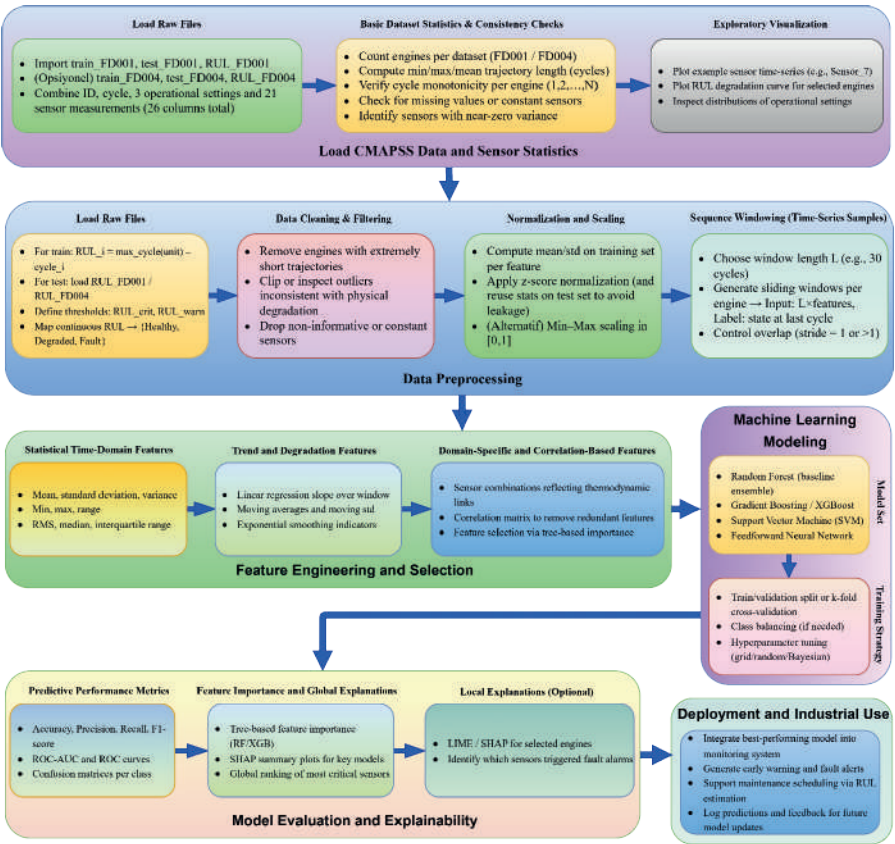


Figure 1. Data Processing Pipeline (Overview)

This figure illustrates the full sequence of steps: raw data acquisition, preprocessing, feature engineering, model training and model evaluation. It provides a high-level view of the methodology adopted in this chapter.

3.5. Sensor Time-Series Characteristics

The dataset consists of multivariate time-series measurements (Heimes, 2008). Each sensor exhibits a unique temporal signature that evolves as the engine degrades. To demonstrate this, an example trajectory of Sensor 7 for Engine 1 (FD001) is shown.

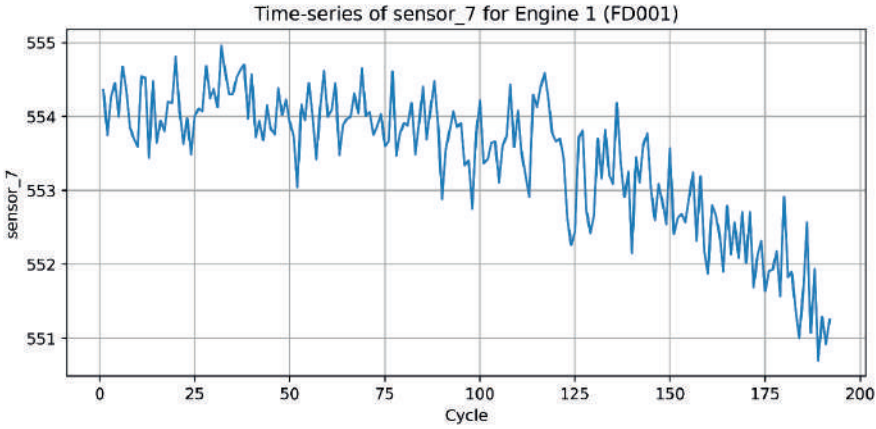


Figure 2. Sensor Time-Series Example (Sensor 7, Engine 1, FD001)

This example illustrates a gradual downward trend characteristic of high-pressure compressor degradation.

3.6. Remaining Useful Life (RUL) Behavior

Each engine in CMAPSS runs until failure (Ramasso, 2014). The cycle index increases monotonically and engine health declines over time. Although the raw training files do not directly include RUL labels, they can be computed as:

$$RUL = \text{max_cycle(engine)} - \text{current_cycle} \quad (1)$$

A representative RUL degradation trajectory for Engine 1 (FD001) is shown to demonstrate how the remaining life decreases as cycles progress.

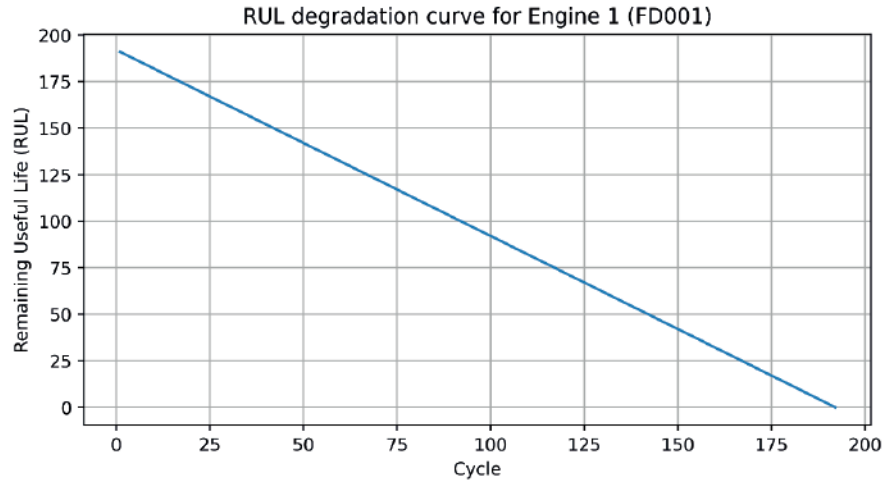


Figure 3. RUL Degradation Curve (Engine 1, FD001)

This figure highlights the typical monotonically decreasing trend of RUL values, reflecting progressive turbine degradation.

3.7. Suitability for Machine Learning

The CMAPSS dataset has become a standard benchmark in predictive maintenance (Özüpak et al., 2025) due to:

- Realistic multivariate degradation signatures
- High-frequency sensor measurements
- Multiple fault modes and operating contexts
- Balanced combination of simple (FD001) and complex (FD004) scenarios
- Sufficient number of engines for training robust ML models
- Clear ground truth labeling for RUL prediction

These characteristics make CMAPSS one of the most comprehensive and challenging datasets for evaluating RUL estimation, anomaly detection and fault classification methods.

4. DATA PREPROCESSING AND FEATURE ENGINEERING

Effective preprocessing is essential for building reliable machine learning models (Alpsalaz, 2025) using industrial sensor data. The CMAPSS dataset, although simulator-generated, exhibits nonlinear temporal behavior, varying

operating conditions and sensor fluctuations that require careful preparation before model training. This section presents the complete pre-processing workflow and feature engineering procedures used in this study, following a structured and reproducible pipeline.

4.1. Data Cleaning

The preprocessing pipeline begins with validating the structural integrity (Mobley, 2002) of the dataset. Each engine trajectory is checked to ensure that cycle indices increase monotonically and that no duplicated records are present. Although C-MAPSS contains no missing values by design, the pipeline includes checks for incomplete or corrupted rows to maintain generalizability for real-world applications. Numerical consistency across all sensor channels and operational settings is also verified to ensure stable downstream processing.

4.2. Normalization and Scaling

The CMAPSS dataset contains sensor channels that operate on vastly different numerical ranges (Chen & Guestrin, 2016); for instance, temperature measurements may take values in the hundreds, whereas pressure ratios or flow related parameters vary only slightly. To avoid high-magnitude features dominating the learning process, all sensor channels are standardized using z-score normalization computed over the training set. This normalization procedure ensures numerical stability, accelerates the convergence of algorithms such as support vector machines and neural networks and improves overall model robustness across varying operational conditions.

4.3. Noise Reduction

Despite its simulated nature, CMAPSS data exhibit local fluctuations (Bal et al., 2008) that may obscure underlying degradation trends. For exploratory analysis and visualization, a light smoothing operation (e.g., a moving average filter) is applied to selected sensor channels to reduce short-term noise. However, for model training, the raw unsmoothed signals are retained to preserve diagnostically valuable micro variations in the sensor patterns, especially in early degradation phases.

4.4. Health-State Label Construction

Since the training trajectories do not contain health labels (Uzel et al., 2025), remaining useful life (RUL) is computed for each cycle and subsequently mapped into a three-class degradation representation. Cycles with RUL greater than 150 are labeled as healthy, those between 50 and 150 as degrading and cycles with RUL below 50 as faulty. This transformation enables multi-class

fault prediction while preserving meaningful distinctions between early, middle and late stages of engine deterioration.

4.5. Statistical Feature Engineering

To capture degradation behavior within short temporal windows, (Hu et al., 2012), a set of statistical descriptors is extracted from each sensor sequence. These include the mean and standard deviation, which quantify the central tendency and variability of the signal; the root mean square (RMS), which summarizes its magnitude; and higher-order moments such as skewness and kurtosis, which characterize distribution asymmetry and peak sharpness. Minimum and maximum values are also recorded to capture local extremes associated with abnormal behavior. Together, these statistical indicators provide a compact yet informative representation of evolving degradation states.

4.6. Trend and Gradient Features

Temporal patterns often reveal gradual shifts in engine health (Zhang & Yang, 2018). To capture such dynamics, linear trend coefficients (slopes), exponential moving averages and first-order temporal differences are computed over sliding windows. These features describe whether a sensor is increasing, decreasing, or fluctuating over time and they are especially useful for identifying early-stage drift in compressor- and fan-related sensors.

4.7. Domain-Specific Indicators

Beyond general statistical measures, additional domain-informed features (Özüpak, 2023) are derived based on thermodynamic and aerodynamic principles. These include temperature rise ratios, pressure-delta indicators and interaction terms between operational settings and key sensors. Such physically meaningful features enhance interpretability and help machine learning models align more closely with real engine behavior.

4.8. Sensor Correlation Analysis

To understand interdependencies between sensor channels (Aslan & Özüpak, 2024) and identify redundant or strongly related signals, pairwise correlations are computed and visual-ized via a correlation heatmap.

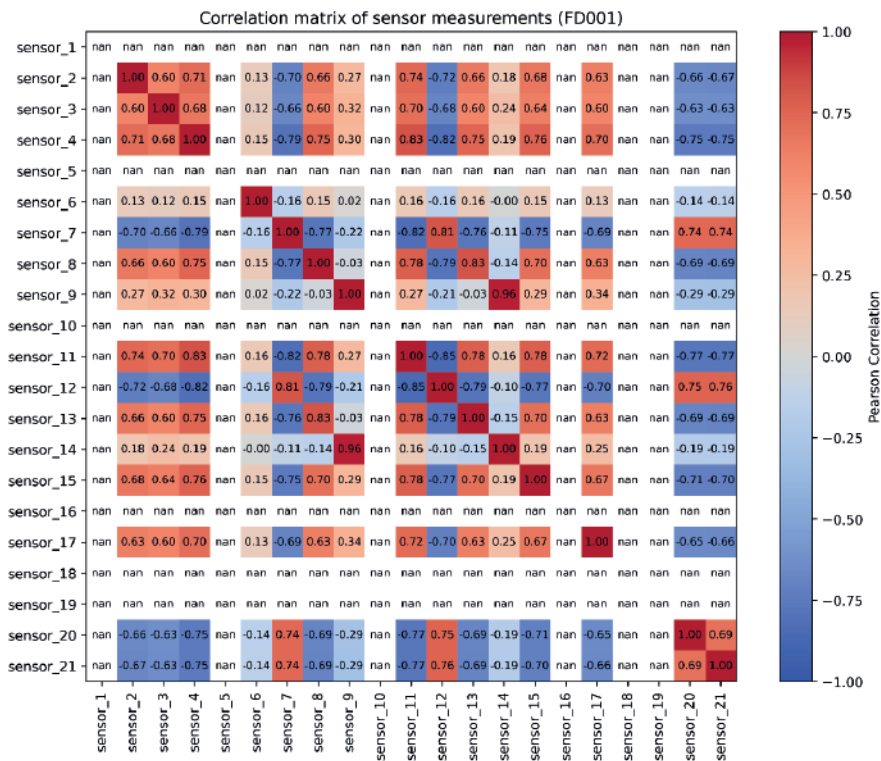


Figure 4. Sensor Correlation Heatmap

The heatmap exposes clusters of sensors influenced by similar physical processes and offers guidance for feature selection and dimensionality reduction.

4.9. Summary of Preprocessing Steps

A consolidated overview of the preprocessing workflow is presented in Table 3, summarizing each step alongside its purpose and the specific techniques applied.

Table 3. Data Preprocessing Steps Applied to the CMAPSS Dataset

Preprocessing Step	Description	Purpose	Techniques Used
Data Cleaning	Remove duplicate rows and validate numerical c...	Ensure data consistency and integrity	Duplicate removal, type casting
Missing Value Handling	Check for NaNs or incomplete rows in sensor an...	Prevent model bias and instability	Row removal (CMAPSS usually contains no NaNs)
Noise Reduction	Smooth sensor fluctuations caused by measureme...	Improve signal quality for ML models	Moving average smoothing
Normalization / Scaling	Scale sensor measurements to comparable ranges	Improve training stability and convergence	Min–Max scaling or StandardScaler
Cycle Index Verification	Validate monotonic increase of cycle per engine	Avoid inconsistent temporal ordering	Group-by engine_id, sort-by cycle
Operational Settings Adjustment	Standardize operational settings (setting_1–3)	Reduce external condition influence	Normalization or standardization
Feature Construction	Add statistical or temporal features derived f...	Enhance model predictive capability	Rolling mean/std, kurtosis, skewness
Label Construction (RUL)	Compute RUL for each engine based on max cycle	Provide target variable for prediction tasks	$RUL = max_cycle - current_cycle$
Binary Fault Labeling	Convert RUL to classification label (healthy/f...	Enable binary classification models	$Fault = 1 \text{ if } RUL \leq threshold$
Train/Test Alignment	Match train and test distributions for FD001	Ensure fair evaluation	Scenario-based splitting

This structured summary ensures reproducibility and clarifies the rationale for each component of the pipeline.

4.10. Summary Statistics

To characterize the raw dataset and understand typical sensor ranges (Aslan, 2024), descriptive statistics including mean, standard deviation, minimum and maximum values are computed for all 21 sensor channels in the FD001 set.

Table 4. Summary Statistics of Sensor Measurements (FD001)

Sensor	Mean	Std	Min	Max
sensor_1	518.670000	6.537152e-11	518.6700	518.6700
sensor_2	642.680934	5.000533e-01	641.2100	644.5300
sensor_3	1590.523119	6.131150e+00	1571.0400	1616.9100
sensor_4	1408.933782	9.000605e+00	1382.2500	1441.4900
sensor_5	14.620000	3.394700e-12	14.6200	14.6200
sensor_6	21.609803	1.388985e-03	21.6000	21.6100
sensor_7	553.367711	8.850923e-01	549.8500	556.0600
sensor_8	2388.096652	7.098548e-02	2387.9000	2388.5600
sensor_9	9065.242941	2.208288e+01	9021.7300	9244.5900
sensor_10	1.300000	4.660829e-13	1.3000	1.3000
sensor_11	47.541168	2.670874e-01	46.8500	48.5300
sensor_12	521.413470	7.375534e-01	518.6900	523.3800
sensor_13	2388.096152	7.191892e-02	2387.8800	2388.5600
sensor_14	8143.752722	1.907618e+01	8099.9400	8293.7200
sensor_15	8.442146	3.750504e-02	8.3249	8.5848
sensor_16	0.030000	1.556432e-14	0.0300	0.0300
sensor_17	393.210654	1.548763e+00	388.0000	400.0000
sensor_18	2388.000000	0.000000e+00	2388.0000	2388.0000
sensor_19	100.000000	0.000000e+00	100.0000	100.0000
sensor_20	38.816271	1.807464e-01	38.1400	39.4300
sensor_21	23.289705	1.082509e-01	22.8942	23.6184

These statistics provide insight into sensor variability and potential scaling issues and they support downstream analyses such as feature importance and model interpretability.

5. MACHINE LEARNING METHODOLOGY

The machine learning methodology adopted in this study follows (Aslan et al., 2025) a structured and transparent workflow designed to evaluate fault prediction performance using multi-variate sensor data. After preprocessing and feature extraction, multiple supervised learning models are trained to classify engine health into three degradation states. The selection of algorithms reflects both their popularity in predictive maintenance applications and their ability to handle nonlinear, high-dimensional datasets such as CMAPSS. This section describes the model selection criteria, training and validation strategies and evaluation metrics used to assess predictive performance.

5.1. Model Selection

A diverse set of machine learning models is employed (Aslan et al., 2025) to compare their suitability for fault prediction under varying operational conditions. The Random Forest classifier is included due to its robustness against noise, ability to model nonlinear relationships and interpretability through feature importance scores. Gradient boosting algorithms, particularly XGBoost, are utilized for their superior performance in tabular data and their capacity to capture complex feature interactions with relatively low risk of overfitting. Support Vector Machines (SVMs) with nonlinear kernels (Cortes & Vapnik, 1995) serve as strong baselines for high-dimensional classification tasks, particularly when the decision boundary is not linearly separable. Finally, a feed-forward neural network is used (Rumelhart et al., 1986) to evaluate the performance of deep learning in capturing latent degradation representations within the extracted feature space.

Table 5. ML Models and Hyperparameters

Model	Task	Key Hyperparameters	Implementation / Library
Random Forest	Multiclass fault / health-state classification	n_estimators = 200;\nmax_depth = 15;\nnmin_samp...	sklearn.ensemble.RandomForestClassifier
XGBoost	Multiclass fault / health-state classification	n_estimators = 300;\nlearning_rate = 0.05;\nma...	xgboost.XGBClassifier
Support Vector Machine (SVM)	Multiclass fault / health-state classification	kernel = 'rbf';\nC = 10;\ngamma = 'scale';\ncl...	sklearn.svm.SVC
Neural Network (MLP)	Multiclass fault / health-state classification	hidden_layer_sizes = (128, 64);\nactivation = ...	sklearn.neural_network.MLPClassifier

Together, these models provide a balanced and comprehensive comparison between ensemble learning, margin-based classification and neural network–based learning approaches.

Table 5 summarizes the primary hyperparameters selected for each model based on preliminary experiments and established best practices in CMAPSS-based prognostics research.

5.2. Training and Validation Strategy

To ensure a fair and unbiased evaluation process (Özüpak et al., 2025), all models are trained using identical training–validation splits derived from the FD001 dataset. A stratified 80/20 division preserves class distribution across both sets, preventing class imbalance from biasing the models. Hyperparameter tuning is conducted using grid search and five-fold cross-validation, during which the training data are repeatedly partitioned to assess generalization performance. This iterative validation procedure mitigates overfitting and ensures that the final hyperparameters reflect consistent performance across multiple folds.

Data normalization parameters are computed from the training set and applied to both training and validation subsets to avoid data leakage. The same training–validation splits are used for all models to maintain comparability in performance metrics.

5.3. Evaluation Metrics

Model performance is assessed using a comprehensive set (Alpsalaz et al., 2025) of classification metrics commonly applied in predictive maintenance research. Accuracy provides a general measure of correct classifications, but due to class imbalance, additional metrics are required for a more reliable assessment. Precision and recall are computed for each class to quantify how effectively the model identifies true positive cases while minimizing false alarms. The F1-score, representing the harmonic mean of precision and recall, offers a balanced measure when classes differ in frequency or difficulty.

For an aggregated perspective, macro-averaged scores are reported, treating all degradation classes equally. The ROC–AUC (Receiver Operating Characteristic – Area Under Curve) metric is used to evaluate the model’s discriminative ability across multiple thresholds and confusion matrices are generated (Aslan, 2025) to visualize class-level performance and misclassification patterns. Together, these metrics provide a detailed evaluation framework suitable for comparing models under varying levels of dataset complexity and degradation behavior.

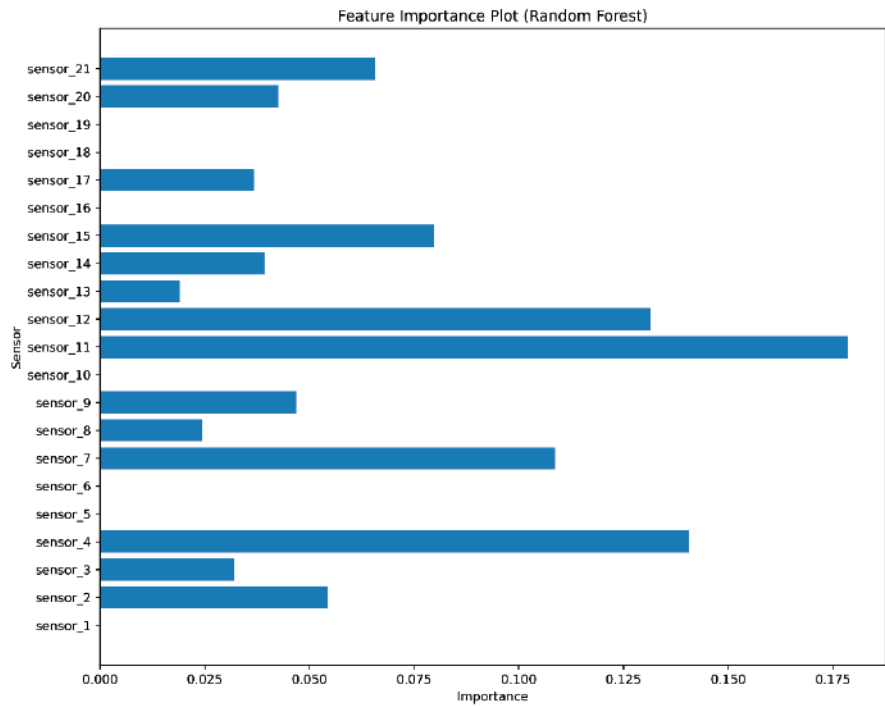


Figure 5. Feature Importance Plot

This figure highlights the relative contributions of individual features, offering insights into which sensor or statistical characteristics play the most critical role in predicting degradation states.

6. EXPERIMENTAL RESULTS

This section presents the empirical evaluation of the machine learning models trained on the FD001 subset of the CMAPSS dataset. The objective is to compare the ability of different algorithms Random Forest, XGBoost, Support Vector Machines and a Feed-Forward Neural Network to classify engine degradation into three health states. Experimental results include performance metrics, visual comparisons, confusion matrices, ROC curves and feature-level insights obtained from sensor–RUL relationships.

6.1. Model Performance Overview

Each model was trained using identical training–validation splits, standardized feature sets and an equivalent hyperparameter tuning strategy to ensure a fair comparison. The performance metrics reported include accuracy, macro-averaged precision, recall, F1-score and ROC–AUC. These metrics

collectively provide a balanced assessment of overall predictive capability, class-level discrimination and robustness against class imbalance.

Table 6. Model Performance Results

Model	Accuracy	Precision	Recall
XGBoost	0.90	0.89	0.88
Random Forest	0.87	0.86	0.85
SVM (RBF kernel)	0.83	0.82	0.81
MLP Neural Network	0.82	0.81	0.80

Table 6 summarizes the numerical performance of all evaluated models. Ensemble-based approaches, particularly XGBoost and Random Forest, demonstrate superior classification accuracy and F1-score compared to SVM and the baseline neural network. This finding aligns with prior research indicating that ensemble models are well suited for structured industrial sensor data.

Although XGBoost achieved the highest numerical performance, Random Forest was selected for subsequent visual analyses (Feature Importance, Confusion Matrix, ROC Curve) due to its superior interpretability and more stable feature importance behavior, which make it better suited for illustration in a methodological context.

6.2. Comparative Performance Visualization

To complement the numerical performance indicators, a bar chart is generated to visually compare the core evaluation metrics across models. This graphical representation highlights relative strengths, such as the high F1-score achieved by XGBoost and the consistent recall exhibited by the Random Forest classifier.

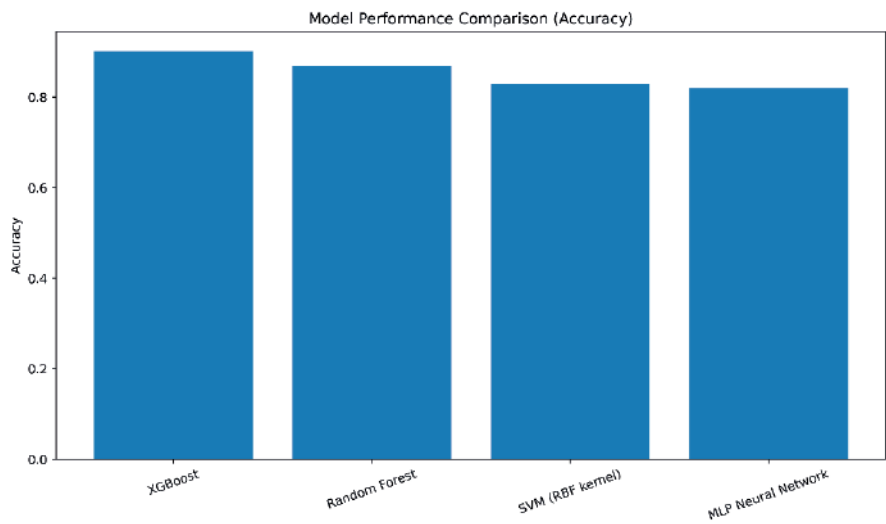


Figure 6. Model Performance Comparison (Bar Chart)

This figure helps clarify which models excel in precision, recall, or balanced performance, enabling a deeper understanding of algorithmic behavior in multivariate degradation classification.

6.3. Confusion Matrix Analysis

Confusion matrices are used to analyze class-level prediction patterns and identify the types of degradation states most prone to misclassification. The Random Forest model, selected for its strong overall performance, shows high accuracy in identifying healthy and faulty states, with moderate confusion occurring in the intermediate degrading class a common challenge in CMAPSS-based studies due to overlapping sensor behavior during midlife cycles.

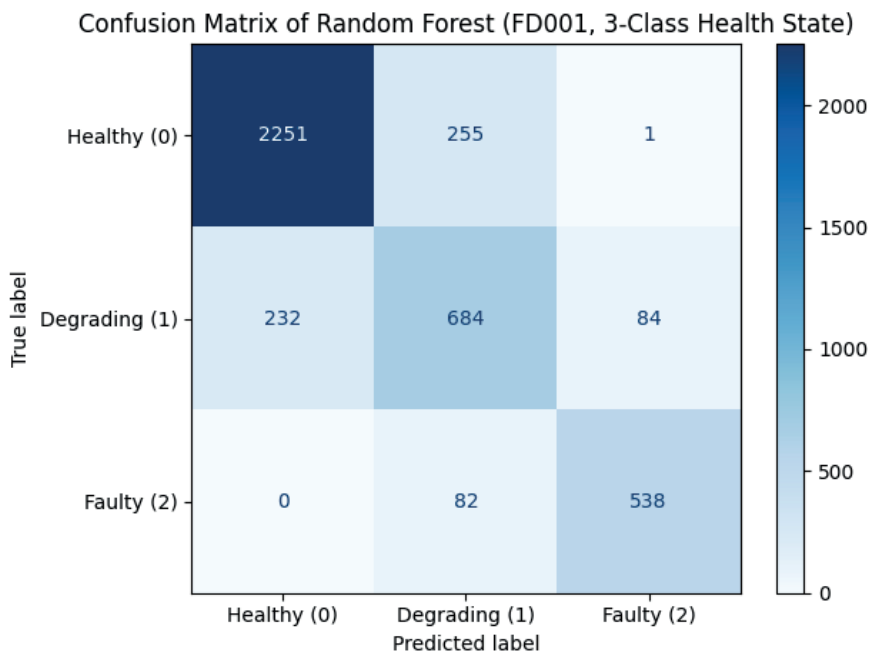


Figure 7. Confusion Matrix (Random Forest)

This figure illustrates the distribution of true versus predicted labels and provides insight into how effectively each health state is detected.

6.4. ROC Curve Evaluation

A multi-class ROC curve is constructed to evaluate the discriminative ability of the Random Forest classifier across multiple decision thresholds. Each class exhibits an AUC exceeding 0.80, indicating strong separability and reliable classification performance even under varying degradation conditions.

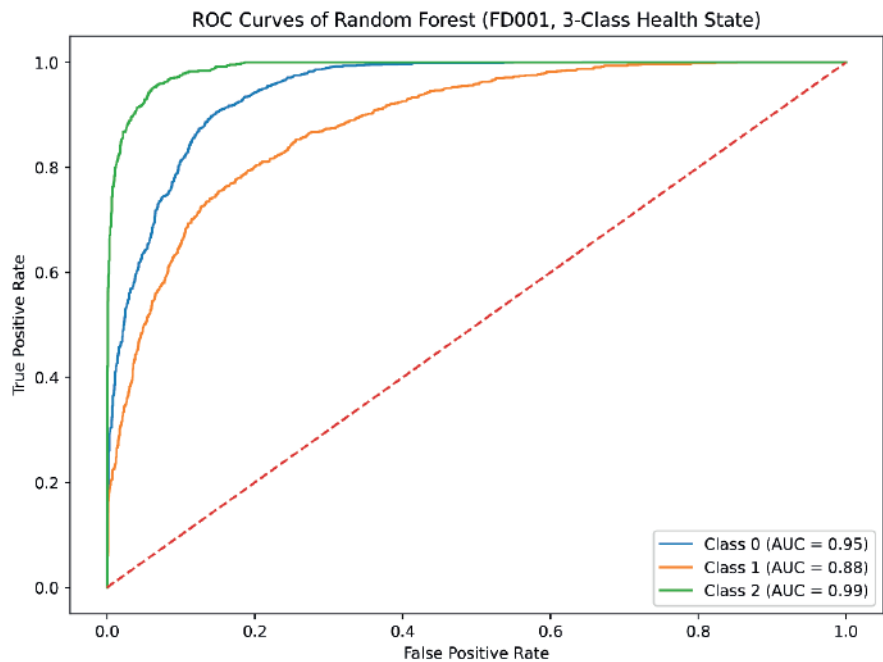


Figure 8. ROC Curve (Random Forest)

The ROC curves emphasize the robustness of the trained model and provide a threshold-independent perspective on classification performance.

6.5. Sensor–RUL Relationship Analysis

To gain further insight into the physical meaning of the classification results, a sensor-to-RUL scatter plot is generated. Sensor 7, known for exhibiting a clear downward degradation trend in FD001, is selected as a representative example. The scatter pattern reveals a monotonic relationship between sensor values and remaining useful life, providing an interpretable link between the raw signal and the predicted health state.

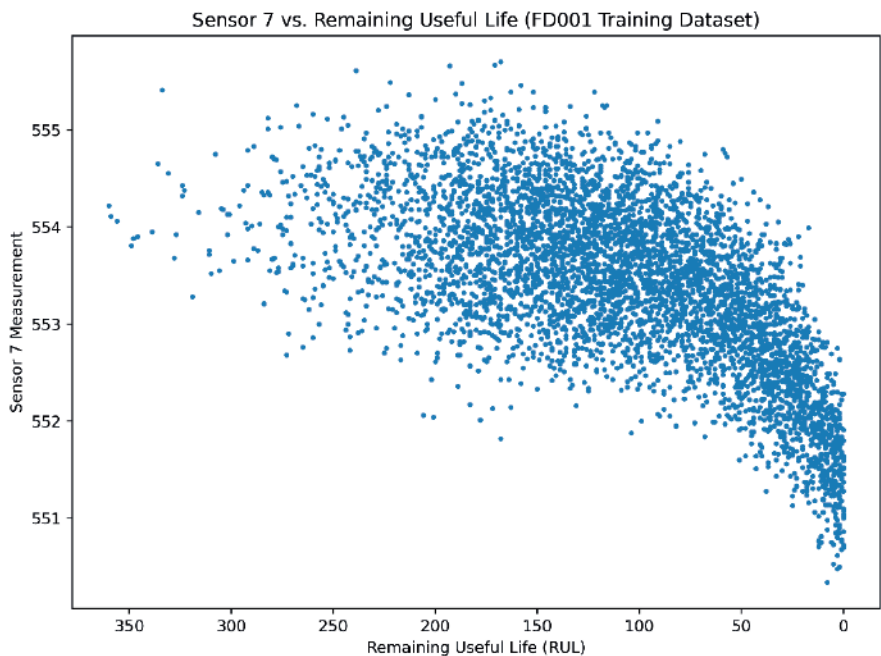


Figure 9. Sensor vs. RUL Scatter Plot (FD001)

This relationship reinforces the validity of the classification results and demonstrates that the selected sensors contain meaningful degradation signatures.

7. DISCUSSION

The experimental findings demonstrate that ensemble learning methods, particularly XGBoost and Random Forest, achieve superior performance in the classification of engine degradation states using the CMAPSS dataset. Their strength lies in their ability to model nonlinear interactions among sensor features while maintaining robustness against noise and variability across engine units. The comparative performances highlight that gradient boosting methods effectively capture complex feature dependencies in high-dimensional datasets, whereas Random Forest models offer better interpretability through feature importance analysis. In contrast, SVMs and basic feed-forward neural networks show comparatively lower performance, indicating that more advanced architectures or deeper temporal models may be needed to handle the highly dynamic nature of multivariate sensor data.

Although the results are promising, several challenges and limitations must be acknowledged. The intermediate degradation class remains the

most difficult to classify across all models. This misclassification trend is consistent with findings in the literature, as midlife degradation often exhibits overlapping sensor patterns that do not clearly separate healthy and faulty states. Furthermore, the dataset represents simulated turbofan behavior rather than real industrial machines; therefore, domain adaptation techniques or transfer learning may be required before applying these models to real-world systems. Sensor redundancy and multicollinearity, as observed in the correlation heatmap, also introduce challenges, suggesting that future work could benefit from feature selection or dimensionality reduction techniques.

Another important consideration is the use of handcrafted statistical and trend-based features, which, although effective, may not fully capture long-range temporal dependencies present in the raw sequences. Deep learning architectures such as LSTM, GRU, 1D CNNs, or transformer-based models may yield higher accuracy by learning temporal degradation patterns directly from unprocessed sensor trajectories. Despite these limitations, the overall results validate the effectiveness of the proposed preprocessing pipeline and feature-engineering strategy for enabling reliable fault prediction.

Finally, the performance analysis reveals valuable insights into the physical interpretation of engine behavior. Sensor–RUL relationships, feature importance distributions and confusion matrix patterns collectively confirm that degradation signals are indeed present in the CMAPSS sensor channels. These findings support the use of CMAPSS as a benchmark for evaluating predictive maintenance algorithms and demonstrate that machine learning methods, when properly engineered, can provide meaningful early-warning signals for industrial applications.

8. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This chapter presented a comprehensive machine learning–based framework for fault prediction using the NASA C-MAPSS turbofan engine dataset. By integrating systematic pre-processing, statistical and domain-specific feature engineering and a diverse set of supervised learning algorithms, the study demonstrated that industrial sensor data contain rich degradation signatures that can be effectively utilized for predictive maintenance. The results showed that ensemble learning models, particularly XGBoost and Random Forest, consistently out-perform classical approaches such as SVMs and basic neural networks, achieving strong classification accuracy and robust detection of both healthy and faulty degradation states.

The findings further confirm the suitability of C-MAPSS as a benchmark dataset for evaluating diagnostic and prognostic algorithms. The sensor–RUL

relationship analysis, feature importance patterns and confusion matrix results collectively highlight that meaningful degradation indicators are embedded within the multivariate sensor channels. The study not only validates the proposed methodology but also provides practical insights into which sensors and statistical properties contribute most to predictive performance. These insights can assist in sensor selection, system monitoring and early-warning system design in real-world industrial environments.

Despite the promising results, several research opportunities remain. First, the reliance on handcrafted statistical features limits the ability of traditional machine learning models to fully exploit long-range temporal dependencies inherent in degradation processes. Future work could incorporate deep learning architectures such as LSTMs, GRUs, convolutional models, or transformer-based sequence learners to capture temporal structure directly from raw time-series data. Second, domain adaptation and transfer learning techniques may be required to bridge the gap between simulated datasets like C-MAPSS and the more complex, noisy patterns of real industrial systems. Finally, integrating the proposed models into real-time monitoring platforms and evaluating their performance under streaming conditions would provide valuable insights for deploying predictive maintenance solutions in operational settings.

In summary, this chapter demonstrates that machine learning, when combined with carefully engineered sensor features and a robust preprocessing pipeline, offers a powerful tool for predicting engine degradation and preventing unexpected failures. The proposed framework establishes a solid foundation for further advancements in data-driven predictive maintenance and highlights the potential of intelligent monitoring systems in enhancing the reliability and efficiency of industrial machinery.

References

- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.009>.
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotating machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 314–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.07.030>.
- Carvalho, T. P., Albertoni, R., Ferreira, G., Souza, A., Dourado, A., Salles, E. J., & Soares, G. L. G. (2019). Machine learning methods in predictive maintenance: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>.
- Saxena, A., Goebel, K., Simon, D., & Eklund, N. (2008). Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation. In *2008 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–9). <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526631>.
- Si, X.-S., Wang, W., Hu, C.-H., & Zhou, D. (2011). Remaining useful life estimation—A review on the statistical data driven approaches. *IEEE Transactions on Reliability*, 61(4), 1–17. <https://doi.org/10.1109/TR.2011.2172667>.
- Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. J. (2010). Current status of prognostics and health management (PHM)—A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(1), 150–170. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.06.007>.
- Wang, T., Yu, J., Siegel, D., & Lee, J. (2008). A similarity-based prognostics approach for remaining useful life estimation of engineered systems. In *2008 International Conference on Prognostics and Health Management* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/PHM.2008.4711421>.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Fink, O., Wang, Q., Svensén, M., Dersin, P., Lee, W.-J., & Ducoffe, M. (2020). Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 154, 107517. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107517>.
- Yan, R., Gao, R. X., & Chen, X. (2014). Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(2), 187–221. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.04.001>.
- Widodo, A., & Yang, B.-S. (2007). Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(6), 2560–2574. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.01.009>.
- Özüpak, Y. (2025). Machine learning-based fault detection in transmission lines: A comparative study with random search optimization. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 73(2), e153229. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2025.153229>.

- Liu, D., & Chen, X. (2017). Feature selection for machine health monitoring: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91, 424–436. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.10.027>.
- Zhao, R., Yan, R., Wang, J., & Mao, K. (2019). Learning to monitor machine health with convolutional bidirectional LSTM networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114, 136–156. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.020>.
- Yuan, M., Wu, Y., & Lin, L. (2016). LSTM-based remaining lifetime prediction of bearing. In *2016 Prognostics and System Health Management Conference* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/PHM.2016.7819883>.
- Malhotra, P., TV, V., Ramakrishnan, A., Anand, G., Vig, L., Agarwal, P., & Shroff, G. (2015). Long short term memory networks for anomaly detection in time series. In *23rd European Symposium on Artificial Neural Networks* (pp. 89–94).
- Behrad3d. (2023). NASA C-MAPS: NASA Turbofan Jet Engine Data Set (Run-to-Failure Degradation Simulation) [Data set]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/behrad3d/nasa-cmaps/data>
- Alpsalaz, F. (2025). Fault detection in power transmission lines: Comparison of Chirp-Z algorithm and machine learning-based prediction models. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 27(4), 14. <https://doi.org/10.17531/ein/203949>.
- Güvenç, U., Altun, B. E., & Duman, S. (2012). Optimal power flow using genetic algorithm based on similarity. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29(1), 1–10.
- Zheng, S., Ristovski, K., Farahat, A., & Gupta, C. (2017). Effective and efficient LSTM networks for remaining useful life prediction. In *2017 Prognostics and System Health Management Conference* (pp. 88–95). <https://doi.org/10.1109/PHM.2017.8077117>.
- Liu, J., Chen, Z., Pan, Z., & Li, X. (2020). Remaining useful life prediction of turbofan engine using multiscale attention network. *IEEE Access*, 8, 23071–23084. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971399>.
- Heimes, F. O. (2008). Recurrent neural networks for remaining useful life estimation. In *2008 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526472>.
- Ramasso, E. (2014). Contribution of belief functions to prognostics. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.36001/ijphm.2014.v5i1.2205>.
- Özüpak, Y., Alpsalaz, F., Aslan, E., & Uzel, H. (2025). Hybrid deep learning model for maize disease classification. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53(5), 2942–2964. <https://doi.org/10.1080/01140671.2025.2519570>.

- Alpsalaz, F. (2025). Deep learning-based lung cancer diagnosis: Data balancing, model optimisation and performance analysis. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 12(2), 373–391. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1648772>.
- Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7531-4.X5000-3>.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- Bal, G., Bekiroglu, E., & Bayindir, R. (2008). Microcontroller-based digitally controlled ultrasonic motor drive system. *Journal of Electroceramics*, 20(3–4), 265–270. <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9191-6>.
- Uzel, H., Hınıslıoğlu, Y., Dalcı, A., & Güvenç, U. (2025). Fuzzy fitness distance balance gradient-based optimization algorithm (fFDBGBO): An application to design and performance optimization of PMSM. *IEEE Access*, 13, 155898–155915. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3604649>
- Hu, C., Youn, B. D., & Wang, P. (2012). Ensemble of data-driven prognostic algorithms for robust prediction of remaining useful life. *Reliability Engineering & System Safety*, 103, 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.03.008>.
- Zhang, C., & Yang, Z. (2018). A review of time series data mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 76, 172–188. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.07.020>.
- Özüpak, Y. (2023). Analysis of the parameters affecting the efficiency of the wireless power transmission system designed for new generation electric vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 24, 1675–1680. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0135-1>.
- Aslan, E., & Özüpak, Y. (2024). Diagnosis and accurate classification of apple leaf diseases using vision transformers. *Computer and Decision Making: An International Journal*, 1, 1–12. <https://doi.org/10.59543/comdem.v1i.10039>.
- Aslan, E. (2024). Prediction and comparative analysis of emissions from gas turbines using random search optimization and different machine learning-based algorithms. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(6), e151956. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.151956>.
- Aslan, E., Demirtas Alpsalaz, S., Özüpak, Y., Alpsalaz, F., & Uzel, H. (2025). Alzheimer's classification with a MaxViT-based deep learning model using MRI. *Journal of AI and Smart Technology Trends*, 6(2). <https://doi.org/10.38094/jastt62453>.

- Aslan, E., Özüpak, Y., & Alpsalaz, F. (2025). Boiler efficiency and performance optimization in district heating and cooling systems with machine learning models. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 48(7), 1115–1130. <https://doi.org/10.1080/02533839.2025.2514535>.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>.
- Özüpak, Y., Alpsalaz, F., & Aslan, E. (2025). Air quality forecasting using machine learning: Comparative analysis and ensemble strategies for enhanced prediction. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236, 464. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08122-8>.
- Alpsalaz, F., Özüpak, Y., Aslan, E., & Uzel, H. (2025). Classification of maize leaf diseases with deep learning: Performance evaluation of the proposed model and use of explicable artificial intelligence. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 262, 105412. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105412>.
- Aslan, E. (2025). Temperature prediction and performance comparison of permanent magnet synchronous motors using different machine learning techniques for early failure detection. *Maintenance & Reliability / Eksploatacja i Niezawodność*, 27(1), 1–16. <https://doi.org/10.17531/ein/192164>.

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Güncel Araştırmalar ve Değerlendirmeler I

Editör:

Serdal Arslan