



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE KAYIP-KAÇAK ENERJİ
TESPİTİ VE GERÇEK ZAMANLI İZLEME İÇİN AKILLI SİSTEM
TASARIMI**

Orhan YELBOĞA

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE KAYIP-KAÇAK ENERJİ
TESPİTİ VE GERÇEK ZAMANLI İZLEME İÇİN AKILLI SİSTEM
TASARIMI**

Orhan YELBOĞA

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR**

Diğer Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Fevzi ÇAKMAK

Doç. Dr. Musa YILMAZ

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Orhan YELBOĞA tarafından hazırlanan “Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Kayıp-Kaçak Enerji Tespiti ve Gerçek Zamanlı İzleme İçin Akıllı Sistem Tasarımı” adlı tez çalışması 22/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Yönetimi Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Musa YILMAZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Fevzi ÇAKMAK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğini bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Orhan YELBOĞA
Tarih: 22.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE KAYIP-KAÇAK ENERJİ TESPİTİ VE GERÇEK ZAMANLI İZLEME İÇİN AKILLI SİSTEM TASARIMI

Orhan YELBOĞA

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Yönetimi Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

2025, 66 Sayfa

Günümüz enerji sistemlerinde artan talep ve sürdürülebilirlik ihtiyacı, enerji iletim ve dağıtım altyapılarında verimliliği artırmayı zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, özellikle alçak gerilim seviyesindeki dağıtım şebekelerinde meydana gelen teknik olmayan kayıplar — en başta kaçak elektrik kullanımı — enerji yönetiminde ciddi bir sorun alanı oluşturmaktadır. Yeraltı ve havai hatların birlikte kullanıldığı karmaşık şebeke yapılarında bu tür kayıpların tespiti, çoğu zaman yüksek maliyetli kazı çalışmaları, saha taramaları ve insan gücüne dayalı yöntemlerle gerçekleştirilmekte; bu da işletme sürekliliğini ve mali performansı olumsuz etkilemektedir. Bu tez kapsamında, kaçak elektrik tespitinde fiziksel müdahaleye gerek bırakmayan, uzaktan izlenebilir ve anlık uyarı verebilen düşük maliyetli bir izleme sistemi tasarlanmıştır. Sistem, dağıtım panolarına entegre edilebilecek biçimde, giriş ve çıkış hatlarına yerleştirilen SCT-013 akım sensörleri aracılığıyla çalışmakta; elde edilen analog veriler ADS1115 yüksek çözünürlüklü analog-dijital dönüştürücü yardımıyla işlenmekte ve NodeMCU ESP8266 mikrodenetleyici ile yorumlanarak kablosuz olarak kullanıcıya iletilmektedir. Bu yapı, hem enerji akışının sürekli kontrolünü hem de şüpheli farkların analizini mümkün kılmakta; belirlenen tolerans dışı farklarda kaçak uyarısı üreterek operatöre erken müdahale imkânı sunmaktadır. Geliştirilen sistem, sanal ortamda oluşturulan simülasyonlar ile test edilmiş; farklı yük senaryoları ve kaçak akım durumları altında güvenilir ve tekrar edilebilir sonuçlar vermiştir. Elde edilen bulgular, bu tür bir sistemin özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlarda yaygın olarak kullanılan yeraltı enerji iletim hatlarında, kazı gerektirmeyen bir izleme alternatifi sunabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sistemin Wi-Fi tabanlı uzaktan veri aktarımı ile SCADA gibi merkezi şebeke yönetim sistemlerine entegre edilebilir yapısı, dijital şebeke dönüşümüne katkı sağlayacak önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu çalışma, düşük maliyetli donanım bileşenleri kullanılarak geliştirilen, hızlı kurulum ve genişletilebilir yapıya sahip bir model üzerinden kaçak tespitine yönelik yeni bir yaklaşım ortaya koymakta; enerji kayıplarının azaltılması ve şebeke yönetiminin optimize edilmesi açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Teknik Olmayan Kayıplar, Kaçak Elektrik, Alçak Gerilim Şebekeleri, Akım Sensörü, Yeraltı Enerji Hatları, IoT, NodeMCU ESP8266, ADS1115, Akım Farkı Analizi.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INTELLIGENT SYSTEM DESIGN FOR LOSS DETECTION AND REAL-TIME MONITORING IN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS

Orhan YELBOĞA

Batman University Graduate Education Institute

Energy Management Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Rıda TÜR

2025, 66 Pages

In today's energy systems, the increasing demand and the need for sustainability make it imperative to improve the efficiency of power transmission and distribution infrastructures. In this context, non-technical losses — primarily caused by electricity theft — constitute a critical issue, particularly in low-voltage distribution networks. In hybrid grid configurations involving both underground and overhead lines, the detection of such losses typically requires costly excavation, field inspections, and manual labor, all of which disrupt operational continuity and increase overall system costs. This thesis proposes a cost-effective, remotely monitorable, and real-time alerting system for detecting electricity theft without requiring physical intervention. The system is designed to be integrated into distribution panels and relies on SCT-013 current sensors installed at the entry and exit points of the circuit. The analog signals captured by the sensors are digitized using a high-resolution ADS1115 analog-to-digital converter and processed by a NodeMCU ESP8266 microcontroller. Through this architecture, real-time current flow is continuously monitored, and abnormal discrepancies exceeding defined thresholds are interpreted as potential theft conditions, prompting an immediate alert. The proposed system has been tested in a simulated environment under various load conditions and theft scenarios, yielding consistent and reliable results. The findings suggest that the model can offer a viable alternative for theft detection in densely populated urban areas with predominantly underground distribution lines, eliminating the need for intrusive excavation. Additionally, the system's wireless data transmission capability enables seamless integration with centralized management platforms such as SCADA, aligning with the broader trend of digital grid transformation. This study presents an innovative approach to non-technical loss detection using low-cost hardware components. It introduces a scalable, easy-to-install monitoring system that holds significant promise for improving energy efficiency, reducing economic losses, and enhancing grid transparency and control.

Keywords: Non-Technical Losses, Electricity Theft, Low-Voltage Distribution Network, Current Sensor, Underground Lines, IoT, NodeMCU ESP8266, ADS1115, Current Discrepancy Analysis.

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, elektrik dağıtım şebekelerinde özellikle alçak gerilim seviyesinde yer alan yeraltı ve havai hatlarda meydana gelen teknik olmayan kaçakların tespitine yönelik özgün bir sistem geliştirilmesini amaçlamaktadır. Enerji iletim ve dağıtım altyapılarında yaşanan kayıplar, sadece ekonomik değil aynı zamanda çevresel ve yapısal sorunlara da yol açmaktadır. Bu doğrultuda, düşük maliyetli, gerçek zamanlı ve uzaktan izleme kapasitesine sahip teknolojilere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Yürütülen bu çalışma kapsamında geliştirilen sistem, sensör teknolojileri ve gömülü yazılım altyapısı kullanılarak, dağıtım panolarında yer alan giriş ve çıkış hatlarındaki akım farklarını izlemeye ve bu farklardan hareketle olası kaçak durumlarını tespit etmeye dayanmaktadır. Sistem, yalnızca fiziksel müdahaleye gerek duymaksızın kaçakların belirlenmesini sağlamakla kalmamış, aynı zamanda dağıtım şebekelerinin dijitalleşmesine katkı sağlayacak bir çözüm önerisi sunmuştur. Bu süreçte edindiğim bilgi birikimi ve teknik deneyim, yalnızca akademik bir çalışma üretmenin ötesinde, enerji sektörünün karşı karşıya olduğu yapısal sorunlara teknolojik çözümler geliştirme konusunda bir farkındalık kazanmamı sağlamıştır. Tez süresince elde edilen bulgular ve öneriler, enerji kayıplarının azaltılması ve şebeke verimliliğinin artırılması konusunda gelecekte yapılacak çalışmalara temel oluşturacak niteliktedir. Bu çalışmanın hayata geçirilmesinde bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli tez danışmanım Mehmet Rıdâ TÜR Hocam'a, destekleriyle süreci kolaylaştıran yetkililerine ve manevi desteğini her zaman hissettiğim aileme teşekkür ederim. Son olarak, bu çalışmanın enerji sistemlerinin daha verimli, sürdürülebilir ve güvenilir hale getirilmesine yönelik yürütülecek yeni araştırmalara ilham vermesini temenni ederim.

Orhan YELBOĞA
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİ	10
3.1 Dağıtım Şebekelerinin Yapısal Katmanları	11
3.2 Dağıtım Şebekesi Topolojileri ve İşleyişi.....	12
3.3 Havai ve Yeraltı Dağıtım Hatları.....	14
3.4 Alçak Gerilim Yeraltı Dağıtım Sistemlerinin Önemi ve Zorlukları	17
3.5 Akım ve Gerilim Ölçüm Sistemlerinin Dağıtım Şebekelerinde Rolü	18
3.6 Teknik Olmayan Kayıpların Tanımı ve Önemi	19
3.7 Usulsüz Bir Şekilde Hatların Delinip Harici Kablo Çekilmesinin Şebekeye Etkileri	22
3.7.1 Enerji kayıplarının artması ve ekonomik zararlar.....	22
3.7.2 Şebeke dengesizliği ve arıza risklerinin artması.....	22
3.7.3 Güvenlik ve şebeke riskleri.....	23
3.7.4 Enerji kalitesi problemleri	23
3.7.5 Teknik olmayan kayıpların tespiti ve önlenmesine ilişkin zorluklar	24
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
4.1 Kullanılan Donanımlar ve Malzemeler.....	26
4.2 Sistem Tasarımı ve Kurulum	26
4.2.1 Ölçüm prensibi ve sensör yerleşimi.....	32
4.2.2 Veri toplama ve işleme	32
4.2.3 Yazılım geliştirme ve iletişim.....	32
4.2.4 Test süreci ve benzetim çalışmaları	33
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	36
5.1 Ölçüm Sonuçlarının Detaylı Analizi.....	36
5.2 Sistemin Manuel Ölçümü	43
5.3 Sistem Performansının Değerlendirilmesi	48
5.4 Sistem ve Literatür Karşılaştırması.....	50

5.5 Dicle Elektrik Batman Bölgesi Yaklaşık 1.5 Yıllık Yeraltı Ag Hatlarındaki Kayıp Kaçak Bedeli.....	51
5.5.1 Elektrik dağıtım şirketlerinin müdahale yöntemleri ve riskler	52
5.5.2 İş gücü ve müdahale maliyetleri	53
5.5.3 Geliştirilen prototipin alternatif değer önerisi	53
5.6 Gelecek çalışmalar için öneriler ve geliştirme alanları.....	54
5.6.1 Saha koşullarında gerçek uygulama ve kalibrasyon çalışmaları	54
5.6.2 Gelişmiş algoritmaların entegrasyonu ve yapay zeka tabanlı modeller	55
5.6.3 Çoklu sensör entegrasyonu ve veri füzyonu	55
5.6.4 Enerji kalitesi izleme kapasitesinin geliştirilmesi.....	56
5.6.5 SCADA, AMI ve diğer otomasyon sistemleriyle entegrasyon.....	56
5.6.6 Güvenlik, mahremiyet ve siber tehditlere karşı koruma.....	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	58
6.1 Sonuçlar	58
6.2 Öneriler	60
KAYNAKLAR	63

ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ

Çizelge 3.1. Yeraltı Hatları ve havai hat karşılaştırılması.....	17
Çizelge 4.1. Sistem Bileşenleri ve Teknik Özellikleri.....	33
Çizelge 5.1. Sistemi şebekeye bağlantı sonucu oluşan eşik değeri tablosu.....	42

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Elektrik Enerjisi Zinciri (Çınar, 2020)	10
Şekil 3.2. Radyal Şebekeler Örnek Görünümü.....	12
Şekil 3.3. Ring (Halkalı) Şebekeler Örnek Görünümü.....	13
Şekil 3.4. Ağ(Mesh) Şebekeler Örnek Görünümü	14
Şekil 3.5. Havai Orta Gerilim Hattı	15
Şekil 3.6. Havai Alçak Gerilim Hattı	15
Şekil 3.7. Yeraltı Hatları orta gerilim ve alçak gerilim (Müşterek) Hatlar	16
Şekil 3.8. Ana Hattan Harici Çekilen Usulsüz Hat.....	21
Şekil 4.1. Devrenin Şebeke Hattına Bağlanma Şekli	26
Şekil 4.2. Akım Sensörü (SCT-013).....	30
Şekil 4.3. NodeMCU ESP8266 Geliştirme Kartı	31
Şekil 4.4. ADS1115 16-bit 4 Kanal ADC Modülü.....	32
Şekil 4.5. Sistem Blok Diyagramı	34
Şekil 5.1. Sistem Bağlantı Şekli	37
Şekil 5.2. Sistem Bağlantı Şekli	38
Şekil 5.3. Sistem Yüksüz Hali	38
Şekil 5.4. Sistem Ana Hattın Yüklü Hali.....	39
Şekil 5.5. Hem ana hat hem de harici hat yüklü iken	41
Şekil 5.6. Sistemde çekilen toplam akım.....	43
Şekil 5.7. Hat sonu ölçülen değer	44
Şekil 5.8. Hat harici çekilen hat üzerindeki ölçüm.....	45
Şekil 5.9. Sistemin Akış Diagramı	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

I	: Amper(A)
J	: Joule
kV	: Kilo Volt
P	: Watt(W)
R	: Ohm (Ω)
T	: Zaman
V	: Volt(V)
ΔI	: Akım farkı (giriş - çıkış)

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
ADC	: Analog-Dijital Çevirici (Analog to Digital Converter)
ADS1115	: 16-bit Analog Dijital Dönüştürücü (Analog to Digital Converter)
AEDAŞ	: Aras Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
AG	: Alçak Gerilim
AMI	: Advanced metering infrasturacture
CBS	: Coğrafi Belirleme Sistemi
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DEDAŞ	: Dicle Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
EMI	: Elektromanyetik parazit
EPDK	: Elektrik Piyasası Denetleme Kurumu
ESP8266	: Wi-Fi destekli mikrodenetleyici modül (NodeMCU ESP8266)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
LCD	: Sıvı Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)
LV	: Alçak Gerilim (Low Voltage)
MBS	: Müşteri Bilgi Sistemi
NodeMCU ESP8266	: Mikrodenetleyici
OG	: Orta Gerilim
OSOS	: Otomatik Sayaç Okuma Sistemi
PCB	: Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
RMS	: Karekök Ortalama Değer (Root Mean Square)
SCADA	: Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition)
SCT-013	: Akım sensörü modeli (Current Transformer Sensor)
SYS	: Saha Yönetim Sitemi
YG	: Yüksek Gerilim
YKF	: Yük Kayıp Faktörü
YSA	: Yapay Sinir Ağı
WAMS	: Wide Area Monitoring Systems

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, günümüz toplumlarının ekonomik kalkınma, sosyal refah ve teknolojik gelişme hedeflerinin merkezinde yer alan en kritik unsurlardan biridir. Sanayileşme, kentleşme, ulaşım elektrifikasyonu ve dijitalleşme gibi küresel dönüşüm süreçleri, enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün daha da artırmakta; bu durum, mevcut enerji altyapılarının daha güçlü, daha esnek ve daha sürdürülebilir hâle getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Modern enerji sistemlerinin güvenli, sürekli ve verimli biçimde işletilmesi yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda sosyal adaletin tesisi, çevresel sürdürülebilirlik ve makroekonomik istikrar için de temel bir koşuldur. Bu bağlamda elektrik enerjisinin hem arz hem de dağıtım aşamalarında yaşanan kayıplar, enerji sektörünün verimliliğini ve şebeke güvenliğini tehdit eden önemli sorun alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, enerji altyapılarının eski, dağınık ve yeterince dijitalleşmemiş olması nedeniyle enerji kayıpları ciddi ekonomik kayıplara, kaynak israfına ve hizmet kalitesinin düşmesine yol açmaktadır (Ahmad, 2017; de Souza vd., 2020; Depuru vd., 2011; Peng vd., 2025; Zhang vd.).

Elektrik enerjisi kayıpları, genel itibarıyla “teknik kayıplar” ve “teknik olmayan kayıplar” olmak üzere iki temel kategoride incelenmektedir. Teknik kayıplar, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı esnasında sistemin fiziksel sınırlılıkları nedeniyle meydana gelen, ölçülebilir ve mühendislik çözümleriyle büyük ölçüde yönetilebilen kayıplardır. Bu kayıplar; iletim hatlarında meydana gelen direnç kaynaklı Joule ısı kayıpları, transformatörlerdeki sargı ve manyetik akı kaçakları, devre elemanlarındaki endüktif ve kapasitif etkiler gibi çeşitli teknik nedenlerden kaynaklanmaktadır. Sistem tasarımı, bakım politikaları ve yüksek verimli ekipman kullanımıyla azaltılabilirler, fakat tamamen ortadan kaldırılmaları mümkün değildir (Kocaman ve Kutlu, 2016).

Öte yandan teknik olmayan kayıplar, elektrik enerjisinin ölçülmeden veya yetkisiz yollarla kullanılması sonucunda ortaya çıkan ve doğrudan insan davranışlarından kaynaklanan kayıplardır. Bu tür kayıplar arasında sayaç dışı doğrudan bağlantılar, sayaçlara yapılan bilinçli müdahaleler, sahte sayaç kullanımı, hatalı ölçüm ekipmanları, sayaçların bypass edilmesi veya tüketimin farklı gösterilmesi gibi uygulamalar yer

almaktadır (Gómez-Expósito vd., 2018; Von Meier, 2024). Teknik olmayan kayıpların tespiti ve kontrolü, teknik kayıplara kıyasla çok daha zordur; çünkü bu kayıplar, çoğu zaman sistemin dışında veya yetkisiz kişiler tarafından gerçekleştirilen müdahaleler sonucu meydana gelir. Nitekim dünya genelindeki elektrik dağıtım şebekelerinde toplam kayıpların %20'ye kadar olan bölümünün teknik olmayan nedenlere dayandığı ve bazı ülkelerde bu oranın %40'a kadar çıktığı bildirilmiştir (Foster vd., 2021; Otchere-Appiah vd., 2021). Bu oranlar, enerji yönetimi açısından ciddi bir tehdit oluşturmakta ve özellikle enerji arz güvenliğinin zayıf olduğu bölgelerde sistemin sürdürülebilirliğini tehlikeye sokmaktadır.

Türkiye özelinde ise enerji sektöründe son yıllarda kayıp-kaçak oranlarının azaltılmasına yönelik önemli yasal, idari ve teknik düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), dağıtım şirketlerinin performansını kayıp-kaçak oranlarına göre izlemekte ve bu oranların belirli hedefler dâhilinde azaltılmasını zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte, özellikle alçak gerilim (AG) seviyesindeki yeraltı dağıtım hatlarında gerçekleşen teknik olmayan kayıpların tespiti, hâlen çözülmeyi bekleyen önemli bir sorun alanı olarak varlığını sürdürmektedir. Yeraltı altyapılarında gerçekleşen kaçak kullanımlar genellikle abonelik dışı bağlantılar, sayaç öncesi hat müdahaleleri ve kontrolsüz şebeke erişimleri yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bu usulsüz bağlantılar çoğu zaman fiziksel olarak görünmez nitelikte olduğu için, mevcut yöntemlerle tespit edilmeleri yüksek maliyetli, zaman alıcı ve emek yoğun saha çalışmaları gerektirmektedir. Kazı çalışmaları, yerinde incelemeler, manuel denetimler gibi yöntemlerin sınırlı etkililiği; dağıtım şirketlerinin bu tür kayıplara karşı yeterince hızlı ve yaygın müdahale geliştirmelerini engellemektedir (Jokar vd., 2015; Razavi vd., 2019). Dolayısıyla bu alanda daha düşük maliyetli, daha taşınabilir, daha hızlı ve dijitalleştirilmiş çözümlere duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışma, alçak gerilim seviyesindeki yeraltı pano beslemelerinde gerçekleşen teknik olmayan kayıpların, yani dışarıdan müdahale yoluyla gerçekleşen kaçak bağlantıların, herhangi bir fiziksel kazı ya da manuel müdahale gerektirmeksizin tespit edilmesini sağlayan yenilikçi bir sistemin tasarımını amaçlamaktadır. Önerilen sistemde, AG dağıtım panosunun hem giriş hem de çıkış hatlarına yerleştirilen SCT-013 model akım sensörleri aracılığıyla hatlardan geçen akım değerleri izlenmekte; bu analog veriler, yüksek çözünürlüklü ADS1115 analog-sayısal dönüştürücü ile sayısallaştırılarak kablosuz haberleşme özelliklerine sahip NodeMCU ESP8266 mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır. Sistemin temel prensibi; giriş hattından çekilen toplam akım ile çıkış

hatlarına dağıtılan akım değerleri arasındaki farkın belirli bir eşik değerini aşması durumunda kaçak kullanım ihtimalini bildiren bir uyarı mekanizmasının çalıştırılmasıdır. Bu mekanizma, yeraltı altyapısına fiziksel olarak müdahale etmeksizin sistemdeki kaçakları izleyebilir hâle getirmekte, böylece hem zaman hem de maliyet açısından dağıtım şirketlerine önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Literatürde, teknik olmayan kayıpların tespiti için çoğunlukla sayaç verilerinin analizine dayalı yapay zekâ, makine öğrenmesi ve istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, geniş veri kümeleri gerektirmekte ve çoğu zaman tüketici davranışları, yük profili analizleri veya tahmine dayalı algoritmalarla çalışmaktadır. Ancak bu yöntemler yerel ve anlık kaçak tespiti açısından sınırlı etkililiğe sahiptir. Önerilen sistem ise doğrudan hat üzerindeki fiziksel akım farklarını izlemeye dayandığı için, gerçek zamanlı, hızlı ve doğrudan tespit sağlayan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca düşük maliyetli, taşınabilir ve sistem dışına entegre edilebilir nitelikte olması sayesinde hem kırsal hem de kentsel alanlarda geniş çaplı uygulamalara elverişlidir. Bu yönüyle önerilen sistem, yalnızca teknik olmayan kayıpların azaltılmasına değil, aynı zamanda enerji şebekelerinin dijitalleştirilmesine, uzaktan izlenebilirliğine ve bütüncül yönetimine de önemli katkılar sunmaktadır (Alahakoon ve Yu, 2015; Duc ve Viet, 2022; Raza vd., 2023).

Sonuç olarak bu tez çalışması, enerji dağıtım sektöründe giderek artan bir problem olarak karşımıza çıkan teknik olmayan kayıpların tespitine yönelik özgün, yenilikçi ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Geliştirilen sistem, dağıtım şirketlerinin daha etkin, daha ekonomik ve daha izlenebilir denetim mekanizmaları kurmasına olanak tanırken; aynı zamanda enerji arz güvenliğini artırmakta, hizmet kalitesini yükseltmekte ve tüketici memnuniyetine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda çalışma, yalnızca teknik bir mühendislik uygulaması değil; aynı zamanda dijital dönüşüm, kamu hizmeti verimliliği ve sürdürülebilir kalkınma perspektifiyle de stratejik bir girişim olarak değerlendirilmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrik enerjisi, modern yaşamın sürdürülebilir biçimde devam ettirilebilmesi açısından kritik ve stratejik bir role sahiptir. Küresel ölçekte hızla ilerleyen dijitalleşme, kentleşme ve sanayileşme süreçleri, elektrik enerjisine olan talebin sürekli artmasına neden olmakta; bu durum, enerji altyapısının daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşturulmasını zorunlu hale getirmektedir. Özellikle elektrik enerjisinin dağıtım aşamasında meydana gelen kayıplar, sistemin genel performansını olumsuz etkileyerek hem ekonomik zararlar doğurmakta hem de enerji arz güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu bağlamda, enerji kayıplarının nedenlerinin doğru şekilde tespit edilmesi ve bu kayıpların en aza indirilmesine yönelik etkili yöntemlerin geliştirilmesi, literatür de giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, yeraltı elektrik dağıtım şebekelerinde dış müdahaleler sonucu oluşan usulsüz ve teknik olmayan bağlantıların neden olduğu enerji kayıplarının tespiti ve analizi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, şebekeye giren ve çıkan akımlar arasındaki farklar esas alınarak geliştirilen bir yöntem kullanılacak; böylece özellikle kent şebekelerinde sıkça karşılaşılan kayıpların önlenmesine yönelik yenilikçi bir çözüm önerisi sunulacaktır. Dağıtım şebekelerinde bu kayıplara yönelik gerçekleştirilen çalışmalar kapsamlı bir şekilde analiz edilerek, kullanılan yöntemlerin etkinliği ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Güleydin ve diğerleri enerji tüketiminin giderek artması ve mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması gerçeğinden hareketle, elektrik enerjisi dağıtım şebekelerinde meydana gelen teknik ve teknik olmayan kayıpların tespitine yönelik nesnelerin interneti (IoT) tabanlı düşük maliyetli, esnek ve etkin bir donanımsal sistem tasarlanmıştır. Çalışmada, geliştirilen sistemin hem mevcut akıllı şebeke yönetim altyapılarına entegre olabilecek hem de bağımsız çalışabilecek yapıda olması hedeflenmiş; bu doğrultuda sistem, yeraltı elektrik dağıtım hatlarında kullanılmak üzere modellenmiştir. Kullanılan yöntem kapsamında, gerçek zamanlı veri takibi ve analizine olanak sağlayan sensörler ve IoT bileşenleri entegre edilerek, teknik kayıpların anlık tespiti ve teknik olmayan kayıpların (örneğin kaçak kullanım) hızlı bir şekilde fark edilmesi mümkün kılınmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin dağıtım şebekelerinde enerji yönetiminin

verimliliğini artırdığı, hizmet kalitesini iyileştirdiği ve özellikle Türkiye’deki elektrik dağıtım şirketleri için uygulanabilir, sürdürülebilir ve yerli bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur (Güleydin vd.)

Çelikpençe, Türkiye’de özellikle Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş. (Dicle EDAŞ) bölgesinde ciddi oranlara ulaşan teknik olmayan kayıp-kaçakların tespiti amacıyla makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada, altı farklı sınıflandırma algoritması kullanılarak, Müşteri Bilgi Sistemi (MBS), Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), Saha Yönetim Sistemi (SYS) ve iki farklı Otomatik Sayaç Okuma Sistemi (OSOS) gibi beş büyük ve canlı veri kaynağından elde edilen veriler analiz edilmiştir. İlk aşamada SQL teknikleri ile veri temizliği ve min-max ölçekleme ile veri normalizasyonu gerçekleştirilmiş, ardından öznitelik çıkarımı yapılarak bu öznitelikler sınıflandırma algoritmalarına giriş olarak verilmiştir. Son aşamada doğrulama süreci kapsamında doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 skoru metrikleri ile modellerin performansı değerlendirilmiştir. Ek olarak, algoritmaların parametre optimizasyonu Gridsearch yöntemi ile sağlanmış, öznitelik sayısının etkisi incelenmiş ve İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) ile model başarımları iyileştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %68,6 doğruluk oranıyla en başarılı model Random Forest (RF) olurken, XGBoost (XGB) %98,41 ile en yüksek duyarlılık değerine ulaşmıştır. Bu yönüyle çalışma, Türkiye’de teknik olmayan elektrik kayıplarının tespiti için makine öğrenmesi algoritmalarının etkinliğini ortaya koyan öncü bir örnek olup, hem dağıtım şirketlerine operasyonel katkı sunması hem de alanda çalışan araştırmacılar için kaynak teşkil etmesi bakımından önem taşımaktadır (Çelikpençe, 2023).

Tarhan ve Kocaman, elektrik dağıtım şebekelerinde teknik olmayan kayıpların tespiti amacıyla harici faz ve harici nötr durumlarının mikrodenetleyici tabanlı bir sistemle izlenmesi incelenmiştir. Elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar geçen süreçte ortaya çıkan teknik ve teknik olmayan kayıpların etkilerinin azaltılması hedeflenmiş, teknik olmayan kayıpların belirlenmesinde mikrokontrol sistemlerinin etkinliği araştırılmıştır. Çalışmada, elektrik şebekelerindeki anormal bağlantı ve müdahalelerin tespiti için donanım tabanlı bir algılama yöntemi geliştirilmiş, bu sayede harici faz ve nötr hatlarından kaynaklanan kayıpların gerçek zamanlı olarak izlenmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen mikrodenetleyici sisteminin teknik olmayan kayıpların tespiti konusunda güvenilir ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Böylece, enerji verimliliğinin artırılması ve dağıtım şebekelerinde yaşanan kayıpların azaltılması yönünde önemli bir katkı sağlanmıştır (Tarhan ve Kocaman, 2024).

Bozgeyik, üç fazlı dengeli elektrik dağıtım şebekelerinde teknik kayıpların tahmin edilmesi ve bu kayıpların tüketicilere adil şekilde paylaştırılması amaçlanmıştır. Dağıtım sistemlerinde meydana gelen kayıpların, özellikle teknik kayıpların doğru hesaplanması ve paylaşımı için Yük Kayıp Faktörü (YKF) yöntemi kullanılmış; ayrıca şebekenin analizi için Newton-Raphson yük akışı yöntemi içeren DIgSILENT programı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. YKF yöntemi, bileşenlerin değişken kayıplarını kısa sürede ve kabul edilebilir doğrulukta tahmin edebilmekte olup, elde edilen sonuçlar simülasyonlarla genel olarak uyum göstermiştir. Kayıpların tüketicilere paylaştırılması aşamasında ise, radyal elektrik dağıtım sistemlerinin topolojisine uygun ve uygulanması kolay olan grafik teorisi tabanlı oransal paylaşım yöntemi tercih edilmiş; bu yöntemle özellikle yüklerin talep güçlerinin kareleri oranına dayalı kayıp dağıtımında gözlemlenen sapmalar ve büyük güçlü yüklere daha fazla kayıp atanması gibi sorunlar ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca, dağıtım şebekelerinin farklı çalışma modlarına ve yapısal değişikliklerine göre bu yöntemlerin uygulanabilirliği test edilmiş ve her iki yöntemin de kurulum öncesi ve işletme sırasında hızlı, az veri gerektiren ve kabul edilebilir hata seviyelerinde sonuç verebileceği gösterilmiştir. Ancak grafik teorisi tabanlı paylaşım yönteminin diğer yöntemlerle karşılaştırılması ve iyileştirilmesi, ileride yapılacak araştırmalar için önemli bir konu olarak belirtilmiştir (Bozgeyik, 2015).

Üstünsoy ve diğerleri, akıllı şehirleşmeye katkı sağlamak amacıyla kaçak enerji kullanımının tespiti, otomatik faturalama ve puant yük talebinin takibi için kullanıcı enerji tüketim verilerinin kablosuz haberleşme teknolojisiyle aktarılması sağlanmış ve PLC destekli SCADA sistemi kullanılarak örnek bir laboratuvar uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, enerji dağıtım sistemlerinde kaçak kullanımın belirlenmesi, arıza tespiti, hızlı müdahale, uzaktan sayaç okuma ve faturalama gibi işlevlerin yanı sıra puant yük taleplerinin spesifik şekilde izlenmesi için entegre enerji yazılım çözümleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca, elektrikli araç kullanımının artmasıyla birlikte şarj istasyonlarının yaygınlaşmasının, şehir genelinde karmaşık topolojilere sahip enerji ağlarının yönetimini zorunlu kıldığı vurgulanmış ve bu bağlamda gelecekte akıllı şehirlerde etkin enerji yönetiminin kritik bir unsur olacağı sonucuna varılmıştır (Üstünsoy vd., 2018).

Yıldız ve Çetinkaya, elektrik enerjisinde kaçak kullanım miktarlarının tahmin edilmesi amacıyla yapay sinir ağları tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada, çeşitli şehirlerin şebekeleri tek bir trafo bölgesine indirgenerek, hem toplam kayıplar hem de kaçak kullanım miktarlarının yapay sinir ağları aracılığıyla ayrı ayrı tahmin edilmesi

sağlanmıştır. Literatürde kaçak kullanımın doğal kayıplardan ayrılarak değerlendirilmesine dair sınırlı çalışmalar bulunmasına karşın, bu araştırmada önerilen algoritmalar sayesinde doğal kayıplar ve kaçak kullanımların etkin şekilde ayrıştırılması mümkün hale getirilmiştir. Ayrıca, farklı eğitim fonksiyonları ile eğitilen yapay sinir ağlarının performansları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yöntemlerin doğruluğunu desteklemiştir. Böylece, çalışmanın elektrik dağıtım sistemlerinde kaçak kullanımların öngörülmesi ve buna bağlı olarak daha sağlıklı yatırım ve müdahale kararlarının alınmasına katkı sağladığı görülmüştür (Yıldız ve Çetinkaya, 2022).

Zheree, enerji dağıtım hatlarında meydana gelen kayıpların belirlenmesi amacıyla yapay sinir ağları kullanılmıştır. Geleneksel yöntem olan yük kayıp faktörü ile elde edilen kayıp değerleri yapay sinir ağına öğretilmiş ve her iki yöntemin sonuçları Matlab programında gerçekleştirilen simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, yapay sinir ağı tabanlı yöntemin yük kayıp faktörü yöntemiyle benzer sonuçlar verdiğini göstermiş; ancak önerilen yöntemin daha hızlı ve güvenilir sonuçlar üretme potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur. Böylece, enerji dağıtım sistemlerinde kayıp tespiti için yapay sinir ağlarının etkin ve uygulanabilir bir yaklaşım olduğu vurgulanmıştır (Zheree, 2020).

Geyikoğlu, elektrik dağıtım şebekelerinde meydana gelen arızaların daha doğru tahmin edilebilmesi amacıyla, düzeltici saha faaliyetlerinden elde edilen kesinti süreleri ve sıklığı verileri ile bu verilere karşılık gelen meteorolojik veriler birleştirilerek Aras EDAŞ sorumluluk sahasındaki 7 ile ait örnek bir veri seti oluşturulmuştur. Çalışmada, veri ön işleme, öznitelik seçimi ve çıkarımı yapılarak iki farklı bağımlı değişkene sahip çok sınıflı veri seti, %80 eğitim ve %20 test olacak şekilde ayrılmış ve toplamda 8 farklı regresyon algoritması (LGBM, XGB, Destek Vektör, Rastgele Orman, Kategorik Artırma, k-En Yakın Komşu, Karar Ağacı ve Lineer regresyon) ile 16 farklı model eğitilmiştir. Hiperparametre optimizasyonu uygulanarak en iyi tahmin modelleri belirlenmiş; birincil çok sınıflı tahmin için en yüksek doğruluk oranı %93,305 ile LGBM Regressor, ikincil çok sınıflı tahmin için ise %95,812 ile XGB Regressor tarafından elde edilmiştir. Böylece, sezgisel yaklaşımların ötesine geçilerek arıza sonrası düzeltici faaliyetlerin daha veriye dayalı, öngörülebilir ve optimize edilebilir hale getirilmesi sağlanmıştır (Geyikoğlu ve Yağanoğlu, 2025).

Polat ve Dursun, alçak gerilim şebekelerinde sıkça karşılaşılan yüksek empedanslı arızaların tespiti ve sınıflandırılması amacıyla yapay sinir ağları (YSA) tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Öncelikle, yüksek gerilim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan YSA

tabanlı arıza tespit yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemlerin alçak gerilim şebekelerine uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda, bir alçak gerilim şebeke modeli oluşturulmuş ve model Matlab/Simpower simülasyon ortamına aktarılmıştır. Simülasyonlar sonucunda elde edilen veriler, YSA'nın eğitim ve test süreçlerinde kullanılmış; en uygun YSA mimarisi belirlenerek arıza tespiti ve sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Özellikle tek faz-toprak teması şeklinde gelişen yüksek empedanslı arızaların, geleneksel koruma sistemleri tarafından tespit edilememesi nedeniyle bu yaklaşımın önemi vurgulanmıştır. Yapılan testler sonucunda, geliştirilen yöntemin %90–95 aralığında başarı oranı ve yüksek performans kriterleriyle çalıştığı gözlemlenmiş; böylece alçak gerilim şebekelerinde hayati risk oluşturan bu tür arızaların erken ve güvenilir şekilde tespit edilmesine yönelik etkili bir çözüm sunulmuştur (POLAT ve DURSUN).

Yaşar ve diğerleri, elektrik enerjisinin iletiminden çok, düşük gerilim ve yüksek akım nedeniyle kayıpların yoğun olarak yaşandığı dağıtım sistemlerinde güç kayıplarını azaltmaya yönelik alternatif tasarımlar geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Özellikle ülkemizde konut tüketicilerinin enerji tüketimindeki payının yüksek olması ve kayıp-kaçakların büyük oranda dağıtım seviyesinde gerçekleşmesi nedeniyle dağıtım sistemlerinin yapısal iyileştirilmesine odaklanılmıştır. Çalışmada, farklı dağıtım sistemi tasarımlarının uygulanabilirliği teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmış, ayrıca güç faktörünün sistem kayıplarına etkisi detaylı şekilde analiz edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, alternatif tasarımların doğru seçilmesi ve güç faktörünün iyileştirilmesi ile dağıtım sistemlerinde oluşan kayıpların anlamlı düzeyde azaltılabileceği ortaya konmuştur (Yaşar vd., 2010).

Yarat ve Orman, akıllı elektrik sayaçlarından elde edilen aylık tüketim verileri kullanılarak enerji tüketiminde meydana gelebilecek olası anomalilerin tespiti ve geleceğe yönelik tüketim tahminlerinin yapılması amaçlanmıştır. Enerji talebinin hızla artması ve şebekelerin bu talep karşısında daha karmaşık hale gelmesi nedeniyle, enerji tüketiminin izlenmesi ve kontrolü kritik bir hale gelmiştir. Bu kapsamda, dağıtım şirketlerinin karar destek süreçlerine katkı sunmak amacıyla İzolasyon Ormanı (Isolation Forest), Yerel Aykırı Değer Faktörü (Local Outlier Factor - LOF) ve FbProphet algoritmaları kullanılarak anomali tespiti gerçekleştirilmiş; ayrıca FbProphet ve XGBoost algoritmaları karşılaştırılarak zaman serisi tahminleme performansları değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, söz konusu algoritmaların özellikle genel aydınlatma sayaçlarında uç anomali noktalarını başarılı bir şekilde tespit

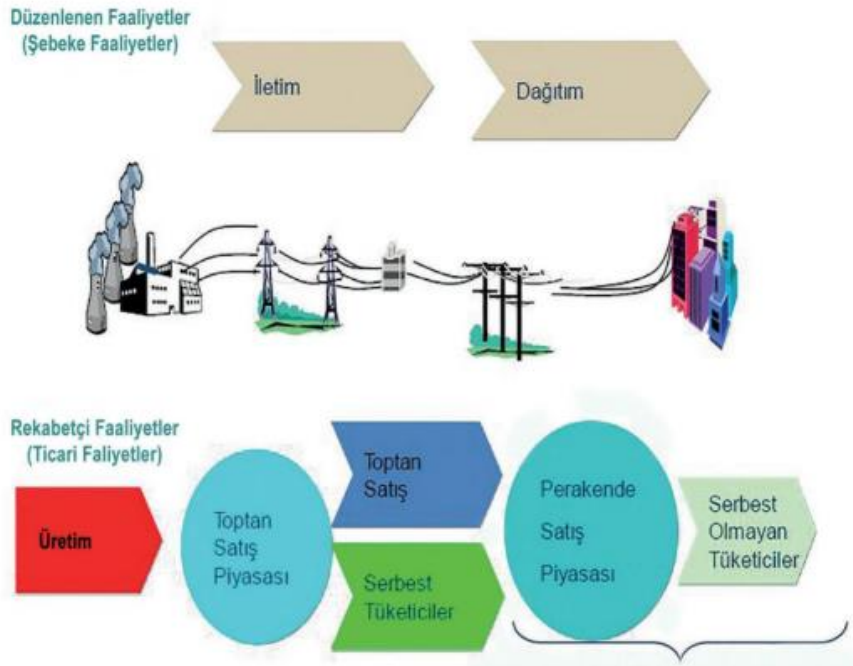
edebildiği, ayrıca FbProphet algoritmasının, sayaç verileri üzerinde XGBoost'a kıyasla daha yüksek doğrulukta tahminler üretebildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, enerji sektöründe veri analitiği temelli erken uyarı sistemlerinin kurulmasına yönelik önemli bir katkı sunmaktadır (Yarat ve Orman, 2023).

Tekin, yeraltı kablolarında meydana gelen kısa devre arızalarının tespiti amacıyla Klasik Ölçme Yöntemleri ve günümüzde kullanılan Modern Tespit Yöntemleri incelenmiş; en yaygın ve basit yöntemlerden biri olan İkincil Darbe Yöntemi kullanılarak farklı arıza direnç değerlerine sahip kısa devre arızalarının tespiti için deneysel bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 193. metrede oluşturulan 256 k Ω , 5,88 k Ω ve 1,1 k Ω dirençli arızalar darbe yansıma faktörünün yüksek olması sayesinde gerçeğe oldukça yakın şekilde tespit edilebilmiştir. Ancak aynı noktadaki 0,65 k Ω dirençli arıza, darbe yansıma faktörünün düşük olması nedeniyle birçok denemeye rağmen tespit edilememiştir. Bu sonuç, darbe yansıma faktörünün yüksekliğinin arıza tespitinde kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, yeraltı kablolarında güvenli ve kesintisiz enerji iletimi sağlanabilmesi için modern ve daha hassas tespit yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerekliliğini desteklemektedir (Tekin, 2006).

Yıldız, artan kaçak elektrik tüketiminin özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde oluşturduğu sorunlara çözüm üretmek amacıyla, abonelere ait gerçek zamanlı veriler kullanılarak kaçak elektrik kullanımının tespiti hedeflenmiş; bu doğrultuda çok değişkenli veri setiyle derin öğrenme yöntemlerinden biri olan Keras kütüphanesi kullanılarak sıralı model (Sequential Model) oluşturulmuş, uygun hiperparametreler ile katmanlar ayrılarak model eğitilmiştir. Kullanılan yöntemle, abonelerin kaçak tüketim gerçekleştirip gerçekleştirmediği durumu en yüksek doğru sınıflandırma başarısı ile tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gerçek zamanlı analizler ve derin öğrenme tekniklerinin kaçak elektrik tespiti konusundaki etkinliğini ortaya koymuş, enerji kayıplarının azaltılması ve şebeke yönetiminin iyileştirilmesi açısından önemli bir katkı sunmuştur (YILDIZ, 2022).

3. ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİ

Elektrik enerjisinin üretim noktasından nihai tüketiciye ulaştırılması süreci, temel olarak üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan dağıtım sistemi, enerjinin orta ve alçak gerilim seviyelerinde son kullanıcılara güvenli ve kesintisiz bir şekilde iletilmesini sağlayan kritik bir işlevi yerine getirmektedir (Jamasb ve Pollitt, 2007; Jiang vd., 2022; Lakervi ve Holmes, 1995) . Dağıtım şebekeleri, enerji arzının sürekliliği, güvenilirliği ve kalitesini temin etmek amacıyla tasarlanmış, teknik ve operasyonel açıdan son derece karmaşık altyapılardır. Bu yapılar, modern elektrik sistemlerinin temel taşlarından biri olarak kabul edilmekte olup, enerji akışının etkin yönetimi, şebeke stabilitesi ve kullanıcı memnuniyetinin sağlanmasında merkezi bir rol oynamaktadır. Ayrıca, dağıtım sistemleri, enerji kayıplarının minimize edilmesi, talep yönetimi, arıza tespiti ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu gibi giderek artan operasyonel zorluklarla başa çıkmak için ileri teknoloji ve otomasyon sistemleriyle desteklenmektedir. Bu bağlamda, dağıtım şebekelerinin işlevselliği ve performansı, elektrik enerjisi sistemlerinin genel verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir (Jamasb ve Pollitt, 2007).



Şekil 3.1. Elektrik Enerjisi Zinciri (Çınar, 2020)

3.1 Dağıtım Şebekelerinin Yapısal Katmanları

Elektrik enerjisinin üretim noktasından son kullanıcıya kadar güvenli, sürekli ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlamak amacıyla yapılandırılan dağıtım sistemi, gerilim seviyelerine göre üç ana katmandan oluşur: yüksek gerilim (YG), orta gerilim (OG) ve alçak gerilim (AG). Bu katmanlar, enerji iletiminden tüketime kadar olan sürecin farklı aşamalarında görev alarak sistemin bütünsel işleyişini sağlar ve enerji akışının hiyerarşik bir düzende yönetilmesine imkân tanır.

Yüksek Gerilim (YG) Dağıtım: Genellikle 34.5 kV ve üzerindeki gerilim seviyelerinde faaliyet gösteren bu katman, enerjinin üretim merkezlerinden trafo merkezlerine iletilmesinde kritik rol oynar. Yüksek gerilim hatları, şehirlerarası ve bölgesel enerji transferinde kullanılır ve geniş alanlarda büyük miktarda enerjinin taşınmasına olanak tanır. Aynı zamanda YG şebekeleri, sistemdeki iletim kayıplarını minimize etmek için tasarlanmıştır ve genellikle çelik direkli havai hatlardan oluşur. Bu hatlar, enerji sistemlerinin omurgasını teşkil eden büyük çaplı altyapı projeleri ile entegre çalışır.

Orta Gerilim (OG) Dağıtım: 1 kV ile 34.5 kV arasındaki gerilim seviyelerini kapsayan OG katmanı, enerjinin şehir içi trafo merkezlerinden, yerleşim bölgelerine ve sanayi tesislerine kadar iletilmesini sağlar. OG dağıtım hatları, çoğunlukla yeraltı kablo sistemleri ya da havai hatlar şeklinde inşa edilir. Yeraltı sistemleri özellikle kentsel alanlarda tercih edilirken, kırsal bölgelerde maliyet ve erişilebilirlik açısından havai hatlar öne çıkar. OG sistemi, şehir şebekesinin ana dağıtım omurgasını oluşturur ve kullanıcıların bulunduğu bölgelere enerjinin yönlendirilmesinden sorumludur.

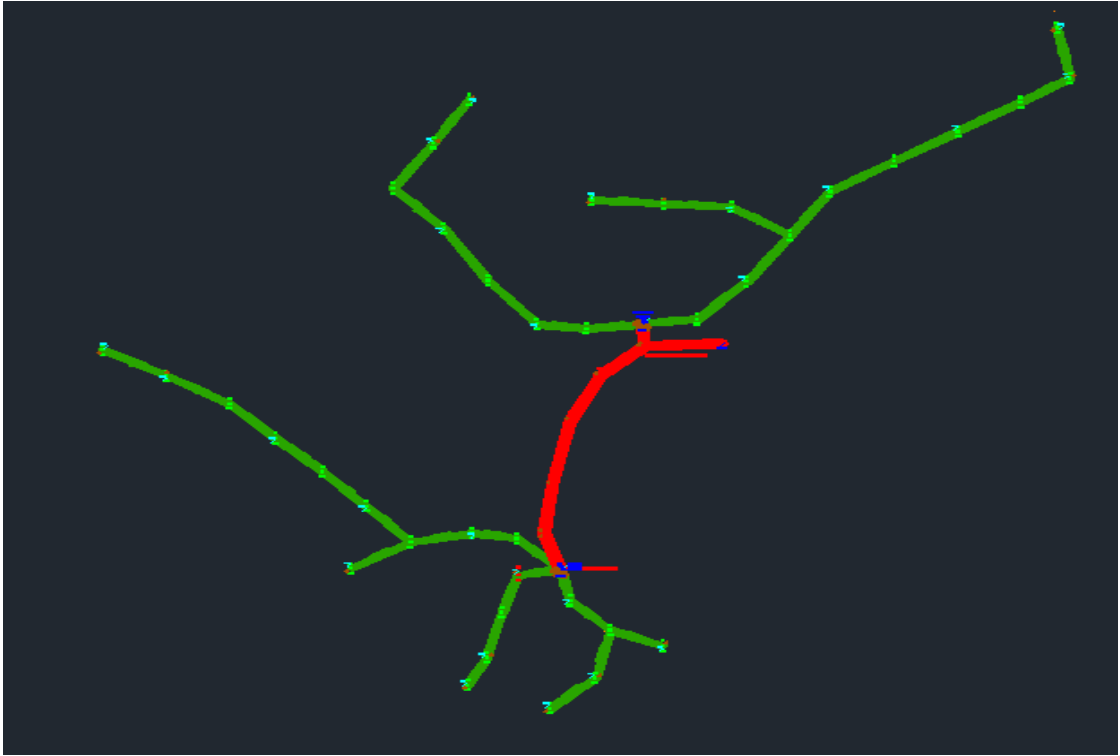
Alçak Gerilim (AG) Dağıtım: 230/400 V seviyesinde çalışan AG katmanı, son kullanıcıların doğrudan enerji aldığı şebeke segmentidir. Bu katman, bireysel konutlar, ticari işletmeler ve küçük sanayi kuruluşlarının enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak tasarlanmıştır. AG şebekeleri, transformatör çıkışlarından itibaren kullanıcı abonelik noktalarına kadar uzanan en alt seviye dağıtım hatlarını içerir. Dağıtım sisteminin bu katmanı, enerji arz güvenliğinin en görünür olduğu ve kullanıcı memnuniyetinin doğrudan etkilendiği yapısal düzeyi temsil eder.

Bu üç yapısal katman arasındaki entegrasyon, enerji sisteminin teknik verimliliğini artırmak ve arıza yönetimini kolaylaştırmak açısından büyük önem taşır. Her bir katmanın kendi içinde sahip olduğu işlevsel ve yapısal özellikler, sistemin genel

performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle dağıtım şebekelerinin planlanması ve yönetimi, bütüncül bir mühendislik yaklaşımı gerektirir (Dönmez, 2013).

3.2 Dağıtım Şebekesi Topolojileri ve İşleyişi

Elektrik dağıtım şebekeleri, enerjinin iletimden sonra son kullanıcıya ulaştırılması sürecinde, sistemin güvenilirliği, sürdürülebilirliği ve esnekliği açısından büyük önem taşır. Bu şebekeler, yapısal organizasyonları ve enerji akış yönlerine göre farklı topolojilerde sınıflandırılmakta olup, her bir yapı kendi içerisinde belirli avantaj ve sınırlılıklar barındırır. Dağıtım şebekesi topolojileri genel olarak üç ana kategoride değerlendirilmektedir:

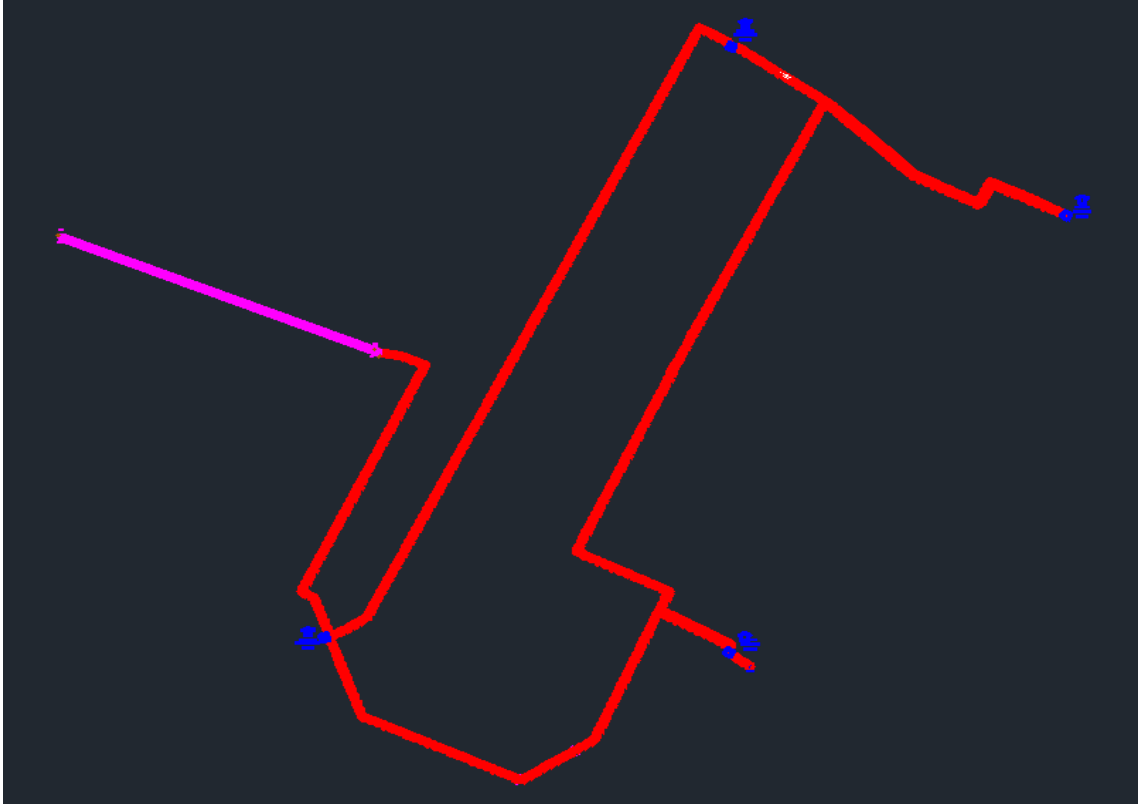


Şekil 3.2. Radyal Şebekeler Örnek Görünümü

Radyal Şebekeler: En yaygın ve en sade topolojik yapı olarak öne çıkan radyal sistemler, enerji akışının tek oldukça yönlü olduğu, trafo merkezinden başlayarak dallanarak son tüketiciye ulaşan doğrusal bir yapı sergiler. Bu tür şebekeler, düşük kurulum maliyetleri, kolay işletme ve basit kontrol mekanizmaları nedeniyle özellikle kırsal ve az yoğunluklu bölgelerde tercih edilmektedir. Ancak sistemde bir arıza meydana geldiğinde, arızanın meydana geldiği noktadan sonraki tüm abonelerin enerjisi kesilir. Bu

durum, sistemin güvenilirliğini sınırlar ve kesinti sürelerinin artmasına neden olur. Ayrıca, bu yapının yeniden konfigürasyon ve yedek besleme esnekliği düşüktür.

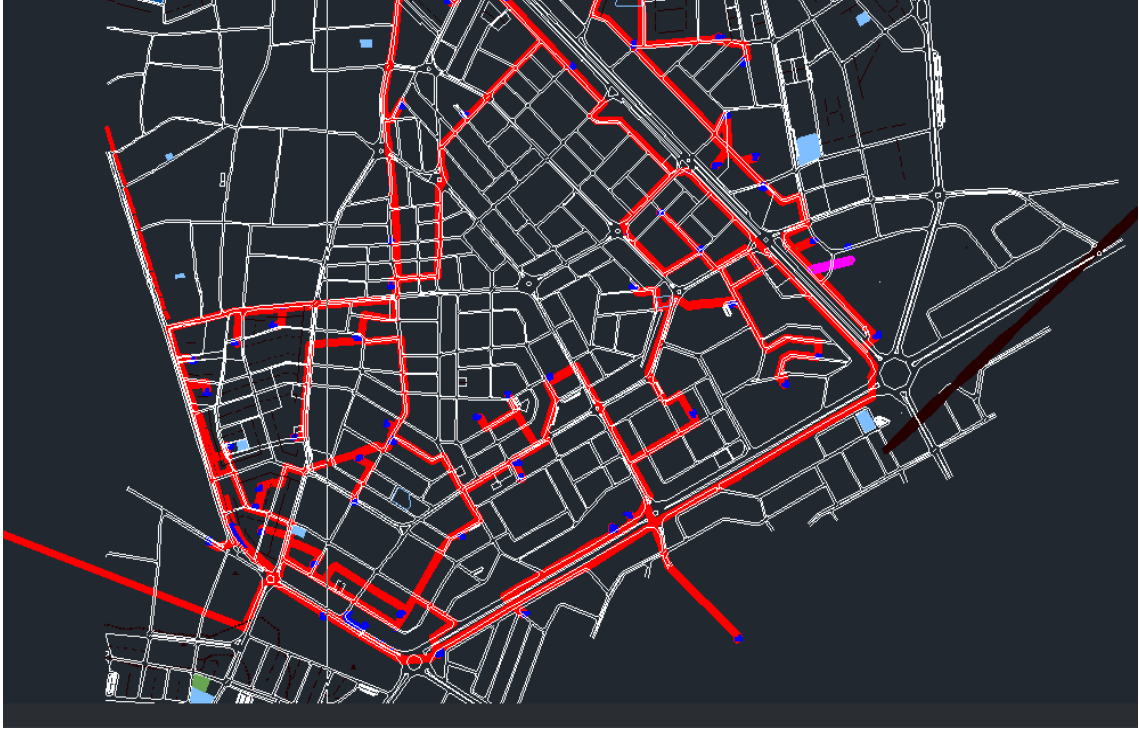
Ring (Halkalı) Şebekeler: Radyal sistemin aksine, halkalı şebekeler enerji akışının çift yönlü gerçekleşmesine olanak tanır. Trafo merkezinden çıkan hatlar, belirli bir döngü oluşturarak yeniden aynı merkeze ya da başka bir merkeze bağlanır. Bu yapı sayesinde, sistemde bir arıza veya bakım faaliyeti gerçekleştiğinde enerji, alternatif bir yol üzerinden sağlanarak kesinti önlenir. Böylelikle sistemin operasyonel güvenilirliği ve sürekliliği önemli ölçüde artırılır. Halkalı sistemler, şehir içi yerleşimlerde, özellikle orta gerilim dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Maliyet açısından radyal yapıya göre daha yüksek olsa da sunduğu esneklik ve güvenilirlik, bu maliyeti dengelemektedir.



Şekil 3.3. Ring (Halkalı) Şebekeler Örnek Görünümü

Ağ (Mesh) Şebekeler: En karmaşık ve en esnek dağıtım yapısını temsil eden ağ tipi şebekeler, çok sayıda besleme noktasına ve bağlantı alternatifine sahiptir. Enerji, çeşitli yollarla farklı noktalara ulaştırılabilir, bu nedenle sistemin hem güvenilirliği hem de yük dengeleme kabiliyeti maksimum seviyededir. Bu topoloji, özellikle büyükşehirlerin yoğun enerji taleplerini karşılamak amacıyla geliştirilmiş olup, yüksek yatırım ve işletme maliyetlerine rağmen; üstün arıza dayanımı, yük esnekliği ve ileri düzey otomasyon

imkanlarıyla modern akıllı şebeke uygulamalarına temel oluşturur. Ancak bu tür sistemlerin tasarımı, kontrolü ve sürekli izlenmesi karmaşık yazılım ve donanım altyapılarını gerektirir.



Şekil 3.4. Ağ(Mesh) Şebekeler Örnek Görünümü

3.3 Havai ve Yeraltı Dağıtım Hatları

Elektrik dağıtım sistemleri, uygulama alanlarının coğrafi, demografik ve çevresel koşullarına bağlı olarak genellikle iki temel altyapı türü üzerinden inşa edilmektedir: havai hatlar ve yeraltı kabloları. Her iki sistemin teknik ve ekonomik açıdan kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu nedenle, doğru altyapı tercihinin yapılması, enerji arz güvenliği, sistem verimliliği ve uzun vadeli işletme maliyetleri açısından kritik öneme sahiptir.

Havai Hatlar: Havai dağıtım hatları, iletkenlerin açık ortamda, direkler yardımıyla yerden belirli bir yükseklikte taşındığı, kurulumu görece kolay ve düşük maliyetli altyapılardır. Bu hatlar, özellikle kırsal bölgelerde geniş alanlara enerji iletimi sağlamak için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ekonomik oluşları ve bakım-onarım işlemlerinin sahada hızlı ve kolay bir şekilde yapılabilmesi gibi avantajları bulunsu da, dış çevresel etkenlere karşı oldukça hassastırlar.



Şekil 3.5. Havai Orta Gerilim Hattı



Şekil 3.6. Havai Alçak Gerilim Hattı

Kuvvetli rüzgâr, fırtına, kar yükü, buzlanma, yıldırım düşmesi gibi doğal afetler ile ağaç dalları veya kuşlar gibi biyotik unsurlar, hatların fiziksel bütünlüğünü bozarak

arıza riskini artırabilmektedir. Ayrıca, yerleşim alanlarında görsel kirlilik yaratmaları ve estetik açıdan çevreyle uyumsuz olmaları, şehir planlamasında tercih edilmelerini sınırlandıran faktörlerdendir.

Yeraltı Kabloları: Yeraltı dağıtım sistemleri ise, kabloların toprak altına gömülerek dış etkenlerden korunduğu, özellikle kent merkezlerinde, yoğun nüfuslu yerleşimlerde ve tarihi ya da estetik öneme sahip bölgelerde yaygın olarak tercih edilen alternatif bir altyapıdır. Bu sistemler, çevresel etkilere karşı yüksek koruma sağlamaları ve estetik bütünlüğü bozmamaları nedeniyle avantajlı görülmektedir.

Ayrıca yeraltı kabloları, çevresel gürültü ve elektromanyetik parazit açısından da daha izole bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek ilk yatırım maliyetleri, arıza tespitinin zorlukları ve bakım-onarım süreçlerinin uzman ekipman ve ileri düzey teknik bilgi gerektirmesi, bu sistemlerin uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Arıza durumunda kablonun konumunun tespiti, kazı çalışmaları ve onarım süreci, havai hatlara kıyasla hem daha uzun sürede hem de daha yüksek maliyetle gerçekleştirilmektedir (Hilliard, 2000).



Şekil 3.7. Yeraltı Hatları orta gerilim ve alçak gerilim (Müşterek) Hatlar

Çizelge 3.1. Yeraltı Hatları ve havai hat karşılaştırılması

Özellik	Havai Hatlar	Yeraltı Hatları
Kurulum Maliyeti	Düşük	Yüksek
Dayanıklılık	Hava koşullarına bağlı	Dış etkenlere karşı korumalı
Arıza Tespiti	Kolay	Zor ve maliyetli
Görsel Etki	Estetik olmayan yapılar	Görsel kirlilik yaratmaz
Uygulama Alanları	Kırsal ve banliyö alanları	Şehir merkezleri ve yoğun bölgeler

Çizelge 3.1’de, havai hatlar ile yeraltı hatlarının temel özellikleri karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır. Havai hatların en önemli avantajı düşük kurulum maliyeti ve bakım sırasında arızaların kolay tespit edilebilmesidir. Bununla birlikte, bu hatlar doğrudan dış atmosfer koşullarına maruz kaldıkları için rüzgâr, fırtına, buz yükü veya sıcaklık değişimlerinden kolaylıkla etkilenebilmekte ve bu da enerji kesintilerinin daha sık yaşanmasına neden olmaktadır. Ayrıca, özellikle şehir merkezlerinde ve yoğun nüfuslu bölgelerde görsel bütünlüğü bozarak estetik açıdan olumsuz bir etki yaratmaktadır. Dolayısıyla havai hatlar, daha çok kırsal bölgeler veya düşük yoğunluklu yerleşim alanlarında tercih edilmektedir.

Yeraltı hatları ise ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, dış etkenlere karşı korumalı yapıları sayesinde daha uzun ömürlü ve güvenilir bir enerji iletim çözümü sunmaktadır. Görsel kirlilik oluşturmamaları sebebiyle, özellikle şehir merkezleri ve yoğun nüfuslu bölgelerde tercih edilmekte; bu da modern kentleşme anlayışı ile uyumlu bir altyapı seçeneği ortaya koymaktadır. Ancak arıza durumunda tespit ve onarım işlemleri karmaşık ve maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle yeraltı ve havai hat tercihleri, maliyet, güvenilirlik, estetik kaygılar ve bakım kolaylığı gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

3.4 Alçak Gerilim Yeraltı Dağıtım Sistemlerinin Önemi ve Zorlukları

Günümüzde hızlı kentleşme, nüfus yoğunluğundaki artış ve şehir altyapılarının karmaşıklaşması, alçak gerilim düzeyinde yeraltı dağıtım sistemlerinin tercih edilme oranını önemli ölçüde artırmıştır. Bu sistemler, özellikle konut ve ticari alanlarda sayaç

noktalarına kadar uzanan enerji iletiminde; fiziksel güvenlik, estetik bütünlük ve çevresel faktörlere karşı dayanıklılık açısından havai sistemlere göre birçok üstünlük sunmaktadır (Bozgeyik, 2015; Brown, 2017). Kent merkezlerinde yeraltı kablolarının kullanılması, elektrik altyapısının görünmezliği sayesinde şehir estetiğini korumakta; aynı zamanda trafikten, hava koşullarından ve diğer dış etmenlerden kaynaklanan arıza risklerini minimize etmektedir.

Bununla birlikte, yeraltı alçak gerilim dağıtım sistemleri bazı teknik ve yapısal zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle sistemin zemin altında konumlandırılması, hem planlama hem de işletme süreçlerinde arıza tespiti ve izinsiz enerji kullanımı gibi konularda önemli sınırlılıklar yaratmaktadır. Teknik olmayan kayıplar, yani sayaç dışı bağlantılar, bilinçli enerji hırsızlığı veya pano düzeyinde gerçekleştirilen izinsiz müdahaleler, dağıtım şirketlerinin gelir kaybına uğramasına neden olan temel sorunlar arasında yer almaktadır (Depuru vd., 2011; Mohammad vd., 2013). Yeraltı sistemlerinin doğası gereği fiziki erişimin sınırlı oluşu, geleneksel kaçak tespit yöntemlerinin yetersiz kalmasına sebep olmakta; bu durum da daha yenilikçi, teknolojik çözümlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir (Singh vd., 2018).

Özellikle alçak gerilim panoları seviyesinde gerçekleştirilen dış müdahaleler, genellikle yerinde gözlem, kazı veya fiziki denetim gibi yüksek maliyetli ve zaman alıcı işlemlerle tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda, pano giriş ve çıkışlarında anlık olarak izlenen akım ve gerilim verileri, kaçak kullanımın belirlenmesinde etkili bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yaklaşım, dağıtım sistemlerinde yüksek çözünürlüklü veri toplama altyapılarının kurulması ve bu verilerin büyük veri analitiği yöntemleriyle işlenmesi ile daha etkin hale getirilebilir (Xu, 2025). Dolayısıyla, alçak gerilim yeraltı sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından hem fiziksel altyapının sağlamlığı hem de izleme-temelli güvenlik uygulamaları büyük önem arz etmektedir.

3.5 Akım ve Gerilim Ölçüm Sistemlerinin Dağıtım Şebekelerinde Rolü

Modern dağıtım şebekelerinde, akım ve gerilim ölçüm sistemleri yalnızca enerji tüketimini kaydetmekle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda şebekenin dinamik davranışlarını izleyerek sistem sağlığının bütünsel olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, özellikle dijital dönüşüm sürecinin merkezinde konumlanan akıllı sayaçlar, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemleri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sensör teknolojileri, hem operasyonel izleme hem de

karar destek süreçlerinde önemli rol oynamaktadır (Fang vd., 2011). Bu bileşenler aracılığıyla dağıtım sisteminin farklı noktalarından sürekli olarak toplanan yüksek çözünürlüklü veriler, yalnızca tüketim analizine değil, aynı zamanda arıza tespiti, yük yönetimi, frekans kararlılığı ve enerji kalitesi gibi kritik performans parametrelerinin izlenmesine de imkân sağlamaktadır.

Özellikle alçak gerilim düzeyindeki yeraltı pano hatlarında, pano giriş ve çıkışlarındaki akım-gerilim ölçümlerinin anlık karşılaştırılması sayesinde, teknik olmayan kayıpların (örneğin kaçak enerji kullanımı, sayaç atlatma gibi) hızlı ve doğru bir şekilde belirlenmesi mümkün hale gelmektedir. Bu teknolojik altyapı, sadece reaktif müdahaleler yerine proaktif şebeke yönetimini mümkün kılmakta; potansiyel arızaların önceden öngörülmesi, enerji kayıplarının minimize edilmesi ve bakım maliyetlerinin azaltılması gibi çok boyutlu katkılar sunmaktadır. Gerçek zamanlı veri analitiği, yapay zekâ destekli algoritmalarla bütünleştiğinde, dağıtım sisteminin genel verimliliği ve şebeke kararlılığı önemli ölçüde artırılabilir. Bu doğrultuda, modern ölçüm sistemleri sadece veri toplama birimleri olarak değil, aynı zamanda enerji sistemlerinin dijital ikizlerini besleyen temel karar verici unsurlar olarak değerlendirilmelidir.

3.6 Teknik Olmayan Kayıpların Tanımı ve Önemi

Elektrik dağıtım sistemlerinde meydana gelen enerji kayıpları, genel olarak teknik ve teknik olmayan kayıplar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Teknik kayıplar; elektrik enerjisinin üretim noktasından tüketiciye ulaşması sürecinde hat direnci, trafolardaki demir ve bakır kayıpları, gerilim düşümleri, manyetik kaçaklar ve sistemsel ısı yayılımı gibi fiziksel ve yapısal nedenlerle oluşan enerji kaybını ifade eder. Bu tür kayıplar çoğunlukla öngörülebilir, ölçülebilir ve mühendislik önlemleriyle minimize edilebilir niteliktedir. Öte yandan, teknik olmayan kayıplar; enerji sistemindeki herhangi bir teknik eksiklikten değil, kullanıcı kaynaklı kasıtlı ya da ihmalkâr davranışlar sonucu ortaya çıkan kayıplardır ve bu yönüyle daha karmaşık, öngörülmesi zor ve kontrol edilmesi güç bir sorunsal oluşturmaktadır.

Teknik olmayan kayıpların en yaygın örneklerinden biri, özellikle alçak gerilim (AG) seviyesindeki dağıtım hatlarında gerçekleştirilen izinsiz enerji çekimleridir. Bu durum çoğunlukla aboneler veya sistem dışı üçüncü şahıslar tarafından, dağıtım hatlarının delinerek sayaç dışı doğrudan bağlantılar kurulmasıyla gerçekleştirilmekte ve bu yollarla enerji tüketimi herhangi bir kayıt altına alınmadan yapılmaktadır. Yeraltı kablolarının

delinerek harici hatlar çekilmesi suretiyle gerçekleştirilen bu usulsüz müdahaleler, çoğu zaman gözle tespit edilemeyecek biçimde gerçekleştirildiğinden dolayı dağıtım şirketleri açısından ciddi ekonomik kayıpların yanı sıra, sistem güvenliği ve şebeke kararlılığı üzerinde de önemli tehditler oluşturmaktadır (Depuru vd., 2011; Jokar vd., 2015). Bu bağlamda özellikle şehir içi yoğun yerleşim alanlarında yapılan bu tür kaçak bağlantılar, sadece finansal değil, aynı zamanda operasyonel, çevresel ve sosyal sonuçları da beraberinde getirmektedir.

Dahası, teknik olmayan kayıplar sosyal açıdan da olumsuz etkiler doğurmaktadır. Kayıtlı ve düzenli ödeme yapan aboneler, kayıp-kaçak oranlarının yüksek olduğu bölgelerde dolaylı olarak bu bedelin maliyetine katlanmakta; bu durum da enerji dağıtımında adaletsizlik algısını artırmakta ve müşteri memnuniyetini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte, kaçak elektrik kullanımı kimi zaman yangın riski, can güvenliği tehlikesi ve altyapı hasarlarına da yol açabilmektedir.

Bu sebeplerle, teknik olmayan kayıpların önlenmesine yönelik olarak sadece cezai ve idari önlemler değil, aynı zamanda ileri düzey teknolojik çözümlerin kullanılması da büyük önem taşımaktadır. Akıllı sayaçlar, gelişmiş uzaktan izleme sistemleri, SCADA ve IoT tabanlı veri toplama ve analiz mekanizmaları, anormal tüketim davranışlarının tespiti için yapay zekâ destekli algoritmalar gibi yenilikçi uygulamalar, bu tür kayıpların azaltılmasında stratejik rol oynamaktadır. Özellikle dağıtım panoları seviyesinde akım-gerilim analizlerinin anlık olarak yapılabilmesi, kaçak bağlantıların daha erken aşamada ve daha az maliyetle tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda, hem altyapı modernizasyonu hem de kullanıcı bilincinin artırılması yoluyla teknik olmayan kayıpların azaltılması, sürdürülebilir bir enerji yönetimi için elzemdir.

Şekil 3.8’de, enerji iletim sisteminin ana hattına, izin alınmaksızın yapılan müdahale sonucu oluşturulmuş olan harici bir elektrik bağlantısının görseli yer almaktadır. Bu tür bir bağlantı, enerji iletim altyapısının teknik ve yasal bütünlüğünü ihlal eden ve enerji kaçakçılığı kapsamında değerlendirilebilecek bir durumdur. Görselde sunulan yapı, enerji dağıtım hattına doğrudan erişim sağlanarak, tüketim noktasına herhangi bir onay ya da koruma sistemi olmaksızın enerji taşınmasını mümkün kılan bir düzenlemeyi temsil etmektedir. Söz konusu bağlantının, enerji şirketlerinin denetim mekanizmaları dışında gerçekleşmiş olması, yalnızca enerji kayıplarına yol açmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin güvenliğini tehdit eder niteliktedir.



Şekil 3.8. Ana Hattan Harici Çekilen Usulsüz Hat

Bu tür usulsüz bağlantılar, genellikle izinsiz kullanıcılar tarafından manuel yollarla ve güvenlik önlemleri göz ardı edilerek gerçekleştirildiğinden, yangın riski, gerilim dengesizlikleri, kaçak akım problemleri ve ekipman arızaları gibi ciddi teknik sorunlara neden olabilmektedir. Şekil 3.8'deki bağlantının izole edilmeden ve herhangi bir mühendislik hesabı yapılmaksızın gerçekleştirilmiş olması, can ve mal güvenliği açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Ayrıca, bu tür müdahaleler, sistem üzerindeki yük dengesini bozmakta ve dağıtım şebekesinde izlenebilirliğin azalmasına yol açmaktadır.

Bu bağlamda, Şekil 3.8 yalnızca fiziksel bir kaçak bağlantıyı değil; enerji dağıtım sistemlerinde karşılaşılan, yasal altyapıyı ihlal eden ve teknik bütünlüğü zedeleyen yaygın bir problemi temsil etmektedir. Bu tip durumlar, kaçak tespitine yönelik geliştirilen modern yöntemlerin ve izleme teknolojilerinin önemini ortaya koymaktadır. Özellikle fiziksel müdahale olmadan çalışan sensör temelli sistemlerin bu tarz izinsiz bağlantıların yarattığı akım dengesizliklerini anlık olarak algılayabilmesi, sahada erken uyarı sistemlerinin etkinliğini artırmakta ve müdahale süresini kısaltmaktadır.

Sonuç olarak, Şekil 3.8'de yer alan görsel, yalnızca bir teknik düzenlemeyi değil; aynı zamanda enerji altyapılarında karşılaşılan izinsiz müdahale sorunlarına dair farkındalığı artırmayı hedefleyen, önemli bir saha örneğidir. Bu tür belgelenmiş durumlar, sadece akademik çalışmalar açısından değil; aynı zamanda uygulayıcı

kurumlar için de politika geliştirme ve önleyici sistem tasarımı bağlamında yol gösterici nitelik taşımaktadır

3.7 Usulsüz Bir Şekilde Hatların Delinip Harici Kablo Çekilmesinin Şebekeye Etkileri

3.7.1 Enerji kayıplarının artması ve ekonomik zararlar

Alçak gerilim (AG) hatlarının delinerek harici kablolar aracılığıyla sistem dışı enerji çekimi, dağıtım şebekelerinde enerji dengesizliğine yol açan başlıca teknik olmayan kayıp kaynaklarından biridir. Bu tür müdahaleler sonucunda, üretilen elektrik enerjisinin bir kısmı resmi ölçüm sistemlerine (sayaçlara) uğramadan doğrudan tüketildiğinden, kayıtlara geçmeyen ciddi miktarda enerji kaybı meydana gelir. Bu durum yalnızca dağıtım şirketlerinin satış gelirlerini azaltmakla kalmaz; aynı zamanda enerji üretim ve dağıtım süreçlerinde planlamanın sağlıklı yapılmasını da engeller. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, teknik olmayan kayıpların toplam sistem kayıplarındaki oranı oldukça yüksektir. Bu büyüklükteki kayıplar, kamu ve özel dağıtım kuruluşlarının yıllık bilançolarında milyarlarca liralık ekonomik zararlara yol açmakta; yatırımların geri dönüş sürelerini uzatmakta ve sistemin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Ayrıca, sistem genelinde yaşanan bu gelir kayıpları, enerji birim fiyatlarının artmasına neden olarak, dürüst tüketicilerin ekonomik yükünü de artırmakta ve sosyal adalet açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Sonuç olarak, bu tür usulsüz enerji tüketimi sadece finansal değil; sistemsal verimlilik, yatırım planlaması ve kamu güveni açısından da ciddi bir sorun alanı olarak değerlendirilmektedir.

3.7.2 Şebeke dengesizliği ve arıza risklerinin artması

İzinsiz ve plansız enerji çekimleri, elektrik dağıtım şebekesinde yük akışının doğal dengesini bozarak sistem performansını olumsuz etkileyen kritik bir sorun teşkil etmektedir. Özellikle üç fazlı sistemlerde, bu tür kaçaklar fazlar arasında yük dağılımında ciddi dengesizliklere neden olur. Faz dengesizliği, gerilim seviyelerinde ani dalgalanmalara yol açarken, harmonik bozulmaların artmasına ve akımların nominal sınırların üzerinde seyretmesine zemin hazırlar. Bu durum, şebekenin çeşitli elemanları üzerinde ekstra termal ve mekanik stres yaratır. Örneğin, trafoların aşırı yüklenmesi,

manyetik çekirdek ve sargıların erken yaşlanmasına sebep olurken, kablolarda ve bağlantı noktalarında artan sıcaklık ve titreşimler fiziksel yıpranmayı hızlandırır. Bu etkiler, sistem güvenilirliğini zayıflatarak arıza sıklığını artırmakta ve bakım-onarım maliyetlerini yükseltmektedir. Sonuç olarak, izinsiz enerji çekimleri sadece ekonomik kayıplara değil, aynı zamanda dağıtım sisteminin ömrünün kısalmasına ve elektrik kesintilerinin artmasına da yol açmaktadır. Bu bağlamda, şebeke dengesinin korunması ve kaçakların önlenmesi, dağıtım sistemlerinin sürdürülebilirliği ve güvenilirliği açısından hayati öneme sahiptir (Gómez-Expósito vd., 2018).

3.7.3 Güvenlik ve şebeke riskleri

Delinmiş alçak gerilim (AG) hatlarından çekilen harici kablolar, çoğunlukla elektrik tesisatı standartlarına ve yönetmeliklerine uygun olmayan malzeme kalitesi ve montaj teknikleriyle döşenmektedir. Bu uygunsuzluklar, sistemde ciddi güvenlik açıklarının oluşmasına zemin hazırlar. Özellikle yalıtım kalitesinin düşük olması, uygun topraklama ve koruma tedbirlerinin alınmaması, elektrik çarpması riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, bu hatlarda meydana gelen kısa devreler ve aşırı yüklenmeler, şebeke ekipmanlarında yangın çıkma olasılığını yükseltmekte ve bu yangınlar çevresel ve maddi zararların yanı sıra can kayıplarına da sebebiyet verebilmektedir. Harici kabloların kontrolsüz ve plansız kullanımı, şebekenin elektriksel bütünlüğünü bozmakla kalmayıp, aynı zamanda toplum güvenliği açısından da önemli bir tehdit unsuru oluşturmaktadır. Bu nedenle, elektrik dağıtım sistemlerinde standart dışı hat kullanımının önlenmesi ve harici kabloların tespiti için etkin tekniklerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. İnsan yaşamını doğrudan etkileyen bu risklerin minimize edilmesi, hem teknik hem de hukuki açıdan öncelikli bir konu olarak ele alınmalıdır.

3.7.4 Enerji kalitesi problemleri

Kaçak hatlar aracılığıyla yapılan düzensiz ve kontrolsüz enerji çekimleri, dağıtım şebekesinin yük profilini doğrudan etkileyerek enerji kalitesi üzerinde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Özellikle ani yük değişimleri ve dengesiz güç çekimleri, gerilim düşümleri, gerilim yükselmeleri ve kısa süreli gerilim dalgalanmaları (sag swell flicker) gibi kalite parametrelerinde bozulmalara neden olmaktadır. Bu tür sapmalar, hassas çalışan sanayi cihazları, tıbbi ekipmanlar ve bilgi teknolojileri altyapısı gibi sistemlerde ciddi işlev

bozukluklarına yol açabilirken; konut abonelerinde ise beyaz eşya, elektronik cihazlar ve aydınlatma sistemlerinde arıza riskini artırmaktadır. Enerji kalitesindeki bu olumsuzluklar, sadece kullanıcı tarafında donanım arızalarına sebep olmakla kalmayıp, aynı zamanda müşteri memnuniyetini ve hizmet kalitesine duyulan güveni de azaltmaktadır. Ayrıca düşük enerji kalitesi, dağıtım şirketleri açısından tazminat ve bakım-onarım maliyetlerini artırmakta, regülasyonlara uyum konusunda da zorluklar yaratmaktadır. Bu çerçevede, kaçak enerji kullanımının sistematik olarak denetlenmesi ve enerji kalitesi üzerindeki etkilerinin izlenmesi, modern dağıtım sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

3.7.5 Teknik olmayan kayıpların tespiti ve önlenmesine ilişkin zorluklar

Elektrik dağıtım sistemlerinde, özellikle alçak gerilim (AG) seviyesindeki yeraltı hatlarında meydana gelen teknik olmayan kayıpların tespiti, gerek operasyonel süreçler gerekse altyapı koşulları bakımından karmaşık ve zorlu bir problem alanı oluşturmaktadır. Teknik olmayan kayıplar; ölçüm hataları, sayaç manipülasyonları ve özellikle hat delme gibi doğrudan kaçak kullanım amaçlı müdahalelerle ortaya çıkmakta ve çoğu zaman geleneksel yöntemlerle belirlenememektedir.

Yeraltı kablolarının delinerek harici kablo bağlantıları ile yapılan kaçak kullanımlar, çoğunlukla yerin altına gizlenmiş yapıları nedeniyle gözle tespit edilemez niteliktedir. Bu tür bağlantılar, standart dışı malzeme ve uygunsuz yöntemlerle gerçekleştirildiği için hem kaçak tespiti hem de sistem güvenliği açısından ciddi riskler doğurmaktadır. Konvansiyonel tespit yöntemleri —örneğin manuel sayaç kontrolleri, şüpheli alanlarda saha denetimleri ya da plansız kazılar— zaman alıcı, yüksek maliyetli ve operasyonel olarak verimsizdir (Jokar vd., 2015).

Modern elektrik dağıtım ağlarında bu sorunun üstesinden gelebilmek amacıyla dijital teknolojilere dayalı daha sofistike yöntemlerin geliştirilmesi elzem hale gelmiştir. Özellikle IoT tabanlı sensör ağları, uzaktan izleme sistemleri ve yapay zekâ destekli veri analitiği uygulamaları, bu alandaki yenilikçi çözümler arasında öne çıkmaktadır. Akım ve gerilim farklarının pano seviyesinde sürekli ve çift yönlü olarak izlenmesi, beklenmeyen enerji akışlarının belirlenmesine olanak sağlamakta, böylece potansiyel kaçak noktaları yüksek doğrulukla tespit edilebilmektedir. Akıllı sayaçlardan elde edilen büyük veri setlerinin zaman serisi analizi, makine öğrenimi modelleri (özellikle denetimli sınıflandırıcılar ve anomali tespiti algoritmaları) ile birleştirildiğinde, insan müdahalesi

olmaksızın gerçek zamanlı kaçak tespiti mümkün hale gelmektedir (Bağcı, 2025; Kaypmaz vd.; Tabak ve Yalçın, 2004).

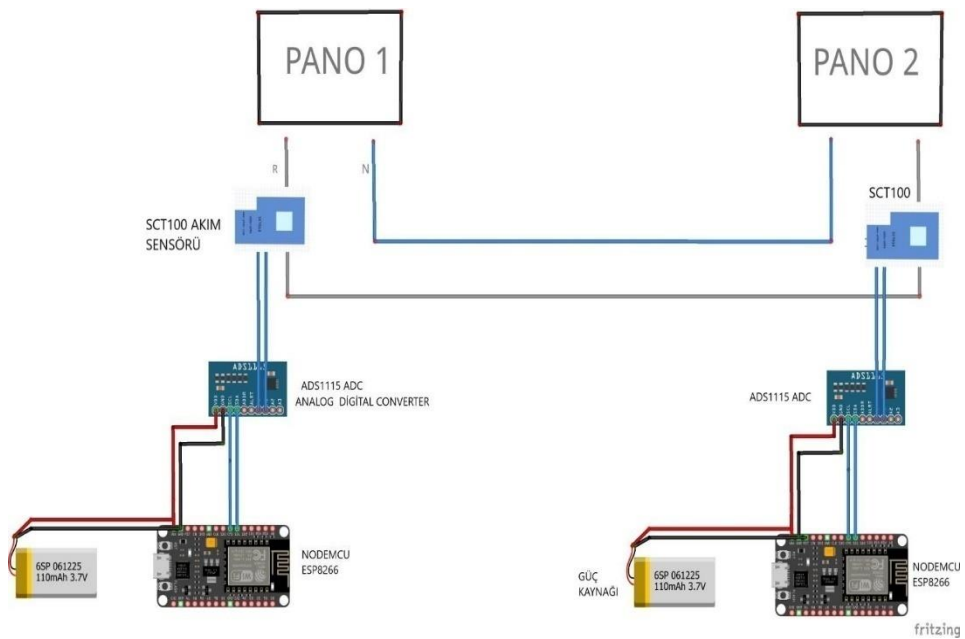
Ancak bu sistemlerin uygulanabilirliği, yalnızca teknik altyapı ile sınırlı değildir. Veri güvenliği, sistemler arası entegrasyon, personelin dijital yetkinliği ve regülasyonlara uygunluk gibi birçok faktör de bu teknolojilerin etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, teknik olmayan kayıplarla etkin mücadele için sadece teknolojik çözümler değil, aynı zamanda mevzuat, denetim süreçleri ve organizasyonel yetkinliklerin bir araya getirildiği çok katmanlı bir stratejik yaklaşım gereklidir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Kullanılan Donanımlar ve Malzemeler

Bu çalışmada, alçak gerilim seviyesinde yeraltı pano beslemelerinde ortaya çıkabilen kaçak akımların gerçek zamanlı ve güvenli biçimde izlenip tespit edilmesine yönelik, gelişmiş sensör ve mikrodenetleyici tabanlı bir ölçüm-yazılım zinciri tasarlanmıştır. Sistem mimarisi; birincil iletken fiziksel müdahale gerektirmeyen akım algılama katmanı, sinyal koşullandırma (yük direnci, ofsetleme ve giriş korumaları), analog-sayısal dönüşüm ve mikrodenetleyici üzerinde çalışan sayısal işleme/karar algoritmalarından oluşmaktadır. Bu sayede saha koşullarında enerji kesintisi oluşturmaktan kurulum yapılabilen, ölçülen dalga formu örneklenerek hat RMS akımı, tepe değeri, harmonik içerik ve kaçak-kısa devreye işaret eden anormallikler yazılımsal olarak belirlenebilmektedir. Tasarımda, gömülü yazılım tarafında ofset düzeltimi, düşük geçiren anti-aliasing süzgeci, faz kayması telafisi ve çok noktalı kalibrasyon adımları uygulanarak uzun dönem kararlılık ve tekrarlanabilirlik hedeflenmiştir.

4.2 Sistem Tasarımı ve Kurulum



Şekil 4.1. Devrenin Şebeke Hattına Bağlanma Şekli

Bu çalışmada, alçak gerilim seviyesinde yeraltı pano beslemelerinde meydana gelebilecek elektrik kaçaklarının tespitine yönelik sensör tabanlı, sayısal işleme destekli ve kablosuz haberleşme özelliklerine sahip bir izleme sistemi tasarlanmıştır. Çalışmanın amacı, yeraltı enerji dağıtım hatlarında kaçak akımların neden olabileceği enerji kayıplarını ve güvenlik risklerini en aza indirmek, aynı zamanda bakım ve denetim süreçlerini daha verimli hale getirmektir. Şemada görüldüğü üzere sistem, iki farklı pano hattı (Pano 1 ve Pano 2) için ayrı ayrı kurulmuş olup, her bir panonun çıkış akımı bağımsız olarak izlenebilmektedir. Bu yapı, hatların ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak tanıırken aynı zamanda ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmasıyla kaçak akım tespitinde güvenilirliği artırmaktadır.

Sistemin algılama katmanında SCT100 tipi akım sensörleri kullanılmıştır. SCT100, non-invaziv (kelepçe tipi) yapısı sayesinde iletkenin üzerinden geçen alternatif akımı, manyetik alan üzerinden algılamakta ve bunu gerilime dönüştürerek ölçülebilir hale getirmektedir. Bu yöntem, enerji akışını kesmeden montaj yapılabilmesine imkân tanımakta ve galvanik izolasyon sayesinde sistem elemanları ile kullanıcı güvenliğini sağlamaktadır. Sensörlerden elde edilen bu analog sinyallerin düşük genlikli olması nedeniyle doğrudan mikrodenetleyiciye aktarılması mümkün değildir. Bu nedenle sinyaller, yüksek çözünürlüklü bir dönüştürücü aracılığıyla sayısallaştırılmıştır.

Bu noktada ADS1115 analog-sayısal dönüştürücü (ADC) modülleri devreye girmektedir. ADS1115, 16-bit çözünürlük sunan delta-sigma mimarili yapısıyla akım sensörlerinden elde edilen sinyallerin ayrıntılı biçimde örneklenmesini sağlar. Dört adet giriş kanalına sahip olması, aynı anda birden fazla sensörden gelen verilerin izlenmesine olanak vermektedir. Çalışmada her pano için ayrı bir ADS1115 modülü kullanılmış ve böylelikle sensör verileri yüksek doğrulukla sayısallaştırılmıştır. Ayrıca ADS1115'in programlanabilir kazanç yükselteci özelliği sayesinde küçük genlikli kaçak akım işaretleri daha görünür hale getirilmiştir.

Sayısallaştırılan veriler, ESP8266 tabanlı NodeMCU geliştirme kartları üzerinde işlenmiştir. NodeMCU, gömülü Wi-Fi modülü sayesinde verilerin kablosuz olarak merkezi sunucuya veya IoT tabanlı platformlara aktarılmasına imkân tanımaktadır. Arduino IDE kullanılarak geliştirilen yazılım sayesinde akım değerleri belirli zaman aralıklarıyla örneklenmiş, RMS hesapları yapılmış ve önceden tanımlanan eşik değerler ile karşılaştırılmıştır. Normal şartlarda panolardan geçen akım değerlerinin belirli bir denge göstermesi beklenmektedir. Eğer bu değerler arasındaki fark eşik seviyesini aşıyorsa, sistem bunu kaçak akım olasılığı olarak algılamakta ve kayıt altına almaktadır.

Sistemin enerji besleme altyapısı şebeke tabanlı olacak şekilde tasarlanmıştır. NodeMCU kartı ve bağlı sensörler için gerekli düşük gerilimli doğru akım beslemesi, 220 V AC şebeke geriliminin uygun adaptör veya anahtarlama güç kaynağı (SMPS) devresi ile 5 V DC'ye dönüştürülmesi yoluyla sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, sistemin sürekli çalışabilmesi için güvenilir ve kesintisiz enerji kaynağı sunmaktadır. Ayrıca, regüle edilmiş sabit çıkış gerilimi sayesinde ölçüm ve iletişim devrelerinin stabil çalışması garanti altına alınmıştır. Şebeke tabanlı güç kaynağı, saha koşullarında batarya değişimi veya şarj gereksinimi olmaksızın uzun süreli kullanım avantajı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen bu sistem; SCT100 akım sensörleri, yüksek çözünürlüklü ADS1115 ADC modülleri ve ESP8266 tabanlı NodeMCU mikrodenetleyicilerinin bütünleşik yapısıyla, yeraltı pano beslemelerinde meydana gelebilecek kaçak akımların güvenilir biçimde tespit edilmesine imkân tanımaktadır. Şebeke tabanlı güç kaynağının kullanılması, sistemin kesintisiz olarak uzun süre çalışmasını garanti etmekte ve bakım gereksinimini minimuma indirmektedir. Bu sayede saha koşullarında batarya değişimi veya enerji kesintilerinden kaynaklı veri kayıplarının önüne geçilmektedir. NodeMCU'nun kablosuz haberleşme kabiliyeti sayesinde ölçüm verileri gerçek zamanlı olarak merkezi sunucuya veya bulut tabanlı IoT platformlarına aktarılabilmekte, bu da sistemin uzaktan izlenmesine, verilerin sürekli kayıt altına alınmasına ve geçmişe dönük analiz yapılmasına olanak tanımaktadır.

Elde edilen ölçümler, yalnızca kaçak akımın varlığını belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda enerji tüketim davranışlarının incelenmesine, sistemdeki anormal yük değişimlerinin veya olası arıza belirtilerinin önceden saptanmasına da hizmet etmektedir. Bu özellik, bakım ve onarım çalışmalarında proaktif bir yaklaşım geliştirilmesini sağlayarak hem ekonomik hem de operasyonel faydalar sunmaktadır. Özellikle yeraltı pano uygulamalarında erişim zorluğu, çevresel faktörler (nem, sıcaklık, toz) ve güvenlik riskleri göz önünde bulundurulduğunda, bu tür temassız ve kablosuz izleme sistemleri kritik önem taşımaktadır.

Sistemin ölçeklenebilir yapısı, farklı sayıda pano veya hat için kolayca genişletilebilmesini mümkün kılmaktadır. Birden fazla NodeMCU-ADS1115 modülünün aynı ağ üzerinde haberleşmesi sayesinde, çoklu noktalarda eş zamanlı izleme yapılabilmekte ve elde edilen veriler merkezi bir kontrol biriminde birleştirilebilmektedir. Böylece, tüm dağıtım ağı genelinde bütüncül bir kaçak akım izleme ve yönetim sistemi oluşturulması mümkündür. Ayrıca kullanılan donanımların düşük maliyetli, kolay temin

edilebilir ve açık kaynaklı yazılım desteğiyle genişletilebilir olması, bu sistemin pratik uygulamalarda hızlı bir şekilde hayata geçirilebilmesini sağlamaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarla, sistemin mevcut yapısı üzerine makine öğrenmesi tabanlı anomalilik tespit algoritmaları eklenebilir, böylece yalnızca eşik değer tabanlı kaçak tespitinin ötesine geçilerek daha akıllı ve kendini uyarlayan bir yapı elde edilebilir. Aynı zamanda, mobil uygulamalar aracılığıyla operatörlerin anlık bildirim alması sağlanabilir ve endüstriyel haberleşme protokolleri (örneğin Modbus, MQTT, OPC-UA) ile entegrasyon gerçekleştirilerek endüstri 4.0 odaklı akıllı şebeke sistemlerine uyum artırılabilir.

Dolayısıyla, önerilen sistem yalnızca kaçak akım tespitine yönelik bir çözüm olmakla kalmayıp, enerji güvenliği, kayıpların önlenmesi, bakım optimizasyonu ve akıllı şebeke altyapılarına entegrasyon gibi birçok alanda uygulanabilir, ekonomik ve sürdürülebilir bir yöntem sunmaktadır.

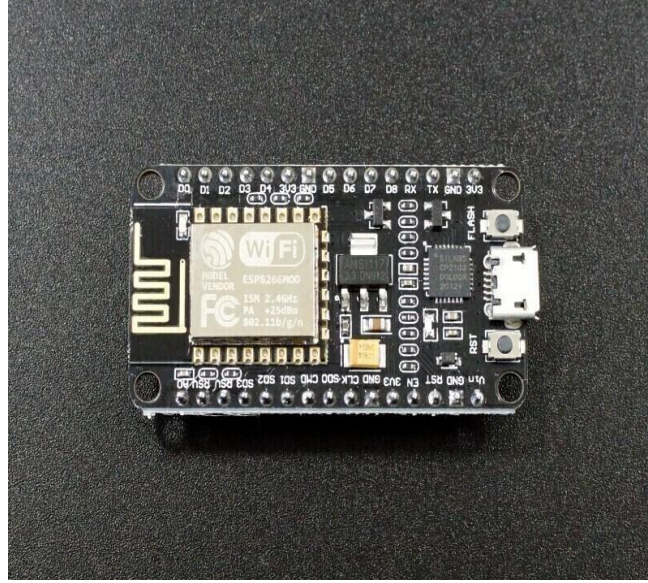
Akım Sensörü (SCT-013): Akım ölçümü için non-invaziv, bölünmüş çekirdekli akım trafosu prensibiyle çalışan SCT-013 tercih edilmiştir. Bu sensör, besleme iletkeninin etrafına kelepçe benzeri şekilde yerleştirilerek manyetik kuplaj üzerinden bir ikincil akım üretir; ikincil akım uygun bir yük (burden) direnci üzerinde gerilim düşümüne dönüştürülerek mikrodenetleyicinin ADC girişine güvenli seviyede taşınır. Böylelikle, iletkeniden geçen alternatif akımın zaman alanındaki değişimi hizmet kesintisi yaratmadan, galvanik izolasyon korunarak ve kullanıcı güvenliği sağlanarak gerilim sinyali çevrilir (Jain vd., 2025; Prasad vd., 2025). SCT-013'in seçilmesinde; 0–100 A aralığındaki alternatif akımların izlenmesinde sağladığı doğruluk, yer darlığı bulunan yeraltı pano ortamlarında hızlı/kolay montaj olanağı, bakım gereksinimini azaltan non-invaziv yapısı ve ölçüm devresini şebekeden yalıtarak hem cihazı hem de personeli koruyan çalışma prensibi etkili olmuştur. Ek olarak, sensörün lineer çalışma bölgesinde kalacak şekilde uygun yük direnci seçimi ve ADC dinamik aralığının verimli kullanımıyla kuantizasyon hatası azaltılmış; yazılımsal eşikleme, kaydırma pencereli RMS hesabı ve olay kaydı gibi yöntemlerle kaçak akımın başlangıç ve sürekliliğinin güvenilir biçimde saptanması hedeflenmiştir.



Şekil 4.2. Akım Sensörü (SCT-013)

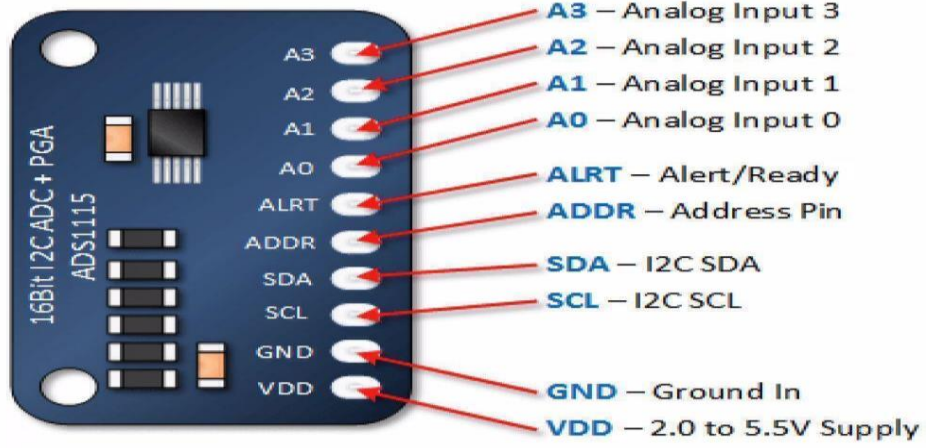
NodeMCU ESP8266 Geliştirme Kartı: Mikrodenetleyici/iletişim katmanında ESP8266 tabanlı NodeMCU geliştirme kartı tercih edilmiştir. ESP8266; gömülü 802.11 b/g/n Wi-Fi radyo, bütünleşik TCP/IP yığını ve 32-bit Tensilica L106 çekirdeği (80–160 MHz yapılandırılabilir saat) ile, ölçüm verilerinin sahadan kablosuz olarak toplanıp üst katman uygulamalara aktarılmasını ek donanıma gerek duymadan mümkün kılar. Kart düzeyinde yerleşik USB-UART dönüştürücü, 3,3 V LDO regülatör ve otomatik programlama devresi sayesinde hem yazılım güncelleme hem de sahada devreye alma süreçleri sadeleşir. ESP8266'nın ADC birimi üzerinden tek uçlu analog girişten örnekleme yapılarak sensörün (yük direnci üzerinden gerilime dönüştürülmüş) akım bilgisi sayısallaştırılır; NodeMCU üzerinde bulunan gerilim bölücü/adaptör katı, ESP8266'nın iç ADC aralığına (0–1 V) uygun ölçeklemeyi sağlar. Dijital çevre birimleri (GPIO, UART, SPI ve yazılımsal I²C), röle/sinyal rötuşu, durum LED'i ve haricî bellek gibi yardımcı devrelerle entegrasyona olanak verir. Güç yönetimi açısından derin uyku, modem-uyku ve ışık-uyku kipleri kullanılarak görev döngüsü düşük ortalama tüketimle sürdürülür; beklenmedik yazılım kilitlenmelerine karşı dahili watchdog ve kahverengi gerilim (brown-out) korumaları etkinleştirilir. Kablosuz tarafta MQTT/HTTP(S) üzerinden yayınlama, NTP ile zaman damgalama, bağlantı kopuşlarında yerel tamponlama ve yeniden deneme, gerektiğinde TLS ile uçtan uca güvenli aktarım gibi IoT tasarım kalıpları uygulanmıştır (Al-Fuqaha vd., 2015). Yazılım geliştirme sürecinde Arduino IDE ve yaygın kütüphaneler kullanılarak süratli prototipleme, birim testleri ve yerinde (OTA) güncelleme yapılmış; böylece ölçüm zincirinin uçtan uca gecikmesi, veri

bütünlüğü ve bakım/işletme kolaylığı açısından hedeflenen performans metriklerine ulaşılması amaçlanmıştır.



Şekil 4.3. NodeMCU ESP8266 Geliştirme Kartı

ADS1115 16-bit 4 Kanal ADC Modülü: NodeMCU üzerinde bulunan dahili ADC, tek kanallı ve 10-bit çözünürlüklü yapısıyla temel örnekleme gereksinimlerini karşılamakla birlikte, sınırlı dinamik aralık ve giriş aralığı (kart revizyonuna göre tipik olarak 0–1 V'a ölçeklenmiş tek uçlu giriş) nedeniyle düşük genlikli sinyallerde sayısallaştırma hatası ve doğrusal olmayan etkileri belirginleşebilmektedir. Bu durum, özellikle kaçak akım izleme gibi küçük işaret değişimlerinin kritik olduğu uygulamalarda, ADC'nin etkin çözünürlüğünü (ENOB) ve algılanabilir en küçük gerilim adımını kısıtlar. Uygulama düzeyinde, ADS1115'in 16-bit çözünürlüğü ve PGA'sı; akım trafosundan yük direnci üzerinde elde edilen küçük genlikli gerilimlerin daha yüksek duyarlılıkla sayısallaştırılmasını, düşük seviyeli kaçak akım imzalarının güvenilir biçimde ayrıştırılmasını ve kalibrasyon sonrası uzun dönem kararlılığın artırılmasını sağlar. Girişte RC anti-aliasing süzgeci, doğru referans/temel hat tasarımı, yıldız topraklama ve sensör-ADC arasında kısa, ekranlı hatlar kullanımı ile gürültü katkısı azaltılır; çok noktalı ofset/kazanç kalibrasyonu ile üretim toleransları telafi edilir. Böylece, NodeMCU'nun dahili 10-bit ADC'sine kıyasla ADS1115 modülü, hem çözünürlük hem de ölçüm zinciri bütünlüğü açısından belirgin bir performans üstünlüğü sunar (Texas Instruments, 2017).



Şekil 4.4. ADS1115 16-bit 4 Kanal ADC Modülü

4.2.1 Ölçüm prensibi ve sensör yerleşimi

Elektrik dağıtım şebekelerinde yeraltı panolarından geçen akımların giriş ve çıkış değerleri karşılaştırılarak kaçak tespiti yapılmaktadır. Bu çalışmada, her pano besleme kablosunun giriş ve çıkış uçlarına SCT-013 akım sensörleri yerleştirilmiş, böylece gerçek zamanlı akım ölçümü sağlanmıştır. Ölçülen alternatif akım, sensör çıkışında gerilim sinyaline dönüştürülür ve ADS1115 ADC modülü ile dijital formata çevrilir. Bu sayede, akımlar arasındaki fark kolaylıkla hesaplanabilir.

4.2.2 Veri toplama ve işleme

NodeMCU ESP8266 kartı, ADC'den aldığı dijital verileri işleyerek ölçüm sonuçlarını değerlendirmiştir. Yazılımda, ölçülen giriş ve çıkış akım değerleri eşzamanlı olarak okunup karşılaştırılmış, belirlenen tolerans sınırının üzerindeki farklar “kaçak” olarak tanımlanmıştır. Kaçak tespitinde kullanılan eşik değer, 0.5A olarak seçilmiş olup deneysel olarak belirlenmiş sistemin hassasiyet ve doğruluğunu optimize etmeye yöneliktir.

4.2.3 Yazılım geliştirme ve iletişim

Yazılım geliştirme süreci Arduino IDE ortamında C++ dilinde gerçekleştirilmiştir. Yazılım, aşağıdaki temel işlevleri yerine getirmiştir:

ADC'den gelen ham veri kalibrasyonu,

Akım değerlerinin amper cinsine dönüştürülmesi,
Akım farklarının hesaplanması,
Kaçak durumunda uyarı mesajı oluşturulması,
Wi-Fi üzerinden ölçüm verilerinin ve uyarı bilgilerinin gerçek zamanlı olarak görüntülenmesi.

Bu sayede, operatörler sistemde oluşan kaçakları uzaktan izleyebilmekte ve hızlı müdahale imkânı elde etmektedir.

4.2.4 Test süreci ve benzetim çalışmaları

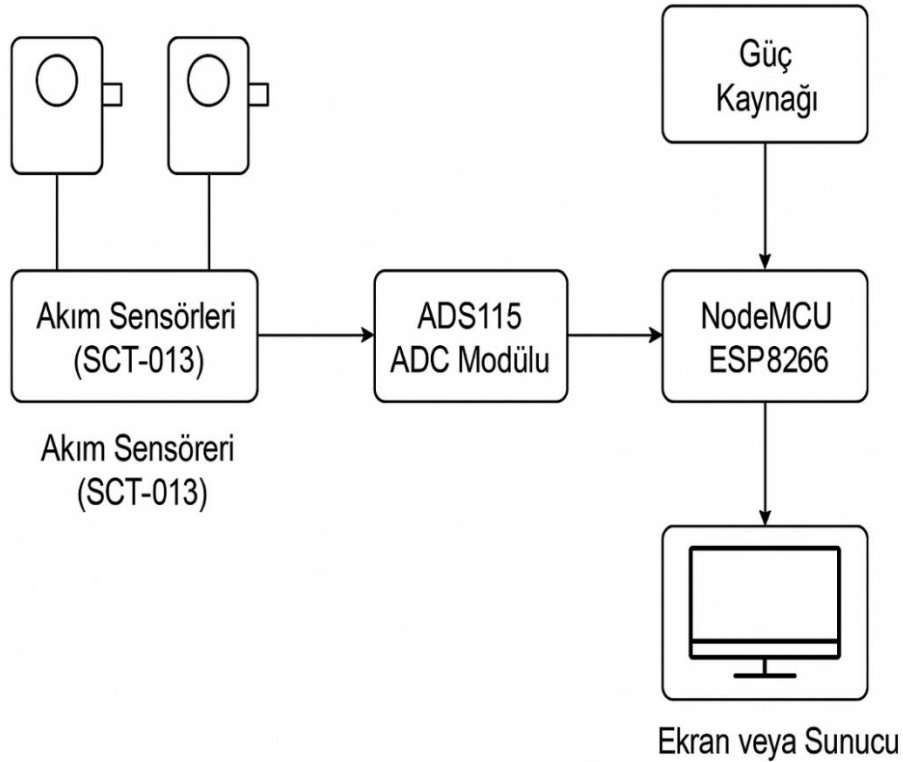
Saha uygulamasına geçilmeden önce sistemin güvenilirliğini ve doğruluğunu test etmek amacıyla C++ ortamda benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı kaçak senaryoları modellenmiş ve sistemin bu durumları algılayıp uyarı verdiği gözlemlenmiştir. Simülasyon ortamında; çeşitli giriş ve çıkış akım değerleri atanarak sistemin kaçak tespit hassasiyeti analiz edilmiştir. Çizelge 4.1’de kullanılan malzemeler ve malzemelere ait teknik özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Sistem Bileşenleri ve Teknik Özellikleri

Malzeme/Donanım	Teknik Özellikler	Görev / İşlev
Akım Sensörü SCT-013	0–100 A, split-core, $\pm 1.5\%$ doğruluk	Alternatif akım ölçümü
NodeMCU ESP8266	32-bit mikrodenetleyici, Wi-Fi modülü	Veri toplama, işleme ve iletişim
ADS1115 ADC Modülü	16-bit çözünürlük, 4 kanal giriş	Analog sinyali dijitale dönüştürme
Yazılım (Arduino C++)	Gerçek zamanlı veri işleme	Akım farkı hesaplama ve uyarı üretme

Çizelge 4.1’de geliştirilen sistemin temel bileşenleri ve bu bileşenlerin teknik özellikleri özetlenmektedir. Sistemin en önemli donanım unsurlarından biri olan SCT-013 akım sensörü, 0–100 A aralığında çalışabilen, split-core yapısına sahip ve yaklaşık $\pm 1.5\%$ doğruluk oranıyla alternatif akım ölçümü yapabilen bir sensördür. Bu sensör, elektriksel iletkenlere doğrudan temas etmeden akım ölçümü gerçekleştirmesi sayesinde hem güvenli hem de pratik bir kullanım sağlamaktadır.

Sistemin merkezi işlem birimini oluşturan NodeMCU ESP8266 modülü, 32-bit mikrodenetleyici ve entegre Wi-Fi haberleşme özelliği ile donatılmıştır. Bu yapı, ölçüm verilerinin toplanması, işlenmesi ve kablosuz olarak iletilmesine imkân tanımaktadır. Ölçülen analog sinyallerin yüksek doğrulukla dijital formata dönüştürülmesini ise ADS1115 ADC modülü gerçekleştirmektedir. 16-bit çözünürlüğe ve çoklu kanal girişine sahip olan bu modül, özellikle düşük genlikli akım sinyallerinde hassas ölçüm sağlamaktadır. Ayrıca sistemin yazılım kısmı Arduino C++ tabanlı geliştirilmiş olup, gerçek zamanlı veri işleme, akım farkı hesaplama ve belirlenen eşik değerlerinin aşılması durumunda uyarı üretme işlevlerini yerine getirmektedir. Böylelikle donanım ve yazılım bileşenleri arasında bütünleşik bir yapı kurulmuş ve güvenilir bir kaçak akım tespit mekanizması oluşturulmuştur.



Şekil 4.5. Sistem Blok Diyagramı

Şekil 4.5'te sistemin genel işleyiş şeması gösterilmektedir. Akım sensörleri (SCT-013), iletken üzerinden geçen akımı ölçerek analog sinyal üretmektedir. Bu sinyal, yüksek çözünürlüklü ölçüm için ADS1115 ADC modülü tarafından dijital veriye dönüştürülmekte ve daha sonra NodeMCU ESP8266 mikrodenetleyicisine aktarılmaktadır. NodeMCU, hem verileri işleyip hem de kablosuz iletişim imkânı sayesinde ölçüm sonuçlarını ekran

veya merkezi sunucuya iletmektedir. Sistem, güç kaynağı ile sürekli beslenerek kesintisiz çalışması sağlanmaktadır.

Akım Sensörleri (SCT-013): Giriş ve çıkış kablolarına yerleştirilmiş iki adet.

ADS1115 ADC Modülü: Analog akım sinyallerini dijital verilere çevirir.

NodeMCU ESP8266: Veri işleme, fark hesaplama, Wi-Fi ile veri gönderme.

Güç Kaynağı: Sistemi besler.

Ekran veya Sunucu: Verileri görselleştirir ve uyarı verir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1 Ölçüm Sonuçlarının Detaylı Analizi

Elektrik dağıtım sistemlerinde teknik olmayan kayıpların etkin bir şekilde tespit edilebilmesi, özellikle yoğun kent dokusu içerisinde yeraltı alçak gerilim (AG) hatlarının artmasıyla birlikte, dağıtım şirketleri açısından hayati önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen kaçak tespit sistemi, düşük maliyetli donanım bileşenleriyle yapılandırılmış olup, hem maliyet etkinliği hem de sahada uygulanabilirliği esas alınarak tasarlanmıştır.

Sistem mimarisi temel olarak üç ana bileşene dayanmaktadır: SCT-013 tipi akım transformatörleri (CT), ADS1115 analogdan sayısala dönüştürücü (ADC) modülü ve NodeMCU ESP8266 mikrodenetleyici kartı. SCT-013 sensörleri, hem doğrusal çıkış karakteristiği hem de geniş akım aralığını desteklemesi nedeniyle seçilmiş; ADS1115 ise 16-bit çözünürlükle yüksek hassasiyetli ölçüm imkânı sağlamıştır. Bu kombinasyon sayesinde, pano giriş ve çıkışlarındaki alternatif akım değerleri eşzamanlı olarak ölçülmüş ve ESP8266'nın üzerinde çalışan gömülü yazılım aracılığıyla anlık olarak analiz edilmiştir.

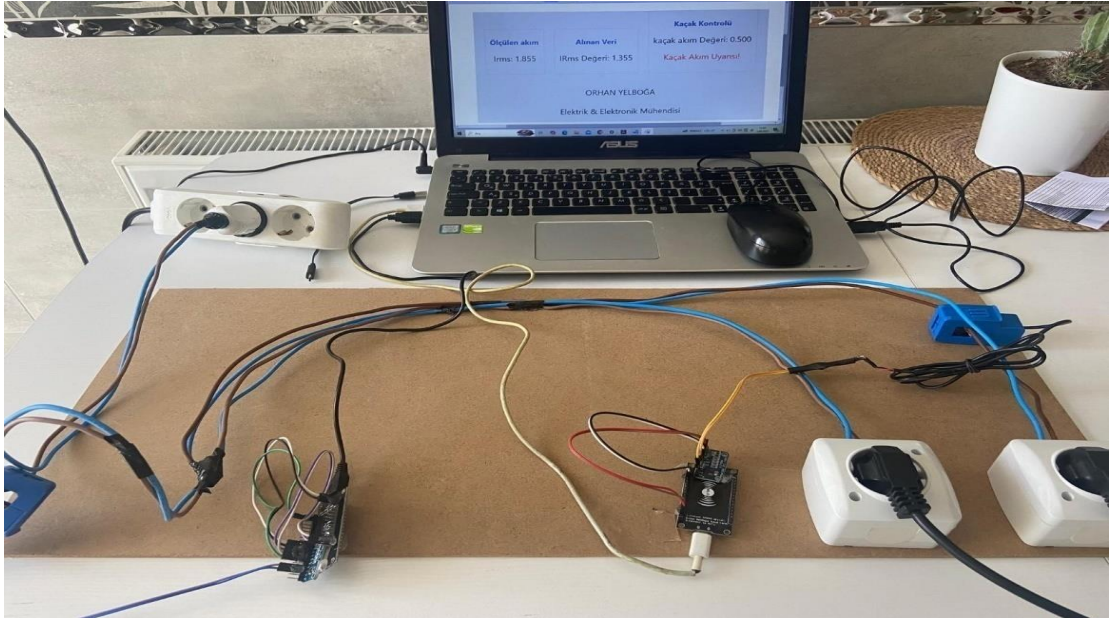
Simülasyon ortamı, kaçak senaryolarının gerçekçi koşullarda modellenebilmesi için geliştirilmiştir. Bu bağlamda; farklı yük profilleri (rezistif, endüktif, karma), dalgacık temelli harmonik bozulmalar, gürültü faktörleri, akım senkronizasyon sapmaları ve ölçüm gecikmeleri dikkate alınarak sistemin tepki karakteristiği test edilmiştir. Özellikle 50 Hz temel frekans üzerindeki ikinci ve üçüncü harmoniklerin sisteme dahil edilmesiyle, gerçek saha koşullarında karşılaşılabilecek parazit ve harmonik etkiler simüle edilmiştir.

Testlerde, giriş ve çıkış hatlarında ölçülen akım farkı %5'in üzerine çıktığında sistemin alarm üretme algoritması başarıyla devreye girmiştir. Bu fark, yalnızca anlık bir eşiğe göre değil, aynı zamanda zaman içinde kümülatif akım tutarsızlığı algoritmasıyla da doğrulanmıştır. Bu sayede kısa süreli yük değişimlerinin yanlış pozitif alarm üretmesine karşı önlem alınmıştır. Ölçüm verileri hem seri port üzerinden analiz edilmiş hem de ileride IoT tabanlı bulut entegrasyonuna uygun olacak şekilde MQTT protokolü ile dış veri kaynaklarına gönderilebilecek biçimde yapılandırılmıştır.

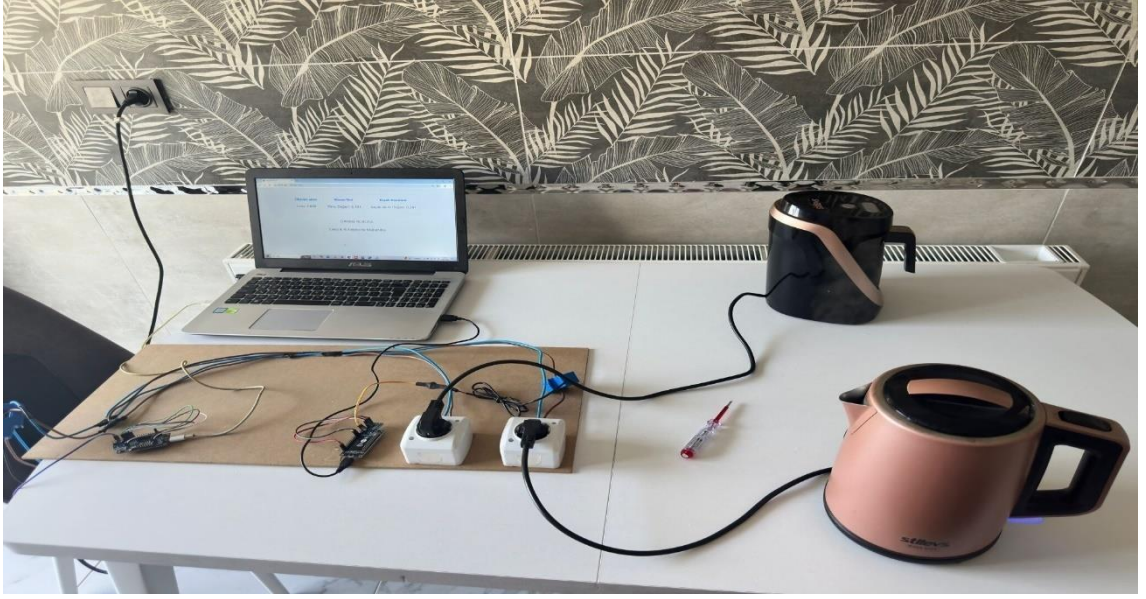
Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, sistem düşük donanım maliyetine rağmen oldukça yüksek doğrulukta kaçak tespiti gerçekleştirebilmektedir. Özellikle giriş ve çıkış hatları arasındaki senkronizasyonun korunması, kaçak senaryolarının doğrulukla ayrıştırılabilmesi açısından kritik rol oynamıştır. Ayrıca, sistemin tepkime süresi milisaniye düzeyinde olup, ani kaçak girişimlerine karşı anlık uyarı verecek potansiyele sahiptir.

Bu teknolojik yapı, yalnızca bireysel panolarda değil, aynı zamanda daha büyük dağıtım bloklarında, çoklu sensör ağı şeklinde ölçeklendirilebilir. Böylece, dağıtım şebekesinin farklı noktalarında senkron veri toplanarak merkezi bir sistem üzerinden bütüncül kaçak izleme gerçekleştirilebilir. Bu, özellikle yük dengelemesi, faz eşitsizliği analizi ve lokasyon tabanlı arıza tahmini gibi ileri düzey işlevlerin geliştirilmesi için de bir temel sunmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen bu sistem; maliyet, kurulum kolaylığı ve yazılım esnekliği bakımından hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Sistem, geleneksel kaçak tespit yöntemlerinin zorluklarını aşarak, yeraltı AG şebekelerinde teknik olmayan kayıpların izlenmesi, önlenmesi ve hukuki süreçlerde delil olarak kullanılacak verilerin toplanması açısından önemli bir katkı sunmaktadır.



Şekil 5.1. Sistem Bağlantı Şekli



Şekil 5.2. Sistem Bağlantı Şekli

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2de, projenin gerçekleştirilmesi sırasında kullanılan malzemelerin birbirleriyle olan bağlantı düzeni detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Bu şematik temsil, sistemin işleyişini anlamak, bileşenlerin doğru şekilde entegre edilmesini sağlamak ve proje boyunca meydana gelebilecek olası hataların önüne geçmek amacıyla hazırlanmıştır. Görselde, her bir donanım elemanının diğer parçalarla olan fiziksel ve elektriksel bağlantıları açıkça belirtilmiş olup, projenin elektronik tasarım aşamalarında rehberlik eden temel bir referans niteliği taşımaktadır.



Şekil 5.3. Sistem Yüksüz Hali

Şekil 5.3'te geliştirilen sistemin kullanıcı arayüzüne ait bir ekran görüntüsü yer almaktadır. Bu arayüz, ölçülen anlık akım değeri (Irms), harici bir referans cihazdan alınan IRms değeri ve bu iki veri arasındaki fark üzerinden hesaplanan kaçak akım değerini gerçek zamanlı olarak göstermektedir.

İlk kutucukta "Ölçülen Akım" başlığı altında sistemin anlık olarak tespit ettiği RMS (Root Mean Square) değeri 0.000 A olarak belirtilmiştir. Bu veri, ADS1115 analog-dijital dönüştürücü kullanılarak elde edilmiş ve sistemde herhangi bir yük bağlı olmadığını doğrulamaktadır. İkinci kutucukta "Alınan Veri", yani başka bir sistemden (örneğin pano 1 gibi bir referans ünitesinden) alınan IRms değeri yine 0.000 A olarak gösterilmiştir. Bu, hem sistemin hem de referans kaynağın aynı koşullar altında (yüksüz durumda) veri sağladığını ve aralarında tutarlılık olduğunu ortaya koymaktadır. Üçüncü kutucukta "Kaçak Kontrolü" başlığı altında kaçak akım değeri 0.000 A olarak belirtilmiştir. Bu değer, ölçülen akım ile referans akım değeri arasında hiçbir fark olmadığını, dolayısıyla sistemde herhangi bir kaçak akımın bulunmadığını göstermektedir. Sayısal olarak ifade edersek, formül şu şekildedir:

$$I_{\text{kaçak}} = I_{\text{ölçülen}} - I_{\text{referans}} = 0.0A - 0.0A = 0.00 \quad (5.1)$$

Bu sonucun, sistemin doğru şekilde çalıştığını ve herhangi bir izinsiz enerji kullanımının ya da hatalı bağlantının olmadığını gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.4. Sistem Ana Hattın Yüklü Hali

Şekil 5.4'te yer alan sistem arayüzü, gerçek zamanlı akım izleme uygulamasında ölçülen verilerin kullanıcıya sade ve anlaşılır biçimde sunulduğu bir örneği temsil etmektedir. Üç temel parametre başlığı altında sistemin gerçekleştirdiği analiz sonuçları verilmiştir: “Ölçülen Akım”, “Alınan Veri” ve “Kaçak Kontrolü”.

İlk olarak, “Ölçülen Akım” bölümünde sistem tarafından doğrudan izlenen ve ADS1115 ADC modülü aracılığıyla elde edilen RMS (Irms) değeri 5.968 A olarak gösterilmektedir. Bu değer, anlık olarak sistemden geçen elektrik akımının etkin (root mean square) büyüklüğünü temsil etmektedir. İkinci başlık olan “Alınan Veri” kısmında ise IRms değeri 6.006 A olarak gösterilmiştir. Bu veri, sistem dışı bir referans kaynaktan (örneğin bir dağıtım panosundan ya da trafo çıkışından) sağlanan akım bilgisini ifade etmektedir. Üçüncü sütunda yer alan “Kaçak Kontrolü” başlığı altında ise bu iki değer arasındaki farktan hesaplanan kaçak akım değeri 0.038 A olarak verilmiştir. Bu fark, sistemin temel çalışma prensiplerinden biri olan Kirchhoff’un Akım Yasası’na (KCL) dayanmaktadır. Bu yasa, bir elektriksel düğüme giren ve çıkan akımların toplamının eşit olması gerektiğini belirtir.

$$I_{kaçak} = I_{ölçülen} - I_{referans} = 6.006A - 5.968A = 0.038 \quad (5.2)$$

Bu sonuç, sistemde gözlemlenen akım değerlerinin tam olarak eşleşmediğini ve küçük de olsa bir farkın bulunduğunu göstermektedir. 0.038 A gibi düşük seviyeli bir kaçak değeri, birçok uygulamada tolerans sınırları içinde kabul edilebilir olsa da, hassas ölçüm ve enerji yönetimi sistemlerinde bu tür farkların dikkate alınması önemlidir. Bu nedenle, sistemin belirlenen eşik değerlere bağlı olarak uyarı üretmesi, hem enerji kayıplarının önlenmesi hem de güvenlik açısından kritik bir işlev üstlenmektedir.



Şekil 5.5. Hem ana hat hem de harici hat yüklü iken

Şekil 5.5'te verilen kullanıcı ara yüzü, kaçak akım tespit sisteminin gerçek zamanlı olarak çalışmasını ve elde edilen verilerin kullanıcıya görsel biçimde sunulmasını temsil etmektedir. Sistem, üç temel ölçüm parametresi üzerinden analiz gerçekleştirmektedir: “Ölçülen Akım”, “Alınan Veri” ve “Kaçak Kontrolü”. İlk parametre olan “Ölçülen Akım” başlığı altında, sistemin akım sensörleri (örneğin SCT-013) tarafından doğrudan ölçülen RMS (Root Mean Square) akım değeri 7.592 A olarak belirlenmiştir. Bu değer, sistemin aktif hattından geçen gerçek akım büyüklüğünü ifade etmektedir. İkinci parametre olan “Alınan Veri” kısmında ise dış bir referans kaynaktan (örneğin enerji dağıtım panosu, merkezi sayaç ya da trafo çıkışı) sağlanan akım bilgisi verilmiş olup bu değer 6.017 A olarak kaydedilmiştir. Bu iki parametre birlikte değerlendirildiğinde, sistemin kendi sensörleri ile dış referans noktasından elde edilen ölçüm sonuçları arasında belirgin bir fark gözlemlenmektedir.

Üçüncü parametre olan “Kaçak Kontrolü” sütununda ise sistemin temel işleyiş mantığını ortaya koyan kritik bilgi yer almaktadır. Burada ölçülen akım değeri ile referans veri arasındaki fark alınarak kaçak akım değeri hesaplanmakta ve bu değer 1.575 A olarak elde edilmiştir. Kirchhoff'un Akım Yasası'na göre, bir devreye giren toplam akım ile çıkan toplam akımın birbirine eşit olması gerekmektedir. Dolayısıyla, aradaki 1.575 A'lık bu fark, devrede enerji kaybı, izinsiz enerji kullanımı veya hattın izolasyonundaki zayıflıklardan kaynaklanan bir dengesizliğe işaret etmektedir. Ölçülen bu fark oldukça yüksek olup, sistemde tanımlı olan güvenlik eşik değerini aşmaktadır. Bu nedenle, kullanıcıya görsel olarak kırmızı renkli “Kaçak Akım Uyarısı!” bildirimi sunulmuştur.

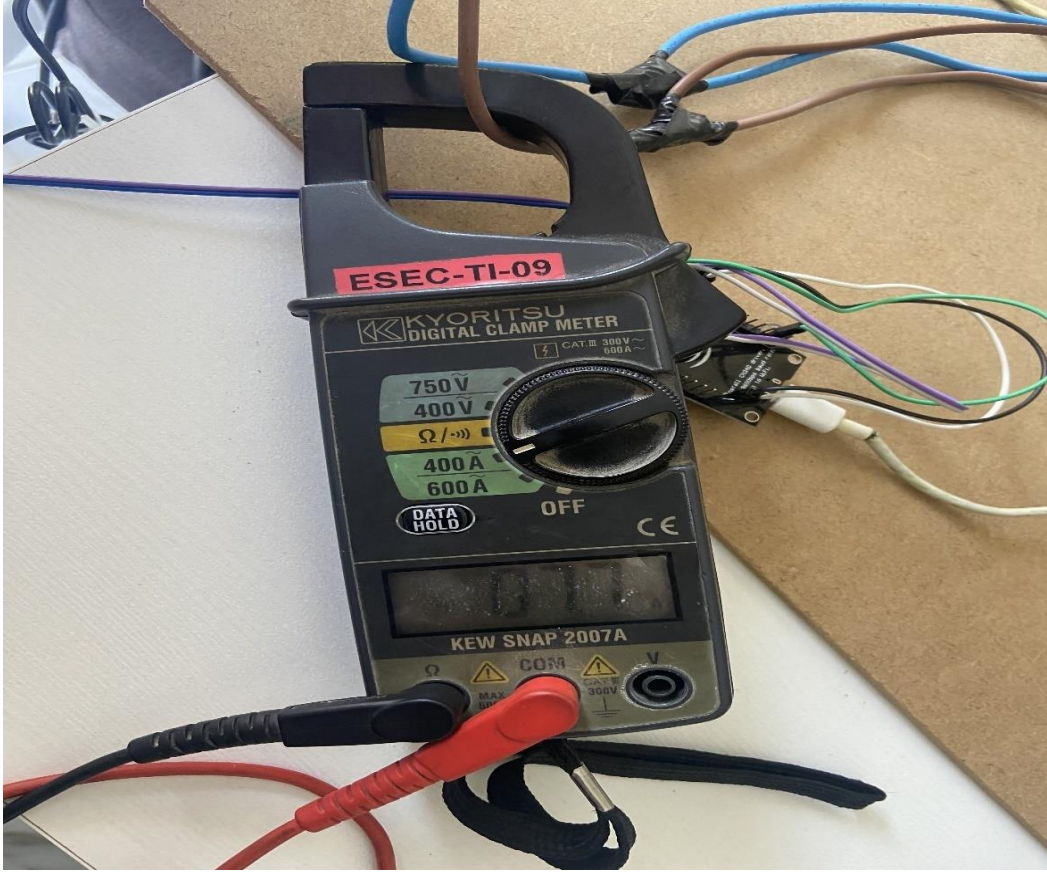
$$I_{kaçak} = I_{ölçülen} - I_{referans} = 7.592A - 6.017A = 1.575A \quad (5.3)$$

Bu durum, yalnızca teorik bir enerji kaybına değil, aynı zamanda pratikte ciddi güvenlik risklerine de işaret etmektedir. Kaçak akım değerlerinin yüksek olması, özellikle yer altı enerji iletim hatlarında veya kapalı devre dağıtım sistemlerinde yangın riski, enerji verimliliğinde azalma ve ekonomik kayıplar gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Ayrıca, bu tür farkların erken dönemde tespit edilmesi, enerji sağlayıcı kurumların usulsüz kullanım ve enerji hırsızlığı gibi durumlara hızlı müdahale etmesini mümkün kılmaktadır. Şekil 5.5'te sunulan örnek çıktı, sistemin sürekli izleme mantığıyla çalıştığını ve ölçüm yapılan noktalar arasındaki farkın döngüsel olarak hesaplandığını göstermektedir. Böylelikle kullanıcılar, web ara yüzü üzerinden gerçek zamanlı verileri takip edebilmekte, sistem ise eşik değerlerini aştığında otomatik olarak uyarı üreterek gerekli aksiyonların alınmasına katkı sağlamaktadır.

Çizelge 5.1. Sistemi şebekeye bağlantı sonucu oluşan eşik değer tablosu

BÖLÜM	VERİ BAŞLIĞI	DEĞER	AÇIKLAMA
ÖLÇÜLEN AKIM	irms	7.592 A	ADS1115 üzerinden anlık olarak ölçülen akım değeri
ALINAN VERİ	IRms Değeri	6.017 A	Diğer Cihazdan (örneğin pano 1) alınan referans akım değeri
KAÇAK KONTROLÜ	Kaçak Akım Değeri	1.575 A	Ölçülen ve alınan veri arasındaki fark
UYARI DURUMU	Gerçek zamanlı veri işleme	KAÇAK AKIM UYARISI!	Eşik değeri (0.5A) aşıldığı için sistem uyarı veriyor

5.2 Sistemin Manuel Ölçümü



Şekil 5.6. Sistemde çekilen toplam akım

Şekil 5.6 'da Sistem devreye alındığında, hem harici hatta hem de ana hatta bağlı yüklerin aktif olarak çalıştığı gözlemlenmiştir. Sistemin toplam akım değerinin belirlenebilmesi için harici ölçüm cihazı olarak pensampermetre kullanılmış ve yapılan ölçüm sonucunda toplam yük akımı 7,7 A olarak tespit edilmiştir. Bu ölçüm, sistemin gerçek çalışma koşulları altında sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için kritik önem taşımaktadır.

Elde edilen bu değer, akım sensörleri (SCT-013) üzerinden alınacak ölçümlerle karşılaştırılarak sistemin doğruluk ve güvenilirlik düzeyi analiz edilecektir. Böylece, sensörlerin ölçüm hassasiyeti, kaçak akım tespitindeki performansı ve olası hata payları değerlendirilerek sistemin güvenilirliği ortaya konulacaktır. Ayrıca bu doğrulama, ilerleyen aşamalarda sistemin saha uygulamalarında güvenle kullanılabilmesi için gerekli olan temel teknik referansı sağlamaktadır.



Şekil 5.7. Hat sonu ölçülen değer

Sistemin hat sonundaki akım değeri ayrıca ölçülmüş ve yapılan ölçüm sonucunda yük akımının 5,9 A olduğu belirlenmiştir. Bu değer, hattın son noktasında taşınan akım miktarını göstermekte olup, sistem içerisindeki enerji akışının izlenmesi açısından önemli bir referans oluşturmaktadır. Ölçümün gerçekleştirilmesi, yük dağılımının ve hat boyunca meydana gelebilecek olası kayıpların belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Elde edilen bu sonuç, giriş hattında tespit edilen 7,7 A'lık toplam yük akımı ile karşılaştırıldığında sistemin farklı noktalarındaki akım davranışlarının analiz edilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle hat başı ve hat sonu arasındaki değerlerin incelenmesi, kaçak akım olasılığının veya beklenmeyen yük değişimlerinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Böylece sistemin güvenilirliği ve ölçüm doğruluğu daha kapsamlı bir şekilde ortaya konulmaktadır.



Şekil 5.8. Hat harici çekilen hat üzerindeki ölçüm

Harici hat üzerinde yapılan ölçüm sonucunda, yük akımının 2,1 A olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, sisteme bağlı ek hatların taşıdığı akımı göstermesi açısından önem arz etmektedir. Özellikle dağıtım noktaları veya pano içerisindeki farklı kolların akım değerlerinin ayrı ayrı ölçülmesi, yük dağılımının daha net bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Böylelikle sistemdeki enerji akışının yalnızca ana hat üzerinden değil, harici hatlar üzerinden de detaylı olarak değerlendirilmesi mümkün hale gelmektedir.

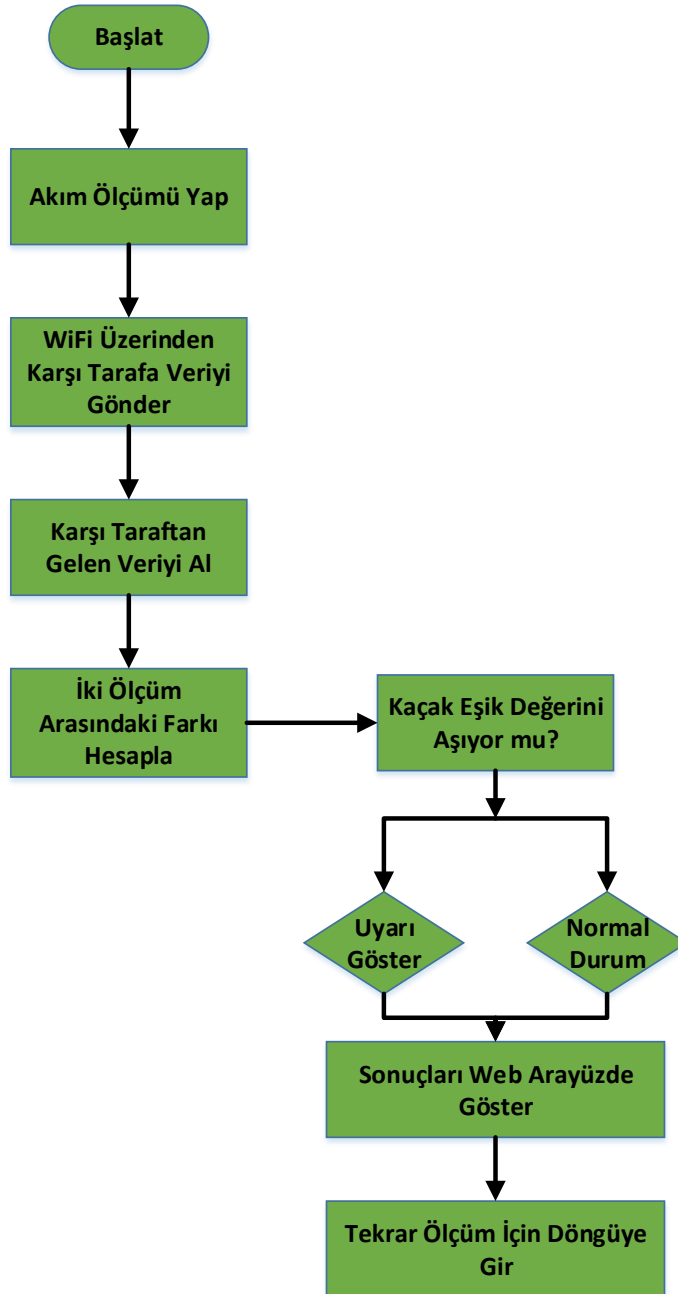
Elde edilen bu ölçüm, sistemin genel davranışının anlaşılmasına katkı sağlamakta ve toplam yük ile karşılaştırıldığında yüklerin nasıl dağıldığını ortaya koymaktadır. Harici hattın 2,1 A değerinde akım taşıması, sistemin farklı noktalarındaki akım karakteristiklerinin gözlenmesi bakımından kritik bir veridir. Bu yaklaşım, ilerleyen aşamalarda hem kaçak akım tespiti hem de yük dengelemesi çalışmalarına doğrudan katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen akım izleme ve kaçak tespit sistemi hem gerçek zamanlı veri takibi hem de saha uygulamalarındaki ölçüm doğruluğu açısından kapsamlı bir performans sunmaktadır. Sistem, ölçülen akım, harici referans verisi ve bu iki değer arasındaki fark üzerinden kaçak akımı hesaplayarak güvenlik eşiklerini aşan durumlarda otomatik uyarı üretebilmekte; küçük farkların tolerans sınırları içinde kalması durumunda ise sistemin hassasiyet ve enerji yönetimi kapasitesi doğrulanmaktadır. Ayrıca, farklı noktalar üzerinde yapılan ölçümlerle (giriş hattı, hat sonu, harici hatlar) sistemin yük dağılımı ve enerji akışındaki olası kayıplar detaylı şekilde analiz edilebilmekte, böylece sensör doğruluğu, kaçak akım tespit performansı ve güvenilirliği teknik olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, Kirchhoff'un Akım Yasası temelinde enerji dengesizliklerini belirlemeye ve sistemde potansiyel riskleri önceden tespit ederek güvenlik ve enerji verimliliğini artırmaya olanak tanımaktadır.

Şekil 5.9'daki sistemin akış diagramı, başlatma komutuyla devreye girer ve gerçek zamanlı elektriksel verilerin izlenmesini amaçlayan bir kontrol algoritması ile başlamaktadır. İlk adımda, akım ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem, yük üzerinden geçen anlık akımın ölçülmesiyle sağlanır ve genellikle RMS (Root Mean Square) cinsinden ifade edilen değerler üzerinden değerlendirme yapılır. Ölçümün alınmasında ADC (Analog-Dijital Çevirici) destekli sensör modülleri, örneğin STC-013 veya ADS1115 gibi yüksek hassasiyetli sistem bileşenleri kullanılabilir.

İkinci aşamada, ölçülen akım değeri, kablosuz iletişim (WiFi) teknolojisi kullanılarak karşı tarafta bulunan bir referans sistemine gönderilir. Bu iletim süreci, IoT tabanlı sistemlerde sıklıkla tercih edilen ESP8266 gibi mikrodenetleyiciler vasıtasıyla gerçekleştirilir. Karşı tarafta bulunan cihazdan alınan referans veri, sistemin üçüncü aşamasında değerlendirilir. Böylece, hem yerel ölçüm verisi hem de referans cihazdan gelen veri sisteme entegre edilir. Bir sonraki adımda, sistem bu iki ölçüm arasında aritmetik farkı hesaplar. Bu fark, sistemin kaçak akımı tespit etmesine olanak sağlayan temel veridir. Fiziksel anlamda, bir elektrik devresine giren akım ile çıkan akımın eşit olması beklenir (Kirchhoff'un Akım Yasası). Dolayısıyla, iki ölçüm arasındaki fark sıfıra yakın olmalı; belirlenen eşik değeri (örneğin 0.5 A) aşması durumunda bu durum potansiyel bir kaçak akım göstergesi olarak kabul edilmelidir. Sistemin karar verme mekanizması bu noktada devreye girer. Eğer hesaplanan fark, belirlenen eşik değerini aşıyorsa, sistem bu durumu "uyarı" olarak sınıflandırır ve kullanıcıya bir bildirim sağlar. Aksi takdirde, durum "normal" olarak kabul edilerek kayıt altına alınır. Her iki senaryoda da elde edilen sonuçlar, web tabanlı kullanıcı ara yüzü üzerinden görsel olarak kullanıcıya

sunulur. Bu kullanıcı ara yüzü, sistemin şeffaf ve anlık izlenmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir ve kullanıcı deneyimini destekleyici görsel öğeler içerebilir. Son adımda sistem, bu ölçüm döngüsünü tamamlayarak bir sonraki ölçüm için tekrar başa döner ve aynı süreç çevrimsel olarak devam eder. Bu yapı, sürekli izleme (real-time monitoring) prensibine dayalı çalıştığından, endüstriyel uygulamalarda, enerji yönetimi sistemlerinde ve bina otomasyon teknolojilerinde etkin şekilde kullanılabilir.



Şekil 5.9. Sistemin Akış Diagramı

Bu tür sistem tasarımı, enerji verimliliği ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle kaçak akımın tespiti, hem yangın risklerinin azaltılması hem de elektriksel arızaların önlenmesi amacıyla büyük katkı sunmaktadır. Literatürde benzer yapılar, “current leakage detection system,” “smart metering applications” ve “IoT-based energy monitoring” başlıkları altında detaylandırılmıştır.

Şekil 5.6’daki bu akış şeması, algoritmanın mantıksal yapısını sade ve açık bir şekilde görselleştirerek, uygulanan sistem mimarisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. İlgili diyagram, akademik veya endüstriyel raporlamalarda teknik şematik gösterim olarak kullanılabilir.

5.3 Sistem Performansının Değerlendirilmesi

Elektrik enerjisinin güvenli, sürekli ve verimli biçimde iletilmesi, çağdaş toplumların sürdürülebilir kalkınması açısından temel bir gerekliliktir. Bu bağlamda, dağıtım şebekelerinde meydana gelen teknik olmayan kayıpların, özellikle de yeraltı ve havai alçak gerilim hatlarında gerçekleşen kaçak bağlantıların, erken ve doğru şekilde tespit edilmesi; hem şebekenin işletme güvenliği hem de ekonomik verimlilik açısından kritik öneme sahiptir (Kundur, 1994). Geleneksel yöntemler, çoğunlukla insan gücüne dayalı fiziksel denetimler, saha taramaları veya manuel sayaç karşılaştırmalarına bağlıdır. Ancak bu yöntemlerin hem maliyeti yüksektir hem de zaman açısından yetersiz kalabilmektedir. Özellikle yeraltı altyapılarında kaçak hatların tespiti, kazı ve arıza tarama işlemleri gerektirdiğinden oldukça zahmetli ve maliyetlidir.

Bu çalışmada geliştirilen sensör tabanlı sistem, doğrudan hatlara müdahale gerektirmeden, sadece pano giriş ve çıkış noktalarındaki akım farklarını izleyerek kaçakları saptayabilen düşük maliyetli ve entegre bir çözüm sunmaktadır. Kullanılan donanım bileşenlerinin erişilebilir ve ekonomik olması, bu sistemin geniş ölçekli dağıtım bölgelerinde yaygın şekilde uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle SCT-013 akım transformatörleri, hem galvanik izolasyon sağlaması hem de 100A’e kadar olan akımları doğrusal çıkış sinyallerine dönüştürebilmesi sayesinde sistemin ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu sensörlerin manyetik çekirdek yapısı, şebekede meydana gelen ani akım değişimlerine karşı hızlı yanıt verebilecek kapasitededir.

Bununla birlikte, ADS1115 analogdan sayısala dönüştürücü modülü, 16-bit çözünürlüğe sahip olması sayesinde yüksek hassasiyetli ölçümler yapılmasına olanak

tanınmaktadır. Bu modül, çok düşük akım farklarını bile algılayabilecek düzeyde sinyal çözümlemesi gerçekleştirebilirken, aynı zamanda dört kanallı yapısıyla sistemin çoklu noktadan veri toplamasını da mümkün kılmaktadır. Bu durum, özellikle çok fazlı sistemlerde veya dağıtım panolarında faz başına ayrı ayrı izleme gereksinimi olan uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır.

NodeMCU ESP8266 mikrodenetleyici ise sistemin beyni olarak işlev görmekte, analog akım verilerini dijital ortamda işleyerek belirli eşik değerlerin üzerine çıkan farkları analiz etmekte ve gerektiğinde uyarı üretmektedir. Bu mikrodenetleyici, düşük enerji tüketimi ve Wi-Fi destekli yapısıyla veri iletimini bulut tabanlı sistemlere entegre etme potansiyeli sunmaktadır. Bu özellik, şehir şebekelerinde veya endüstriyel alanlarda uzaktan izleme ve gerçek zamanlı denetim için hayati bir altyapı sağlamaktadır (Al-Fuqaha et al., 2015). Ayrıca sistemin MQTT protokolü veya HTTP tabanlı API'lerle haberleşmesi sağlanarak merkezi sunucularla senkron veri paylaşımı da mümkün kılınmıştır.

Ancak, sistemin performansı çeşitli çevresel ve uygulama temelli faktörlerden etkilenebilir. Özellikle elektromanyetik alanlardan kaynaklanan parazitler, sensör çıkışlarında gürültüye sebep olabilir. Şebekenin bulunduğu fiziksel ortamda yer alan endüktif yükler, yüksek güçlü motorlar ya da harmonik bozucu kaynaklar, sinyal bütünlüğünü etkileyebilir. Bunun yanında, sıcaklık değişimleri sensörlerin ölçüm doğruluğunu zamanla değiştirebilirken; zayıf topraklama koşulları ya da kablo kılıflarındaki standart dışı özellikler ölçüm hatasına yol açabilmektedir (Zhang et al., 2018). Bu nedenlerle, sistemin sahada uygulanması aşamasında detaylı bir kalibrasyon süreci yürütülmeli ve özellikle sinyal işleme algoritmalarında yüksek frekanslı filtreleme teknikleri (ör. Butterworth ya da Kalman filtreleri) kullanılmalıdır.

Ayrıca sistemin uzun süreli kullanımda güvenilirliğini koruyabilmesi için önleyici bakım prosedürleri de tanımlanmalıdır. Sensörlerin ve bağlantı noktalarının periyodik olarak kontrol edilmesi, bağlantı gevşemeleri ya da fiziksel deformasyonların önlenmesi, veri iletim modülünün ağ bağlantı stabilitesinin izlenmesi gibi bakım faaliyetleri sistemin kesintisiz çalışmasını garanti altına alacaktır. Ölçüm hassasiyetinin zamanla bozulmaması için otomatik yeniden kalibrasyon yazılımı da önerilmektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen bu sistem; yeraltı ve havai AG şebekelerinde teknik olmayan kayıpların tespiti açısından hem düşük maliyetli hem de yüksek doğrulukla çalışan yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Yalnızca saha operasyonlarında maliyet ve zaman tasarrufu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda şebeke izleme süreçlerini

dijitalleştirerek, enerji verimliliğinin artırılmasına ve enerji güvenliğinin sağlanmasına katkı sağlamaktadır. Sistem; gelişen IoT altyapılarıyla birlikte daha da ölçeklenebilir hale getirilerek, akıllı şehir uygulamalarında aktif bir unsur olarak değerlendirilebilir.

5.4 Sistem ve Literatür Karşılaştırması

Elektrik dağıtım sistemlerinde kaçak enerji tespiti, enerji sektörünün karşı karşıya olduğu en önemli teknik ve ekonomik sorunlardan biridir. Literatürde bu alana yönelik yapılan çalışmalar, çözüm yaklaşımlarının hem teknolojik kapasite hem de uygulama maliyetleri açısından çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, bazı araştırmalarda kaçakları tespit etmek için gelişmiş ölçüm altyapıları (Advanced Metering Infrastructure - AMI), dağıtık sensör ağları, optik akım transformatörleri ya da geniş alan izleme sistemleri (Wide Area Monitoring Systems - WAMS) gibi yüksek maliyetli ve karmaşık yapılar önerilmektedir. Bu tür sistemler, yüksek hassasiyet sağlamakla birlikte kurulum, bakım ve işletme maliyetleri açısından özellikle gelişmekte olan ülkelerde uygulanabilirlik açısından çeşitli sınırlılıklar barındırmaktadır (AYHANCI ve YAŞAR, 2025).

Diğer taraftan, son yıllarda artan dijitalleşme ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin gelişimi ile birlikte daha düşük maliyetli ve modüler çözümler ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu bağlamda, özellikle mikrodenetleyici tabanlı, yerel veri işleme yeteneğine sahip ve uzaktan erişim özellikleri olan sistemlerin geliştirilmesi, kaçak tespiti alanında yeni bir paradigma sunmaktadır. Literatürdeki IoT tabanlı yaklaşımlar, genellikle sensör ağları ile akım-gerilim izleme, veri analitiği ve kablosuz iletişim teknolojilerini bir araya getirerek, dağıtım şebekelerinin dijital dönüşümüne katkı sağlamaktadır. Ancak bu sistemlerin çoğu ya teorik düzeyde kalmakta ya da gerçek zamanlı uygulamalar için ölçeklenebilirlik ve güvenilirlik konusunda çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen sistem, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak maliyet etkinliği ve uygulama basitliğini, yüksek doğrulukla kaçak tespiti ile birleştiren bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Sistem, yalnızca birkaç dolar seviyesindeki bileşenlerden (SCT-013, ADS1115, ESP8266) oluşmakta ve pano seviyesinde kolayca uygulanabilir bir yapıdadır. Akım farkı analizi ile çalışan model, özellikle dağıtım trafoları sonrası AG çıkışlarında veya bina giriş panolarında uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Geliştirilen çözümün bir diğer önemli katkısı, gerçek

zamanlı veri iletimi sayesinde şebeke izleme süreçlerini otomasyona taşıyarak, saha operasyonlarının yükünü önemli ölçüde azaltmasıdır. Böylece, özellikle geniş coğrafi alanlara yayılmış şebekelerde, manuel kontrol ihtiyacı minimize edilmekte ve enerji verimliliği artırılmaktadır.

Ancak bu sistemin bazı sınırlılıkları da mevcuttur. Öncelikle, yalnızca akım farkı analizine dayalı olması, bazı koşullarda hatalı pozitif (false positive) veya hatalı negatif (false negative) sonuçlara yol açabilmektedir. Örneğin, bir fazda geçici dengesizlik ya da kısa süreli yük değişimi sistem tarafından kaçak olarak algılanabilir. Benzer şekilde, eş zamanlı giriş ve çıkış noktalarında çekilen simetrik kaçak akımlar, sistemin tespit kapasitesini aşabilir. Bu durum, kaçak analizinin yalnızca donanımsal değil, yazılımsal olarak da desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, literatürde önerilen makine öğrenimi ve istatistiksel anomali tespiti algoritmalarının sisteme entegre edilmesi, yanlış alarm oranlarını azaltabilir ve tespit doğruluğunu önemli ölçüde artırabilir.

Ayrıca, sistemin yalnızca belirli gerilim ve akım seviyelerinde test edilmiş olması, farklı şebeke topolojileri ve gerilim düzeylerinde performansının yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle karmaşık AG şebekeleri, çok fazlı dağıtım yapıları ve sanayi bölgeleri gibi yük profiline değişken olduğu alanlarda, sistemin davranışı farklılaşabilir. Gelecekteki çalışmalar, bu sistemin farklı yük senaryoları, çevresel koşullar ve enerji kalitesi bozulmaları altında nasıl performans gösterdiğini inceleyerek, daha geniş kapsamlı bir doğrulama sağlayabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile geliştirilen sensör tabanlı kaçak tespit sistemi, literatürdeki mevcut yöntemlerle kıyaslandığında; düşük maliyet, kolay entegrasyon, gerçek zamanlı izleme ve otomatik alarm üretme özellikleri sayesinde pratik uygulamalar açısından önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Bununla birlikte, sistemin daha ileri düzey algoritmalar ve veri analitiği yaklaşımlarıyla entegre edilmesi, hem doğruluğunu artıracak hem de dinamik şebeke koşullarına adaptasyonunu mümkün kılacaktır. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki güncel eğilimlerle uyumlu olmakla birlikte, uygulama odaklı yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

5.5 Dicle Elektrik Batman Bölgesi Yaklaşık 1.5 Yıllık Yeraltı Ag Hatlarındaki Kayıp Kaçak Bedeli

Elektrik enerjisi, modern yaşamın vazgeçilmez bir bileşeni haline gelirken, bu kaynağın adil ve sürdürülebilir dağıtımını da giderek önem kazanmaktadır. Ancak elektrik

dağıtım sistemlerinde karşılaşılan teknik olmayan kayıplar, özellikle kaçak elektrik kullanımı, yalnızca ekonomik açıdan değil, sosyal, teknik ve hatta hukuki boyutlarıyla da ciddi sonuçlar doğurmaktadır. 3 Mart 2024 ile 30 Temmuz 2025 tarihleri arasında yapılan saha ölçümleri ve analizler, şehir şebekesi üzerinde yeraltından çekilen hatlarda toplam 6210 amper düzeyinde kaçak elektrik kullanımının gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu kayıp, 220V'luk sistemde yaklaşık:

$$P = V.I = 220 \times 6210 = 1366200W = 1366,2kW \quad (5.4)$$

gibi ciddi bir güce karşılık gelmektedir. Bu güç kesintisiz olarak çekildiğinde:

$$E_{günlük} = 1366.2 \times 24 = 32788.8 \frac{kWh}{gün}$$

$$E_{aylık} = 32788.8 \times 30 = 983664 kWh$$

ortaya çıkmakta ve birim fiyatı 2,59 TL/kWh olarak ele alındığında:

$$Aylık Maliyet = 983664 \times 1,75 = 2547689,76 TL$$

$$Yıllık Maliyet = 2547689,76 \times 12 = 30572277,1 TL$$

şeklinde yüksek bir ekonomik kayıp oluşmaktadır.

5.5.1 Elektrik dağıtım şirketlerinin müdahale yöntemleri ve riskler

Elektrik dağıtım şirketleri, bu denli büyük kaçakları engellemek adına çeşitli müdahale yöntemlerine başvurmaktadır. Bunlar arasında:

1. Fiziksel saha denetimleri
2. Anlık sayaç kontrolleri
3. Akım sensörlü uzaktan izleme sistemleri
4. Trafo çıkış-gerilim analizleri
5. Hat üzerine ters yönden yüksek gerilim (reverse surge voltage) uygulaması gibi uygulamalar yer almaktadır.

Bu yöntemlerden özellikle ters yönden yüksek gerilim uygulanması, kaçak bağlantı yapan kullanıcıların hat üzerinden beslenmesini engellemek amacıyla

kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem oldukça riskli olup, sistemde bağılı bulunan resmî abonelere ait elektronik cihazlarda (televizyonlar, buzdolapları, modemler, kombiler, inverter klimalar, bilgisayarlar vb.) ani voltaj artışına bağılı olarak arızalara neden olmaktadır. Bu durum, sadece maddi kayıplara değıl; aynı zamanda şirket imajının zedelenmesine, tüketici memnuniyetinin düşmesine ve hukuki davalara da yol açabilmektedir.

5.5.2 İş gücü ve müdahale maliyetleri

Manuel denetim ve müdahalelerde şirket, saha ekiplerinin organize edilmesi, araç yönlendirilmesi, görevli personelin vardiya planlaması gibi unsurlar açısından iş gücü ve zaman kaybına uğramaktadır. Ortalama bir kaçak denetim operasyonu için:

- En az 2 kişilik saha ekibi,
- 1 araç ve yakıt masrafı,
- Ortalama 2–3 saatlik çalışma süresi,
- Bürokratik süreçler (raporlama, fotoğraflama, sayaç mühürleme),
- Güvenlik riski (özellikle kırsal alanlarda karşılaşılan fiziksel direnç)

gibi unsurlar söz konusudur. Bu süreçte çalışanların psikolojik baskıya maruz kalmaları, görevlerini sürdürülebilirlik ilkesinden uzak şekilde yapmalarına neden olmakta; bu da sistem genelinde verimliliğı olumsuz etkilemektedir. Ayrıca şirketlerin, ters voltaj uygulaması sonucu oluşan hasarların onarımı veya tazmini için yapılan harcamalar (cihaz tamiri, kullanıcı şikâyetleri, bilirkişi talepleri) yıllık bazda ciddi bir ek maliyet oluşturmaktadır.

5.5.3 Geliştirilen prototipin alternatif değıer önerisi

Bu çalışma kapsamında geliştirilen prototip cihaz, yukarıda açıklanan zararları önlemeye yönelik olarak tasarlanmıştır. Cihaz, hattaki akım değıerlerini sürekli olarak izlemekte, referans dışı sapmalarda otomatik olarak uyarı üretmekte ve merkez sisteme veri göndermektedir. Bu sayede:

- Kaçak kullanım anlık olarak tespit edilebilmekte,
- Ters akım uygulamasına gerek kalmadan hızlı müdahale sağlanmakta,
- Sahaya ekip göndermeden önce ön tanı yapılmakta,
- Gereksiz saha ziyaretleri ve maddi-manevi kayıplar önlenmektedir.

Bu prototip, mevcutta yalnızca tek fazlı (220V) sistemlerde çalışacak şekilde tasarlanmış olmakla birlikte; geliştirilmeye açık bir yapıya sahiptir. Sistem altyapısına yapılacak donanımsal güncellemelerle birlikte trifaze (380V) sistemlerdeki fazlar arası kaçaklar, simetri bozuklukları ve nötr-toprak arası akım sapmaları da izlenebilir hale gelecektir. Böylece sadece konut tipi tüketiciler değil; sanayi tipi, yüksek güçlü yük çeken aboneler de denetim altına alınabilecektir.

Sonuç olarak geliştirilen bu prototipin kullanımı ile kaçak elektrikle mücadelede reaktif değil proaktif bir yaklaşım benimsenmektedir. Geleneksel yöntemlerin aksine, cihazın sunduğu otomatik izleme, anlık uyarı ve hızlı veri aktarımı özellikleri sayesinde dağıtım şirketi; hem ekipman koruması, hem de maliyet kontrolü açısından önemli avantajlar elde etmektedir. En önemlisi, ters voltaj gibi riskli yöntemlerin kullanımına gerek kalmamakta; böylece hem tüketici hakları, hem de dağıtım şirketinin kurumsal güvenilirliği korunmaktadır.

5.6 Gelecek çalışmalar için öneriler ve geliştirme alanları

Bu çalışmada geliştirilen akım sensörü tabanlı kaçak tespit sistemi, düşük maliyetli ve uygulanabilir bir çözüm sunmasına rağmen, sistemin saha uygulamalarında daha yaygın, hassas ve entegre biçimde kullanılabilmesi için çok yönlü geliştirme çalışmaları gerekmektedir. Özellikle karmaşık şebeke yapılarında, farklı çevresel koşullarda ve büyük ölçekli uygulamalarda sistemin verimli çalışabilmesi; donanım, yazılım, iletişim altyapısı ve güvenlik açısından kapsamlı iyileştirmeleri zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yapılması gereken araştırmalar aşağıdaki alt başlıklar çerçevesinde detaylandırılabilir:

5.6.1 Saha koşullarında gerçek uygulama ve kalibrasyon çalışmaları

Laboratuvar ortamında başarılı sonuçlar veren bir sistemin saha koşullarında aynı doğrulukla çalışabilmesi, çeşitli dışsal faktörlerin etkisinin analiz edilmesini gerektirir. Gerçek saha uygulamalarında; elektromanyetik parazit (EMI), sıcaklık ve nem değişimleri, kablo yapısındaki farklılıklar, bağlantı noktalarındaki direnç değişimleri gibi faktörler ölçüm doğruluğunu doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle sistemin farklı iklim kuşaklarında, hem yeraltı hem de havai hatlarda uzun süreli saha testlerine tabi tutulması önerilmektedir.

Ayrıca sistemin kalibrasyon protokolleri geliştirilmelidir. Sensörlerin sıcaklık kompanzasyonu, sıfır sapma düzeltmesi ve ortam koşullarına göre dinamik eşik değer güncellemeleri gibi işlevler otomatikleştirilerek daha güvenilir bir sistem elde edilebilir. Bu noktada, adaptif kalibrasyon tekniklerinin (örneğin fuzzy logic tabanlı uyarlamalı eşik belirleme) uygulanması özellikle değerlidir.

5.6.2 Gelişmiş algoritmaların entegrasyonu ve yapay zeka tabanlı modeller

Mevcut sistem yalnızca akım giriş-çıkış farkına dayanarak kaçak tespiti yapmaktadır. Ancak gerçek dünyada bazı kaçaklar çok küçük farklar oluşturabilir veya sistemin gürültü seviyesi nedeniyle gözden kaçabilir. Bu nedenle, ileri düzey veri işleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle zaman serisi analizi, sinyal ayrıştırma, anomali tespiti ve öğrenen sistemlerin entegrasyonu ile tespit doğruluğu artırılabilir.

Makine öğrenimi algoritmaları (örneğin Random Forest, SVM, XGBoost) ve derin öğrenme yaklaşımları (CNN, LSTM, GRU gibi zaman serisi işleyebilen ağlar), sisteme kaçak ile normal yük değişimi arasındaki farkları öğrenme ve genelleme yeteneği kazandırabilir. Bu sistemler aynı zamanda normal dışı durumları (anomali) önceden tahmin edebilir, böylece arızaların proaktif biçimde önüne geçilebilir. Yapay zekâ destekli karar destek sistemlerinin kullanımı ile operatör müdahalesi minimize edilerek otomasyon düzeyi artırılabilir.

5.6.3 Çoklu sensör entegrasyonu ve veri füzyonu

Kaçakların sadece akım farkı üzerinden tespiti, sistemin sınırlı görüş açısına sahip olmasına neden olabilir. Bu nedenle sisteme farklı türde sensörlerin (gerilim, sıcaklık, nem, titreşim, güç faktörü, harmonik sensörleri vb.) entegrasyonu önerilmektedir. Çoklu sensör entegrasyonu ile hem kaçakların neden olduğu dolaylı etkiler izlenebilir hem de arıza türleri daha doğru şekilde sınıflandırılabilir.

Farklı sensör kaynaklarından gelen verilerin füzyonu (veri birleştirme) ile sistemin genel karar doğruluğu artırılabilir. Bu amaçla, veri füzyon algoritmaları (örneğin Dempster-Shafer teorisi, Bayes çıkarımı, Ensemble learning yaklaşımları) kullanılabilir. Böylece, tek bir veriye bağımlı kalmadan çok katmanlı bir tespit sistemi kurulabilir.

5.6.4 Enerji kalitesi izleme kapasitesinin geliştirilmesi

Geliştirilen sistem şu an için yalnızca kaçak tespitine odaklanmaktadır; ancak dağıtım sistemlerinde enerjinin kalitesi de kullanıcı memnuniyeti ve cihaz güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecekte sistemin harmonik bozulmalar, ani gerilim düşmeleri/yükselmeleri, frekans saptmaları, güç faktörü düşüklüğü gibi parametreleri de analiz edebilecek biçimde geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda, sistemin IEC 61000 serisi enerji kalitesi ölçüm standartlarıyla uyumlu hale getirilmesi, hem ticari hem de teknik anlamda sistemin kabul edilebilirliğini artıracaktır. Enerji kalitesi izleme fonksiyonu sayesinde kaçaklardan kaynaklanan dengesizliklerin yanı sıra kullanıcı kaynaklı yük bozunumları da analiz edilebilir hale gelecektir.

5.6.5 SCADA, AMI ve diğer otomasyon sistemleriyle entegrasyon

Sistemin tek başına çalışmasından ziyade, mevcut enerji otomasyon altyapılarına (örneğin SCADA, DMS, AMI) entegre edilerek çok daha geniş bir izleme ve kontrol yeteneğine ulaşması hedeflenmelidir. Bu entegrasyon sayesinde, tespit edilen kaçaklar merkezi sistem üzerinden anında raporlanabilir, kullanıcıya özel uyarılar gönderilebilir ve hatta belirli durumlarda yük kesimi otomatik olarak gerçekleştirilebilir.

Böylece, sistem yalnızca pasif bir gözlemci olmaktan çıkıp aktif bir yönetim aracı haline gelir. Bu entegrasyon sürecinde OPC UA, MQTT ve Modbus gibi endüstriyel iletişim protokolleriyle uyumluluk sağlanması gerekmektedir.

5.6.6 Güvenlik, mahremiyet ve siber tehditlere karşı koruma

IoT tabanlı sistemlerde veri güvenliği ve mahremiyet, her geçen gün daha kritik bir konu haline gelmektedir. Geliştirilen sistemin uzaktan erişim ve kablosuz veri iletimine dayanması, potansiyel siber saldırıların hedefi olabileceği anlamına gelir. Bu nedenle, veri iletiminde uçtan uca şifreleme (end-to-end encryption), güvenli kimlik doğrulama (multi-factor authentication), veri bütünlüğü kontrolleri ve ağ saldırılarına karşı IDS/IPS sistemlerinin kullanımı önerilmektedir.

Ayrıca, kullanıcı verilerinin KVKK ve GDPR gibi ulusal ve uluslararası düzenlemelere uygun biçimde saklanması, yalnızca teknik değil hukuki açıdan da

sistemin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Geliştirilecek sistemlerin firmware ve yazılım güncellemeleri OTA (over-the-air) mekanizmalarıyla yapılmalı, her yeni güncellemede güvenlik açıkları kapatılmalıdır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışması, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı sırasında meydana gelen kayıpların en önemli nedenlerinden biri olan kaçak akımların tespiti ve kontrol altına alınmasına yönelik, düşük maliyetli ancak yüksek hassasiyetli bir çözüm sunmayı amaçlamıştır. Bu kapsamda geliştirilen sistem, özellikle alçak gerilim düzeyinde yer alan yeraltı ve havai hatlara entegre edilebilecek nitelikte olup, dağıtım şebekelerinde sıkça karşılaşılan enerji kayıplarını minimize etme potansiyeline sahiptir. Sistem bileşenleri arasında yer alan SCT-013 akım sensörleri, yüksek duyarlılıkla alternatif akım ölçümü yapabilmekte; ADS1115 analog-sayısal dönüştürücü modülü ile birlikte veriler dijital ortama aktarılarak işlenmektedir. Bu veriler, Wi-Fi modülüne sahip NodeMCU ESP8266 mikrodenetleyicisi aracılığıyla gerçek zamanlı olarak izlenebilir hale getirilmiş, böylece manuel denetim süreçlerine gerek duyulmadan otomatikleştirilmiş bir izleme altyapısı oluşturulmuştur. Bu entegrasyon, yalnızca donanım uyumluluğu açısından değil, aynı zamanda sistemin bütüncül ve sürdürülebilir bir yapıya sahip olması bakımından da oldukça önemlidir.

Simülasyon ortamında gerçekleştirilen kapsamlı testler, sistemin farklı senaryolar altında gösterdiği performansın oldukça tatmin edici olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle giriş ve çıkış noktalarında ölçülen akım değerleri arasındaki farkların belirli eşik değerlerle karşılaştırılması sonucunda, kaçak akımların doğru şekilde tespit edilmesi sağlanmıştır. Bu durum, sistemin hem duyarlılık hem de özgüllük bakımından etkili sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Ayrıca, sistemin eşik aşımı durumlarında otomatik olarak uyarı üretebilmesi, saha personelinin olaylara hızlı müdahale etmesini kolaylaştırmakta ve şebeke güvenliğini artırmaktadır. Elektrik dağıtım altyapılarında geleneksel olarak kullanılan manuel kontrol ve gözlem sistemlerinin yetersizlikleri göz önüne alındığında, bu tür otomatikleştirilmiş sistemlerin enerji yönetiminde ne denli kritik bir rol üstlenebileceği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, sistemin kaçakların erken tespiti ile yalnızca enerji kaybının önüne geçmekle kalmayıp, aynı zamanda uzun vadede altyapı ömrünün uzatılmasına da katkı sunduğu söylenebilir.

Sistemin en dikkat çeken özelliklerinden biri olan Wi-Fi tabanlı veri aktarımı, onu yalnızca bir izleme aracı değil, aynı zamanda dijital dönüşüm süreçlerine entegre edilebilir bir yapı haline getirmektedir. Günümüz enerji sistemlerinin dijitalleşme yönündeki eğilimleri göz önüne alındığında, bu tür sistemlerin akıllı şebekeler (smart grids) ile uyumlu çalışabilme yeteneği büyük önem arz etmektedir. Gerçek zamanlı veri iletimi sayesinde, sistemin merkezi bir kontrol mekanizmasına entegre edilmesi ve elde edilen verilerin merkezi veri tabanlarında depolanarak ileri düzey analizler için kullanılması mümkün hale gelmektedir. Bu durum, sadece operatif süreçlerin otomasyonu açısından değil, aynı zamanda kestirimci bakım uygulamalarının geliştirilmesi, arıza öncesi risk analizlerinin yapılabilmesi ve enerji kalitesinin sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesi açısından da büyük faydalar sağlamaktadır. Öte yandan, gerçek zamanlı bildirimlerin saha ekiplerine ulaştırılması ile müdahale süreleri minimize edilmekte, personel iş yükü azalmakta ve operasyonel verimlilik artırılmaktadır.

Literatürde kaçak akım tespiti konusuna yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle yüksek maliyetli, karmaşık ve özel eğitim gerektiren sistemlerin önerildiği görülmektedir. Bu sistemlerin büyük çoğunluğu endüstriyel ölçekli altyapılar için geliştirilmiş olup, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki orta ve küçük ölçekli dağıtım sistemlerine doğrudan uygulanması hem ekonomik hem de teknik açıdan zorluklar içermektedir. Bu çalışma ise, sunduğu düşük maliyetli ve kolay entegre edilebilir yapısı sayesinde bu tür uygulama alanlarında önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Türkiye gibi alçak gerilim yeraltı ve havai hatların yaygın olarak kullanıldığı ülkelerde, sistemin saha koşullarına uyarlanarak yaygınlaştırılması mümkündür. Bu da çalışmanın yalnızca akademik bilgiye katkı sunmadığını, aynı zamanda sahada uygulanabilir nitelikte pratik bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; enerji sektöründe giderek artan sürdürülebilirlik, verimlilik ve dijitalleşme gereksinimlerine yanıt veren, teknik yeterliliği yüksek ve ekonomik açıdan uygulanabilirliği olan bir sistem tasarımı sunmaktadır. Geliştirilen sistem, hem enerji kayıplarının azaltılmasına katkı sağlamakta hem de şebeke işletmecilerinin karar alma süreçlerini veri odaklı hale getirmelerine imkân tanımaktadır. Bu yönüyle çalışma, elektrik dağıtım şebekelerinde izleme ve kaçak tespiti alanında yapılacak gelecekteki araştırmalara da güçlü bir zemin hazırlamakta ve uygulanabilirliği yüksek, ölçeklenebilir bir model örneği olarak literatürdeki yerini almaktadır.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada geliştirilen sistemin simülasyon ortamında elde ettiği başarılı sonuçlar, onun sahada uygulanabilirliğini ortaya koymakla birlikte, gerçek dünyadaki çeşitli çevresel ve fiziksel koşullarda test edilmesi gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, sistemin farklı coğrafi bölgelerde, değişen sıcaklık, nem, elektromanyetik parazit gibi dışsal etkilerin baskın olduğu ortamlarda denenmesi büyük önem taşımaktadır. Gerçek saha uygulamaları sayesinde sistemin çevresel dayanıklılığı ölçülebilecek, olası parazit etkileri tespit edilerek sensör kalibrasyon algoritmaları daha güvenilir hale getirilebilecektir. Böylece sistemin performansı yalnızca laboratuvar ortamıyla sınırlı kalmayıp, çok çeşitli şebeke yapılarında da doğrulanmış olacaktır. Kaçak akımların tespitinde kullanılan mevcut eşik değer bazlı algoritmalar, yapıları gereği belirli sınırların aşılması durumunda alarm üretmekte; bu da sistemin adaptif karar mekanizmalarının sınırlı olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, geliştirilen sistemin daha akıllı ve dinamik hale getirilmesi adına makine öğrenmesi ve yapay zeka temelli algoritmaların entegrasyonu önerilmektedir. Özellikle denetimli öğrenme yöntemleri kullanılarak, sistemin farklı senaryolarda öğrenme yeteneği artırılabilir, yanlış pozitif ve negatif alarm oranları minimize edilebilir. Böylece, hem doğruluk oranı yükseltilir hem de sistem karmaşık kaçak yöntemlerine karşı daha etkili bir tespit yeteneği kazanır.

Mevcut sistem altyapısının yalnızca akım sensörleri ile sınırlı kalması, tespit kapasitesini belirli ölçülerde sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, sisteme sıcaklık, nem, gerilim ve titreşim gibi farklı fiziksel parametreleri ölçebilecek sensörlerin entegre edilmesi, çok boyutlu veri analizi yapılmasına imkân tanıyacaktır. Bu tür bir genişleme, yalnızca kaçak akımların değil, aynı zamanda aşırı yüklenme, ekipman arızası, izolasyon bozukluğu gibi olası sorunların da önceden belirlenmesini mümkün kılarak, sistemin genel koruma kapasitesini ciddi ölçüde artıracaktır. Bununla birlikte, geliştirilen sistemin mevcut dağıtım şirketlerinin kullandığı SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ve diğer otomasyon altyapıları ile entegre edilmesi, merkezi izleme ve hızlı müdahale olanaklarını beraberinde getirecektir. Böyle bir entegrasyon, arızaların veya kaçakların tespitiyle sınırlı kalmayıp, anlık veri akışının tek bir merkezde toplanarak analiz edilmesine, müdahale sürelerinin optimize edilmesine ve operasyonel yönetim süreçlerinin dijitalleştirilmesine katkı sunacaktır. SCADA sistemlerine entegre çalışabilecek bir yapı, sistemin büyük ölçekli şebekelere uygunluğunu da artıracaktır.

Sistem aynı zamanda enerji kalitesine ilişkin parametrelerin izlenmesi açısından da geliştirilmelidir. Harmonik bozulmalar, voltaj dalgalanmaları, güç faktörü gibi enerji kalitesi göstergelerinin de izlenmesi, yalnızca kaçak tespitiyle sınırlı kalmayan, aynı zamanda şebeke performansının genel sağlığı hakkında da bilgi sunan bir yapı oluşturacaktır. Bu sayede dağıtım şirketleri, sadece kayıpları azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda enerjinin kalitesini sürdürülebilir biçimde yönetebilecektir. Geliştirilen sistemin IoT temelli veri iletişimi altyapısı nedeniyle, siber güvenlik önlemleri hayati bir önem taşımaktadır. Gerçek zamanlı verilerin bulut tabanlı platformlara iletildiği bir yapıda, olası dış tehditlere karşı gelişmiş şifreleme protokolleri, güvenli haberleşme protokolleri (örneğin TLS/SSL) ve kullanıcı kimlik doğrulama sistemlerinin uygulanması gerekmektedir. Veri güvenliği sadece sistemin işlevselliği için değil, aynı zamanda kurumların mevzuata uyum açısından da kritik bir gerekliliktir. Bu doğrultuda, geliştirilecek sistemin siber güvenlik standartlarına uygunluğu, uygulamaya geçmeden önce sağlanmalıdır.

Prototip olarak geliştirilen sistemin endüstriyel ölçekte uygulanabilir hale getirilmesi için ölçeklenebilirliğin test edilmesi ve modüler bir yapıya kavuşturulması önerilmektedir. Farklı büyüklükteki dağıtım hatlarına kolayca entegre edilebilecek bir tasarım anlayışı, sistemin yaygınlaştırılmasını kolaylaştıracaktır. Ayrıca, sistemin uzun süreli saha koşullarında dayanıklılığının test edilmesi ve endüstriyel kalite standartlarına göre sertifikalandırılması, ilgili kurum ve kuruluşların bu teknolojiyi benimsemelerini teşvik edecek önemli adımlar arasında yer almaktadır. Son olarak, bu tür teknolojilerin geniş ölçekte uygulamaya geçebilmesi için yalnızca teknik yeterlilik değil, aynı zamanda uygun yasal ve politik zemin de gereklidir. Bu bağlamda, enerji kaçaklarının önlenmesi amacıyla geliştirilen sistemlerin kullanımını teşvik edici yasal düzenlemelerin yapılması ve finansal destek mekanizmalarının oluşturulması önem arz etmektedir. Ulusal enerji kayıplarını azaltma politikaları çerçevesinde bu tür yenilikçi sistemlerin desteklenmesi, enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak açısından stratejik bir katkı sağlayacaktır. Kamu-özel sektör iş birlikleri, teşvik programları ve pilot uygulamalar aracılığıyla bu tür sistemlerin yaygınlaştırılması, hem teknik gelişmeyi hızlandıracak hem de enerji sektörünün dijitalleşme süreçlerini destekleyecektir.

Her ne kadar geliştirilen sistem farklı yük senaryolarında güvenilir sonuçlar üretmiş olsa da, çalışmada doğruluk oranı, yanlış alarm yüzdesi ve benzeri nicel performans metriklerinin kapsamlı biçimde raporlanmamış olması önemli bir sınırlılık olarak değerlendirilebilir. Bunun başlıca nedeni, prototip düzeyinde geliştirilen sistemin

saha testlerinin sınırlı olması ve ölçüm koşullarındaki zorluklardır. Dolayısıyla, gelecekte yapılacak araştırmalarda sistemin uzun dönemli saha testleri gerçekleştirilerek doğruluk, hassasiyet, yanlış pozitif ve negatif oranları gibi metriklerin ayrıntılı şekilde ortaya konması tavsiye edilmektedir. Ayrıca, mevcut çalışmanın akım sensörleri ile sınırlı kalması, veri çeşitliliğini kısıtlamakta ve çok boyutlu analizlerin yapılmasına engel oluşturmaktadır. Bu durumun aşılması için farklı fiziksel parametreleri izleyebilecek sensörlerin entegre edilmesi, sistemin karar destek kapasitesini güçlendirecektir. Son olarak, yapay zekâ tabanlı algoritmaların entegrasyonu, SCADA altyapısı ile bütünleşme ve enerji kalitesi parametrelerinin izlenmesi gibi öneriler gelecekteki çalışmaların odaklanması gereken başlıca alanlar olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, T. (2017). Non-technical loss analysis and prevention using smart meters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 573-589.
- Alahakoon, D., ve Yu, X. (2015). Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: A survey. *IEEE transactions on industrial informatics*, 12(1), 425-436.
- Ayhancı, C., ve Yaşar, M. H. (2025). Enerji Teknolojilerinden Otomatik Sayaç Okuma Sisteminin (OSOS) Eğitim Amaçlı Modellenmesi ve Uygulamalı Gerçekleştirilmesi.
- Bağcı, A. (2025). Sürdürülebilir Kalkınma Yolunda Türkiye: Kentleşme, Yenilenebilir Enerji ve Çevresel Kalite İlişkisi. *TYB Akademi Dil Edebiyat ve Sosyal Bilimler Dergisi*(43), 11-28.
- Bozgeyik, F. (2015). Üç Fazlı Dengeli Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Kayıp Tahmini Ve Kayıp Paylaşımı.
- Brown, R. E. (2017). *Electric power distribution reliability*. CRC press.
- Çelikpençe, M. (2023). *Elektrik dağıtım şebekelerinde teknik olmayan kayıp kaçakların makine öğrenmesi ile tespiti* İstanbul Sabahattin Zaim University (Turkey)].
- Çetinkaya Karltepe, M., ve Kabalcı, E. (2021). *Radyal elektrik dağıtım şebekesi test sistemi tasarımı vedağıtık üretim analizi* Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi].
- Çınar, H. Y. (2020). *Elektrik Piyasasında Dağıtım Faaliyetine İlişkin Lisanslama Rejimi ve Denetim*. Astana Yayınları.
- De Souza, M. A., Pereira, J. L., Alves, G. d. O., de Oliveira, B. C., Melo, I. D., ve Garcia, P. A. (2020). Detection and identification of energy theft in advanced metering infrastructures. *Electric Power Systems Research*, 182, 106258.
- Depuru, S. S. S. R., Wang, L., ve Devabhaktuni, V. (2011). Electricity theft: Overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft. *Energy policy*, 39(2), 1007-1015.
- Dönmez, M. (2013). Akıllı şebekeler ve entegrasyon (smart grids and integration). *BTC Business Technology*.
- Duc, M. L., ve Viet, Q. N. K. (2022). Analysis Affect Factors of Smart Meter A PLS-SEM Neural Network. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 4(12), 288-301.

- Fang, X., Misra, S., Xue, G., ve Yang, D. (2011). Smart grid—The new and improved power grid: A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, 14(4), 944-980.
- Foster, V., Eberhard, A., ve Dyson, G. (2021). The evolution of electricity sectors in Africa: Ongoing obstacles and emerging opportunities to reach universal targets. In *Handbook on Electricity Markets* (pp. 595-628). Edward Elgar Publishing.
- Geyikoğlu, A., ve Yağanoğlu, M. (2025). Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Elektrik Dağıtım Şebekeleri Arıza Tahmini. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 15(1), 73-98.
- Gómez-Expósito, A., Conejo, A. J., ve Cañizares, C. (2018). *Electric energy systems: analysis and operation*. CRC press.
- Güleydin, M., Ekinci, S., ve İzci, D. Yer Altı Elektrik Dağıtım Hatlarında Meydana Gelen Enerji Kayıplarının Tespiti İçin İot Tabanlı Modüler Sistem Tasarımı.
- Hilliard, R. (2000). Ieee-std-1471-2000 recommended practice for architectural description of software-intensive systems. *IEEE*, <http://standards.ieee.org>, 12(16-20), 2000.
- Jain, K., Mane, A., Jain, H., ve Sethia, H. (2025). Predicting Electricity Bill Prices using LSTM and IoT-based Sensor Data. *Grenze International Journal of Engineering & Technology (GIJET)*, 11.
- Jamasb, T., ve Pollitt, M. (2007). Incentive regulation of electricity distribution networks: Lessons of experience from Britain. *Energy policy*, 35(12), 6163-6187.
- Jiang, X., Zhou, Y., Ming, W., Yang, P., ve Wu, J. (2022). An overview of soft open points in electricity distribution networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(3), 1899-1910.
- Jokar, P., Arianpoo, N., ve Leung, V. C. (2015). Electricity theft detection in AMI using customers' consumption patterns. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 216-226.
- Kaypmaz, A., Engin, B., Müh, E. Y., Demir, İ., ve AŞ, Ç. Enerji Verimliliği ve Tasarrufu açısından Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Çalışmaları.
- Kocaman, B., ve Kutlu, R. (2016). Bitlis İlindeki Elektrik Enerjisi Dağıtım Kayıplarının İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2).
- Lakervi, E., ve Holmes, E. J. (1995). *Electricity distribution network design*. IET.
- Mohammad, N., Barua, A., ve Arafat, M. A. (2013). A smart prepaid energy metering system to control electricity theft. 2013 international conference on power, energy and control (ICPEC),
- Otchere-Appiah, G., Takahashi, S., Yeboah, M. S., ve Yoshida, Y. (2021). The impact of smart prepaid metering on non-technical losses in Ghana. *Energies*, 14(7), 1852.

- Peng, Y., Zhao, F., Zhou, K., Yu, X., Jin, Q., Li, R., ve Shuai, Z. (2025). Review of Digital Twin Technology in Low-Voltage Distribution Area and the Implementation Path Based on the ‘6C’ Development Goals. *Energies*, 18(17), 4459.
- Polat, N. B., ve Dursun, Ö. Ü. İ. Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Yüksek Empedanslı Arızaların Analizi Ve Tespitine Yönelik Algoritma Geliştirilmesi.
- Prasad, K. V. S. R., Sree, S. R., Tanuja, P., Pujitha, T., Vardhani, N. H., ve Jhansi, G. (2025). IoT-Driven Stator Winding Fault Analysis and Prevention for Induction Motor to Meet Industry 5.0 Application. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 1-10.
- Raza, M. H., Rind, Y. M., Javed, I., Zubair, M., Mehmood, M. Q., ve Massoud, Y. (2023). Smart meters for smart energy: a review of business intelligence applications. *IEEE Access*, 11, 120001-120022.
- Razavi, R., Gharipour, A., Fleury, M., ve Akpan, I. J. (2019). A practical feature-engineering framework for electricity theft detection in smart grids. *Applied energy*, 238, 481-494.
- Singh, C., Jirutitijaroen, P., ve Mitra, J. (2018). *Electric power grid reliability evaluation: models and methods*. John Wiley & Sons.
- Tabak, B., ve Yalçın, M. (2004). Elektrik güç sistemlerinde enerji kalitesi. *Sakarya University Journal of Science*, 8(1), 52-54.
- Tarhan, F., ve Kocaman, B. (2024). *Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Harici Faz Veya Harici Nötr Durumlarında Teknik Olmayan Kayıpların Mikrokontrol Sistemi İle Tespiti* [Bitlis Eren University].
- Tekin, M. (2006). Yeraltı Kablolarında Arıza Yeri Tespiti.
- Üstünsoy, F., Sayan, H. H., ve Saygın, A. (2018). AG Dağıtım Şebekelerinde Kaçak Kullanımın Tespiti ve Otomatik Faturalama İçin Örnek Laboratuvar Çalışması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 1178-1189.
- Von Meier, A. (2024). *Electric power systems: a conceptual introduction*. John Wiley & Sons.
- Xu, L. (2025). *Electrode Materials in Energy Storage Technologies: Applications in Lithium-, Sodium-, Potassium-, Sulfur-and Zinc-Based Rechargeable Batteries*. John Wiley & Sons.
- Yarat, S., ve Orman, Z. (2023). Elektrik Güç Dağıtımında Akıllı Sayaç Verileri için Anomali Tespiti ve Tahminleme. *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 3(2), 72-85.
- Yaşar, C., Aslan, Y., ve Biçer, T. (2010). BİR DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜ BÖLGESİNDEKİ KAYIPLARIN İNCELENMESİ. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*(022), 9-22.

- Yıldız, B. B. (2022). Gerçek Zamanlı Kaçak Elektrik Kullanımının Derin Öğrenme İle Tespit Edilmesi.
- Yıldız, E., ve Çetinkaya, N. (2022). Elektrik güç sistemlerindeki kaçak kullanımların tahmini. *Journal of Investigations on Engineering and Technology*, 5(1), 1-10.
- Zhang, W., Cao, Q., Yang, S., ve Zhu, Y. Research on abnormal power consumption detection method for grid users based on support vector machine.
- Zheree, M. S. M. (2020). Enerji dağıtım hatlarındaki kayıpların yapay sinir ağı ile belirlenmesi.