



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MUŞ İLİNDE ELEKTRİK TESİSLERİNDEKİ
ENERJİ KAYIPLARI VE VERİMLİLİĞİNİ
ARTIRMA YÖNTEMLERİ**

Mehmet Maşallah TOPLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim
Dalı**

Temmuz-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MUŞ İLİNDE ELEKTRİK TESİSLERİNDEKİ
ENERJİ KAYIPLARI VE VERİMLİLİĞİNİ
ARTIRMA YÖNTEMLERİ**

Mehmet Maşallah TOPLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim
Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Enver SALKIM

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Enver SALKIM

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SAĞLAM

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi İhsan TUĞAL

Temmuz-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Mehmet Maşallah TOLU tarafından hazırlanan “Muş İlinde Elektrik Tesislerindeki Enerji Kayıpları ve Verimliliğini Artırma Yöntemleri” adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SAGLAM
Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

.....

Danışman

Doç. Dr. Enver SALKIM
Muş Alparslan Üniversitesi
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Elektronik ve Otomasyon Bölümü

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İhsan TUĞAL
Muş Alparslan Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Yazılım Mühendisliği Bölümü

.....

Yukarıdaki sonuç;
Enstitü Yönetim Kurulu/...../..... Tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

.....

FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve seminer yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mehmet Maşallah TOPLU

Tarih: 14.07.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUŞ İLİNDE ELEKTRİK TESİSLERİNDEKİ KAYIPLARI VE VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Mehmet Maşallah TOPLU

**Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Enver SALKIM

Elektrik enerjisinin üretimi yüksek maliyetler gerektirdiğinden, bu enerjinin etkin ve doğru kullanımı büyük önem arz etmektedir. Türkiye'de enerji sektörünün karşı karşıya olduğu temel sorunlardan biri, kaçak elektrik kullanımının yaygınlığıdır. Kaçak kullanımın önceden tahmin edilmesi, enerji yönetimi açısından çözülmesi gereken kritik bir meseledir. Elektrik sistemlerindeki kayıplar ve kaçak kullanımlar, birbirinden farklı kavramlar olup, ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu ayrımın net biçimde yapılması, elektrik şebekeleri üzerinde uygulanacak iyileştirme önlemlerinin ve yapılacak yatırımların daha doğru şekilde planlanmasına katkı sağlayacaktır. Böylece, bölgesel düzeyde yapılacak yatırımların kaçak kullanımla mücadeleye mi yoksa teknik kayıpların azaltılmasına mı yönelmesi gerektiği hususunda daha isabetli kararlar alınabilecektir. Kaçak elektrik kullanımının tahmin edilmesi, yalnızca enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda sosyoekonomik gelişmeler açısından da önemli katkılar sağlayacak ve bu alandaki mücadeleye ivme kazandıracaktır. Bu tez çalışmasında, Muş ilindeki kayıp ve kaçak oranlarının azaltılmasına yönelik mevcut optimizasyon yöntemleri incelenmiş ve geliştirilebilecek yeni yaklaşımlar üzerinde durulmuştur. Bu doğrultuda, teknik kayıpların analizine yönelik olarak Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak trafo modellemesi gerçekleştirilmiş ve trafolarla oluşan teknik kayıplar değerlendirilmiştir. Teknik olmayan kayıplar kapsamında ise, LSTM (Long Short-Term Memory) zaman serisi analizi yöntemi uygulanarak Muş ili için 2030 yılına kadar kayıp-kaçak tahminleri yapılmıştır. Bu tahminler sayesinde elektrik enerjisinde kaçak kayıplar ile ilgili yapılacak çalışma planlamalarına öngörülse bir katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2025, 73 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Akım, enerji, güç, kaçak, kayıp, LSTM, PLC

ABSTRACT

MS Thesis

ENERGY LOSSES IN ELECTRICAL INSTALLATIONS AND STRATEGIES FOR ENHANCING EFFICIENCY IN MUŞ PROVINCE

Mehmet Maşallah TOPLU

**Muş Alparslan University
Natural and Applied Science
Department of Nuclear Energy and Energy Systems**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Enver SALKIM

Due to the high cost of electricity generation, the efficient and accurate use of electrical energy is of critical importance. One of the major challenges facing the energy sector in Turkey is the widespread occurrence of electricity theft. Predicting such unauthorized usage is a crucial issue that must be addressed to ensure effective energy management. It is essential to distinguish between technical losses and non-technical (illegal) losses, as they represent different phenomena and require separate analytical approaches. This distinction enables more accurate planning of investments and improvement strategies for electrical networks. Consequently, it becomes possible to prioritize whether regional investments should focus on reducing technical losses or combating illegal usage, thus supporting more data-driven decision-making processes. Estimating electricity theft has the potential to contribute significantly not only to energy efficiency but also to socioeconomic development, providing a solid foundation for future improvements. In this study, existing optimization methods for reducing energy losses and theft in Muş Province were examined, and potential enhancements were explored. To analyze technical losses, transformer modeling was performed using Comsol Multiphysics, enabling detailed assessment of losses within transformers. Regarding non-technical losses, a Long Short-Term Memory (LSTM) time series analysis model was employed to forecast electricity losses and theft in Muş Province through the year 2030. These forecasts are intended to provide predictive insight for planning future studies related to non-technical losses in electrical energy.

2025, 73 Pages

Keywords: Current, power, energy, leakage, loss, LSTM, PLC

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışma süresinin başlangıç, sürdürülme ve bitirilmesi konusunda moral ve motivasyon vererek desteklerini esirgemeyen, yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren kıymetli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Enver Salkım'a teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda bana akademik olarak yardımda bulunan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi İhsan Tuğal'a ve gerekli verileri toplamamda yardımcı olan eski çalışma arkadaşım Sinan Bozkurt' a, şuan ki çalışma arkadaşım Nurullah Öztepe' ye ve tez süresi boyunca moral ve motivasyon konusunda desteklerini esirgemeyen değerli dostum Murat Karakaya'ya teşekkürlerimi ve sevgilerimi iletiyorum.

Son olarak manevi katkılarıyla yanımda olan aileme ve çağdaş bilim seviyesindeki Muş Alparslan Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji Anabilim dalındaki hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Maşallah TOPLU
MUŞ-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji.....	1
1.2. Elektrik Enerjisi	2
1.3. Enerji Kaynakları Nelerdir.....	3
2. ELEKTRİK ENERJİSİNDEKİ KAYIPLAR ve ÇEŞİTLERİ.....	4
2.1. Teknik Kayıplar	5
2.1.1. Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıplar	7
2.1.2. Akımdan Bağımsız Kayıplar	7
2.1.3. Akıma Bağlı Kayıplar	8
2.1.4. Yüke Bağlı Kayıplar	9
2.1.5. Yüke Bağlı Olmayan Kayıplar	9
2.2. Teknik Olmayan Kayıplar	10
3. ELEKTRİK ENERJİSİNDEKİ KAYIPLARI ÖNLEME YÖNTEMLERİ.....	12
3.1. Teknik Kayıpların Azaltılması İçin Verimliliği Artırma Yöntemleri.....	12
3.2. Teknik Olmayan Kayıpların PLC/Uzaktan Kontrol ile Önleme Yöntemi	12
3.2.1. PLC Teknolojisi	13
3.2.1.1. PLC Sisteminin Eski Sisteme Göre Karşılaştırılması.....	16
3.2.2. Akıllı Sayaçlar ve Haberleşmesi.....	17
3.3. Türkiye'deki ve Muş İlindeki Kayıpların İncelenmesi	20
3.4. Muş İlindeki Kayıpların Azaltılması İçin Verimliliği Artırma Yöntemleri	22
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	26
4.1. LSTM'nin Zaman Serisi Modelleme Performansı	26
4.2. LSTM'nin Alternatif Yöntemlerle Karşılaştırılması	26
4.3. Elektrik Kayıp-Kaçak Uygulamalarında LSTM Kullanımı.....	26
4.4. LSTM'nin Bölgesel Tahminler İçin Uygunluğu	27
4.5. Yöntem Seçiminin Gerekçesi	27
5. MATERYAL ve METOD	28

5.1. Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıpların Modellemesi	28
5.2. LSTM (Long Short-Term Memory)	30
5.2.1. Hareketli Ortalama (Moving Average).....	32
5.2.2. Elektrik Dağıtım Şebekelerindeki Kayıp-Kaçak Oranlarının Zaman Serisi Analizi.....	32
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	44
6.1. Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıpların Analizi	44
6.2. LSTM ile Yapılan Tahmin Analizleri ve Sonuçları.....	45
6.3. LSTM ile Gelecek Tahmini (2024-2030)	48
6.4 Genel Sonuç	52
6.5 Öneriler	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	61

SİMGELER ve KISALTMALAR

SİMGELER

AC	: Doğru Akım
DC	: Alternatif Akım
Hz	: Hertz
J	: Joule
Kg	: Kilogram
Km	: Kilometre
Kwh	: Kilowatt saat
P	: Güç
A	: Akım
R	: Direnç
V	: Volt

KISALTMALAR

EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
PLC	: Programlanabilir mantıksal denetleyici
TEDAS	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
VEDAŞ	: Vangözü Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
EKS	: Endüstriyel Kontrol Sistemleri
KK	: Kayıp Kaçak
LSTM	: Long Short-Term Memory
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
USOM	: Uzaktan Sayaç Okuma Merkezi
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Enerjinin dönüşümü (Aydem Perakende, 2023)	2
Şekil 1.2. Elektrik şebeke yapısı (Karaman ve Taşkın, 2023).....	3
Şekil 2.1 Sayaca müdahale edilerek yapılan (teknik olmayan) kaçak örneği	4
Şekil 2.2. Yanmış elektrik panosu içi	5
Şekil 2.3. Bir dağıtım ve iletim hattındaki hat uzunluğunun kk ile ilişkisi	6
Şekil 2.4. Örnek trafo bölgesindeki abone tüketim ve teknik kayıp grafiği.....	6
Şekil 2.5. Frekansa bağlı dielektrik ve kaçak kayıp ilişkisi.....	8
Şekil 2.6. Trafodan çekilen akıma göre örnek teknik kayıp grafiği	8
Şekil 2.7. Yüke bağlı kayıplar	9
Şekil 2.8. Sürtünme, rüzgar ve demir kayıplarının hıza bağlı değişimi	10
Şekil 3.1. PLC haberleşme topolojisi (Sivaneasan ve Gunawan, 2008).....	16
Şekil 3.2. PLC şebeke sisteminin eski sisteme göre kıyası (Pandit, 2019)	17
Şekil 3.3. Akıllı elektrik sayaçlarının operasyonel gösterimi.....	18
Şekil 3.4. PLC modüllü akıllı elektrik sayacı (Kocaman, 2018).....	18
Şekil 3.5. Akıllı sayaç haberleşme altyapısı (Takmaz, 2014)	19
Şekil 3.6. Türkiye’ de ki dağıtım bölgelerindeki kayıp oranları (Alemdağ, 2023)	21
Şekil 3.7. Muş ili 2014-2024 yılları arası kayıp kaçak oranları	22
Şekil 3.8. Kırsal kesimlerde sayaçların direklerin üzerine taşınması	24
Şekil 3.9. Toplu sayaçların bulunduğu merkezi yerdeki PLC sayaç panosu (Elektrik Mühendisleri Odası, n.d.)	24
Şekil 3.10. Muş ilindeki ilçelerin 2014-04/2025 arası kk oranları ve 2021 sonrası kk PLC etkisi.	25
Şekil 5.1. Transformatörün mekanik aksam varken ve yokken 3B model gösterimi.....	30
Şekil 5.2. Transformatörün mesh kullanılarak çözüme hazır hale getirilmesi	30
Şekil 5.3. Muş merkeze ait trendsel kk grafikleri.....	39
Şekil 5.4. Muş Bulanık ilçesine ait trendsel kk grafikleri	40
Şekil 5.5. Muş Malazgirt ilçesine ait trendsel kk grafikleri.....	40
Şekil 5.6. Muş Varto ilçesine ait trendsel kk grafikleri	41
Şekil 5.7. Muş Korkut ilçesine ait trendsel kk grafikleri.....	41
Şekil 5.8. Muş Korkut ilçesine ait trendsel kk grafikleri.....	42
Şekil 5.9. Muş merkez ve ilçeler aylara göre ortalama kayıp kaçak değerleri	43
Şekil 6.1. Yüzey akım yoğunluğu normu ve manyetik akı yoğunluğu	44
Şekil 6.2. Mekanik aksam kayıpları (W).....	44
Şekil 6.3. Hareketli ortalama ile oluşan test tahmin grafikleri	46
Şekil 6.4. LSTM ile yapılan tahminler ve gerçek değerlerin karşılaştırılması	47
Şekil 6.5. LSTM ile hata metrik başarıları	48
Şekil 6.6. LSTM ile Muş Merkez ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini	49
Şekil 6.7. LSTM ile Muş Bulanık ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini.....	49
Şekil 6.8. LSTM ile Muş Malazgirt ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini.....	50
Şekil 6.9. LSTM ile Muş Varto ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini	50
Şekil 6.10. LSTM ile Muş Korkut ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini	51
Şekil 6.11. LSTM ile Muş Hasköy ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Enerji kaynaklarının genel sınıflandırılması (Koç ve Şenel, 2013)	3
Çizelge 2.1. Teknik olmayan kayıpların sebepleri (İbrahim, 1999).....	11
Çizelge 3.1. Türkiye’ de ki bölgelerin elektrik kayıp değerleri (MWh) (EPDK, 2019)..	21
Çizelge 3.2. Vedaş bölgesindeki illerin kayıp kaçak (2020-2023) verileri	22
Çizelge 3.3. Bulanık ilçesinde yapılan PLC çalışması değişim sonuçları (Kocaman, 2018).....	23
Çizelge 5.1. Modellemede yapılan analizler	28
Çizelge 5.2. Muş ili merkez ve ilçelerinin 2013-2024 yılları arasındaki aylık kk oran değerleri	33
Çizelge 6.1. Farklı frekans değerlerindeki çekirdek, sarım ve mekanik kayıp değerleri	45
Çizelge 6.2. Lstm ile tahmin hata metrikleri	47

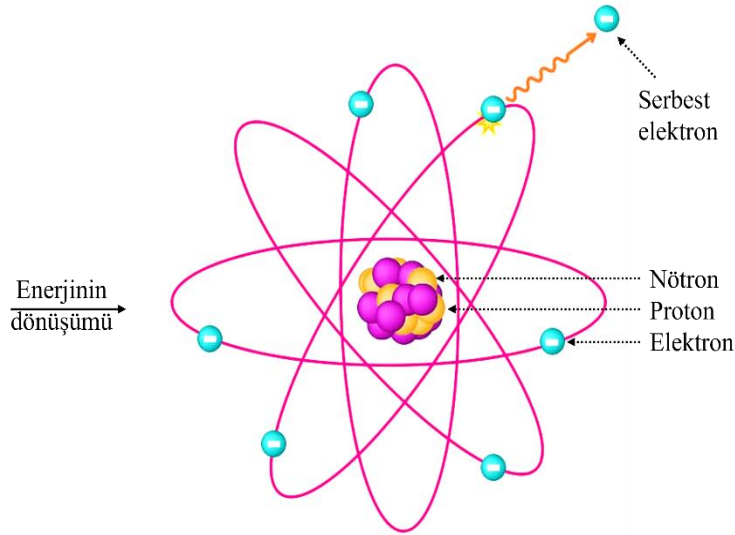


1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, günlük yaşamın ve sanayinin vazgeçilmez bir parçası olup üretimden tüketime kadar olan süreçte çeşitli kayıplara uğramaktadır. Bu kayıplar teknik nedenlerden veya insan kaynaklı etkenlerden (kaçak kullanım gibi) oluşabilmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, teknik olmayan kayıplar ciddi ekonomik ve altyapısal sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışma, elektrik enerjisindeki kayıpların türlerini inceleyerek hem teknik hem de teknik olmayan kayıpların azaltılmasına yönelik çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır. PLC tabanlı sayaç sistemleri ve akıllı sayaç uygulamaları gibi teknolojik yaklaşımlar ele alınmış, Türkiye geneli ve Muş ili özelinde kayıp-kaçak durumu analiz edilmiştir. Ayrıca, COMSOL Multiphysics yazılımı ile trafo modellemesi yapılarak transformatörlerde oluşan teknik kayıplar analiz edilmiş, böylece şebekedeki fiziksel kayıplar sayısal olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın özgün yönü, LSTM (Long Short-Term Memory) yöntemiyle Muş ilinde 2024–2030 yılları arasındaki kayıp-kaçak oranlarının tahmin edilmesidir. Bu sayede hem teknik hem de yönetsel planlamalara katkı sağlayacak öngörüler sunularak kayıp kaçığın en aza indirilmesiyle elektrik enerjisi verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.

1.1. Enerji

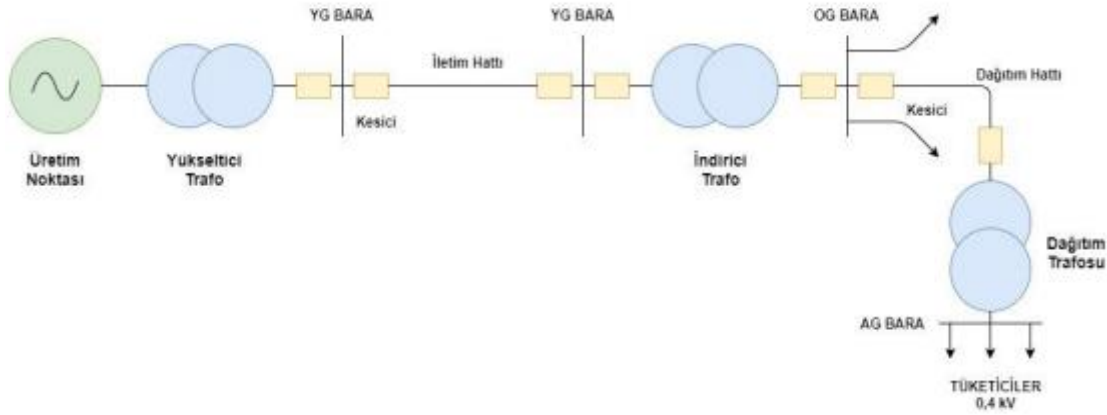
Farklı formlara ve biçimlere dönüşebilen, vardan yok yoktan da var edilemeyen bir kavram olan enerji fizikte iş yapabilme kapasitesi olarak ifade edilmektedir (Übelacker, 2005). Birçok farklı anlamlarla tanımlanan enerji, “değişikliğe yol açabilme potansiyeli” olarak da ifade edilen bir kavramdır (Erol, 2007). Örneğin insanlardaki ruhsal ve fiziksel değişikliklerin yanı sıra, her türlü doğa olayının “enerjiden kaynaklandığını, enerjinin sonucu olduğunu” söylemek mümkündür (Altintas, 2013). Bu bağlamda enerji bütün alanlarda hayatın içerisinde olan çok önemli bir kavram olduğunu ve mümkün mertebede tasarruf edilerek arzının yüksek olabileceğinden söz edilebilir. Enerji arzının yüksek olması taleplerinde daha sağlıklı şekilde karşılanabilmesine olanak sağlar. Şekil 1.1’ deki görselde enerjinin dönüşümü gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Enerjinin dönüşümü (Aydem Perakende, 2023)

1.2. Elektrik Enerjisi

Elektrik enerjisi, iletken bir ortamda potansiyel fark uygulanmasıyla yüklerin hareketinden doğan kinetik enerjinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu enerji; termik, hidrolik, doğal gaz ve nükleer gibi birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Kullanım kolaylığı ve günlük ihtiyaçlara hızlı yanıt verebilmesi nedeniyle bu kaynakların elektrik enerjisine dönüştürülme oranı her geçen gün artmaktadır. Ancak, enerjinin sadece rasyonel kullanımı değil; iletim ve dağıtım sürecinde oluşan kayıpların azaltılması da enerji yönetiminde büyük önem taşımaktadır. Kayıpların minimum düzeye indirilebilmesi için, iletim ve dağıtım altyapıları teknik ve ekonomik açılarından optimize edilmeli, şebeke yapısına uygun donanım tercih edilmeli ve tüketici tarafında da bilinçli önlemler alınmalıdır. Böylece, enerji iletim ve dağıtım süreçlerinde verimlilik artırılarak, hem kaynak kullanımında etkinlik sağlanabilir hem de enerji maliyetleri üzerinde olumlu etkiler yaratılabilir (Güney, 2005). Şekil 1.2' deki görselde elektrik şebeke yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Elektrik şebeke yapısı (Karaman ve Taşkın, 2023)

1.3. Enerji Kaynakları Nelerdir

Enerji kaynakları, kullanımına göre yenilenebilir ve yenilenemez, dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil ve ikincil olarak sınıflandırılmaktadır (Koç ve Şenel, 2013). Birincil enerji kaynakları doğrudan doğadan elde edilen kaynaklar (petrol, kömür, güneş, rüzgâr vb.) iken, bu kaynakların dönüşümüyle elde edilen elektrik, LPG gibi türler ikincil enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir kaynaklar doğal döngü içinde tükenmeyen; yenilenemez kaynaklar ise sınırlı rezervlere sahip olan kaynaklardır. Fosil yakıtlar ve nükleer materyaller yenilenemez kaynaklara, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle ise yenilenebilir kaynaklara örnektir. Artan nüfus ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerji ihtiyacı sürekli yükselmekte; bu da yenilenemez kaynakların bilinçli kullanımını ve yenilenebilir kaynaklardan daha fazla yararlanmayı zorunlu kılmaktadır (Koç ve Kaya, 2015). Teknolojik gelişmeler ve sanayileşme ile birlikte enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Bu durum, mevcut enerji kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasını zorunlu hale getirmekte; özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması gerektiğine işaret etmektedir (REN21, 2023). Çizelge 1.1’ de enerji kaynaklarının genel olarak sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Enerji kaynaklarının genel sınıflandırılması (Koç ve Şenel, 2013)

Enerji Kaynakları	
Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	Yenilenebilir (Alternatif) Enerji Kaynakları
Taş kömürü	Hidroelektrik
Linyit	Güneş enerjisi
Petrol	Rüzgâr enerjisi
Doğal gaz	Jeotermal enerji
	Biyokütle enerjisi

2. ELEKTRİK ENERJİSİNDEKİ KAYIPLAR ve ÇEŞİTLERİ

Elektrik iletim hatlarında oluşan kayıplar, trafolar ve kablolardaki iç dirençler ile sayaçsız enerji kullanımından kaynaklanmaktadır (Depuru, Wang ve Devabhaktuni, 2011). Toplam kayıp, şebekeye verilen enerji ile sayaçlara yansıtılan enerji arasındaki farktır (Çetinkaya, 2020). Teknik kayıplar, enerji iletimi sırasında doğal olarak ortaya çıkar ve minimumda tutulması hedeflenir (Güngör ve Yılmaz, 2019). Ancak hatalı kablo kesiti, uygun koruma cihazı eksikliği ve kötü bağlantılar teknik kayıpları artırabilir (ETKB, 2023). Teknik olmayan kayıplar ise kaçak kullanım, sayaç müdahalesi ve ölçüm hatalarından kaynaklanan, sosyal ve yönetsel faktörlerle karmaşıklaşan problemlerdir (Jokar, Arian ve Khodabakhsh, 2012). Teknik olmayan enerji kaybının maliyeti, toplam enerji kaybından teknik kayıpların çıkarılmasıyla hesaplanır (Davidson, 2003). Formüsel olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\text{Teknik Olmayan Kayıp} = \text{Toplam Kayıp} - \text{Teknik Kayıp}$$

Teknik kayıplar genellikle ölçülebilir ve belirli fiziksel etkenlere dayalı olarak hesaplanabilirken, teknik olmayan kayıplar; kaçak kullanım, ölçüm hataları veya faturalandırma dışı tüketim gibi tespiti zor nedenlerden kaynaklanır. Çoğu durumda, teknik olmayan kayıplar toplam kaybın önemli bir kısmını oluşturmaktadır (Çelikpençe, 2023).



Lehimleme yapılan kısım

Şekil 2.1 Sayaca müdahale edilerek yapılan (teknik olmayan) kaçak örneği

Yukarıdaki şekil 2.1’deki görselde sayacın giriş çıkışlarında lehimleme yapılarak kaçak kullanım yapılan sayaç kartı görüntüsü bulunmaktadır. Bu durum akımın sayacın ölçüm

noktasından tam olarak geçmesini engellemekte ve daha düşük ölçüm yapma mantığıyla kaçak kullanımının örneği olarak gösterilmektedir.



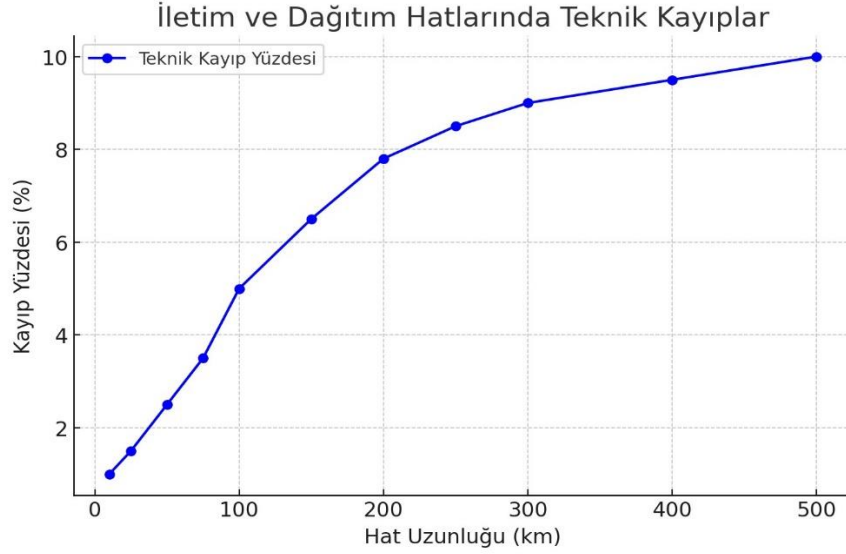
Şekil 2.2. Yanmış elektrik panosu içi

Şekil 2.2' de aşırı yüklenme, gevşek bağlantı, kısa devre hatalı malzeme kullanımı (sigorta, düşük kesitli kablo vb.) ve panonun temizliğiyle havalandırılmaması gibi sebeplerden meydana gelmiş olabilecek elektrik pano arızası teknik kayıp sebepli panonun yanmasına sebep olmuştur.

2.1. Teknik Kayıplar

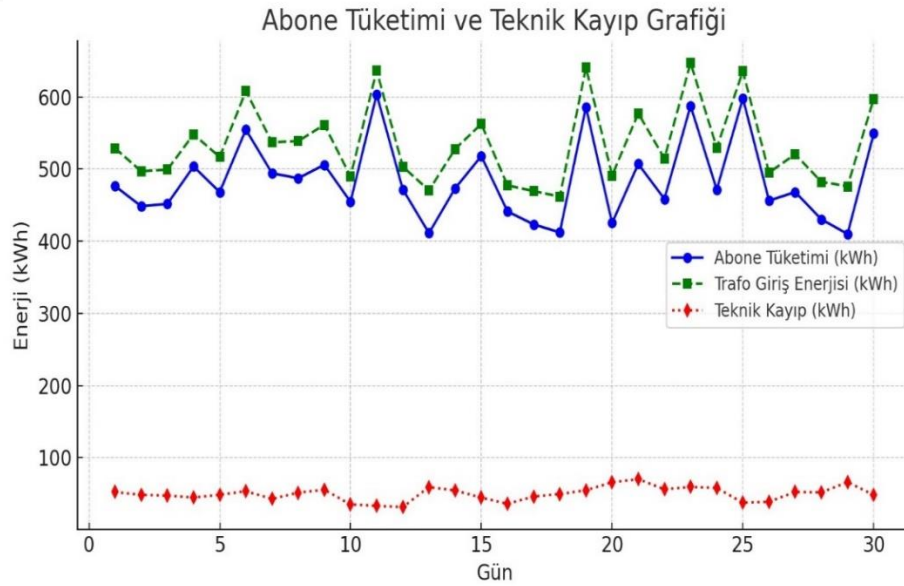
Elektrik enerjisinin üretim tesisinden nihai kullanıcıya iletimi sırasında, üretim tesisi ile yükseltici şalt sahası arasındaki kısa mesafe nedeniyle iletken uzunluğu ve enerji kayıpları nispeten düşüktür (Bhatt, 2003). Ancak, uzun mesafeli orta ve alçak gerilim hatları ile indirici şalt sahaslarından oluşan dağıtım şebekelerinde kayıplar daha yüksektir (Düzgün, 2018). Toplam iletim hattı kayıpları genellikle omik kayıplardan kaynaklanmakta olup, korona kayıpları da gerilim dalgalanmaları ile artabilmektedir ve bu kayıplar yılda iletilen enerjinin %2-3'ünü oluşturur (Bhatt, 2003). Gelecekte, süper iletkenlerin yüksek sıcaklıklarda kullanılmasıyla iletim kayıplarının azaltılması hedeflenmektedir (Zhang ve ark., 2021). Transformatörler, elektrik iletim ve dağıtım şebekesindeki ikinci en önemli teknik kayıp kaynağıdır. Malzeme bilimi alanındaki gelişmelerle, transformatör nüvesindeki demir kayıpları önemli ölçüde azalmıştır; modern transformatör verimlilikleri %90-99 aralığındadır (Wang ve Li, 2020). Ancak aşırı yüklenme ve harmonikler kayıpları artırmaktadır. Teknik kayıplar, elektrik devre

elemanlarındaki akıma bağlı ve bağımsız kayıplar olarak sınıflandırılır ve yük durumuna göre yüke bağlı veya bağılı olmayan kayıplar olarak ayrılır (Düzgün, 2018).



Şekil 2.3. Bir dağıtım ve iletim hattındaki hat uzunluğunun teknik kayıp ile ilişkisi

Şekil 2.3' deki grafikte veriler doğrultusunda yapılabilecek değerlendirmeye göre bir iletim ve dağıtım hattındaki teknik kaybın hat uzunluğu arttıkça teknik kaybın arttığını göstermektedir.



Şekil 2.4. Örnek trafo bölgesindeki abone tüketim ve teknik kayıp grafiği

Şekil 2.4' deki grafik örnek bir trafo bölgesindeki abonelerin tüketimi ile trafo giriş enerjisi arasındaki farkın teknik kayıplar ile ilişkisini gösteriyor. Abone tüketimi genel olarak stabil bir seyir izlerken, teknik kayıplar da belirli bir aralıkta kalıyor. Bu durum sistemin dengeli çalıştığını göstermektedir. Eğer kayıplar düzensiz veya ani artış

gösterseydi; iletim hatlarında veya trafoda bir sorun olabileceği sonucu çıkarılabilirdi. Mevcut durumda, trafo bölgesinde olağan dışı problem olmadığı söylenebilmektedir.

2.1.1. Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıplar

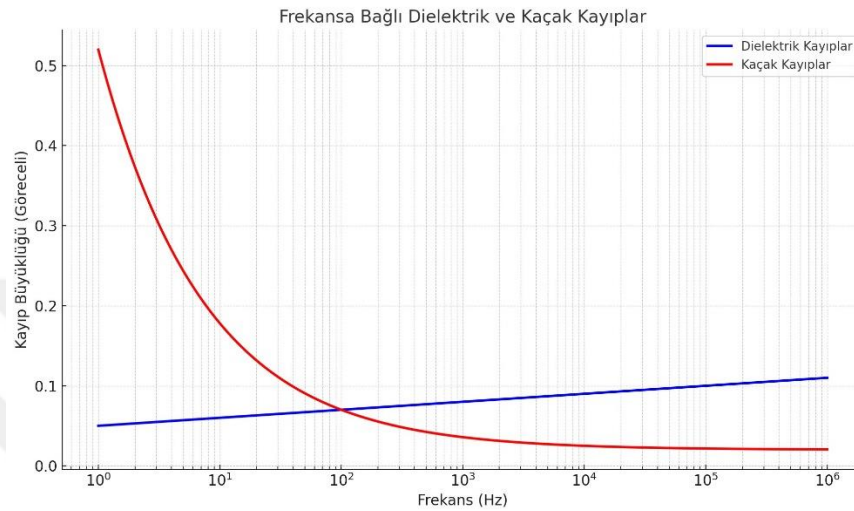
Üç fazlı bir transformatörde meydana gelen kayıplar genel olarak çekirdek kayıpları, bobin (bakır) kayıpları ve mekanik yapı (carpentry) kayıpları olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Zhou ve ark., 2021; Ali, Khan ve Mahmood, 2019).

- Çekirdek Kayıpları: Ferromanyetik çekirdekte meydana gelir.
 - Genellikle demir kaybı olarak adlandırılır ve bobinlerdeki bakır kayıplarından (veya I^2R kayıpları) ayrılır.
 - En çok histerezis kaynaklıdır; bu, uygulanan manyetik alana karşı gecikmeli mıknatıslanmadır. Histerezis kayıpları manyetik malzemenin doğasında vardır ve manyetik alanla doğru orantılı olarak artar, frekansla da yaklaşık lineer şekilde ölçeklenir. Açık devre koşulunda, çekirdekte en yüksek manyetik alanlar indüklendiğinden bu kayıplar maksimumdur.
 - Ayrıca, fuko akımları nedeniyle de kayıplar olabilir. Bu tür kayıplar genellikle lamine demir kullanımı sayesinde düşüktür. Ancak yine de çekirdeğin dış yüzeyleri, keskin köşeler veya sıkıştırma plakaları gibi maruz kalan bölgelerde fuko akımları oluşabilir.
- Bobin Kayıpları (Bakır Kayıpları): İletkenin elektrik direnci nedeniyle bobinlerde Joule ısıtması sonucu oluşur.
 - DC akımlarda Ohm kanunuyla hesaplanabilir. Ancak AC akımda skin etkisi ve yakınlık etkisi nedeniyle bu kayıplar ciddi şekilde artar.
- Mekanik Yapı Kayıpları (Carpentry Losses): Transformatörü destekleyen metalik yapılarda oluşur.
 - Bunlar, yapıya indüklenen fuko akımları nedeniyle meydana gelir.

2.1.2. Akımdan Bağımsız Kayıplar

Şebeke geriliminin neden olduğu bu kayıplar, dielektrik kayıpları ve kaçak akım kayıpları olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır ve şebeke enerjilendiği sürece sistemde varlığını sürdürür. Dielektrik kayıpları, enerji dağıtım sisteminin gerilim altında olması durumunda ortaya çıkar. Bu kayıplar, alçak ve orta gerilim tesislerinde güç faktörünü düzeltmek amacıyla yaygın olarak kullanılan kondansatörlerde göz ardı edilemeyebilir; ancak kabloların dielektrik kayıpları genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Kaçak akım

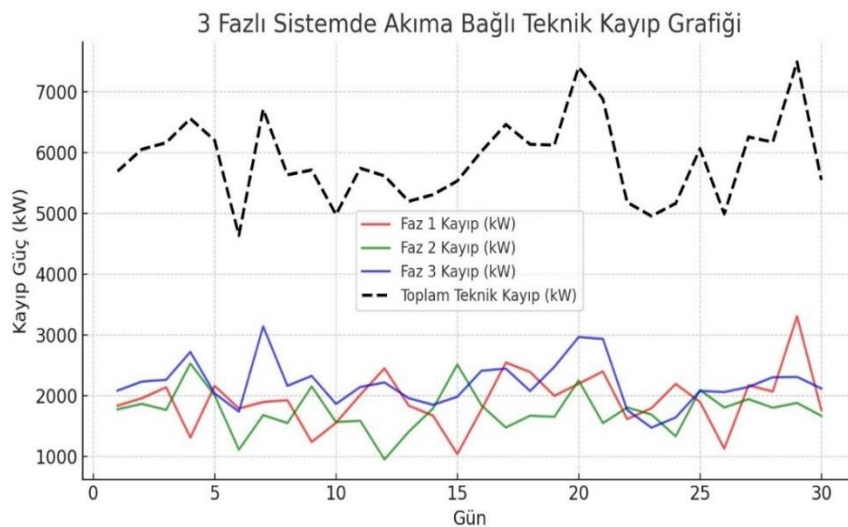
kayıpları ise, kablolardan geçen yük akımından bağımsız olarak meydana gelir. Bu kayıpların gerilimle doğru orantılı olduğu ve kayıp açısının ($\tan\phi$) bu kayıpları doğrudan etkilediği unutulmamalıdır (Yaşar, Aslan ve Biçer, 2010). Aşağıdaki Şekilde frekans eksenine bağlı olarak dielektrik ve kaçak kayıplarının büyüklüğü gösterilmektedir. Şekil 2.5' deki grafiğe bakıldığında, düşük frekansta kaçakların baskın olduğu, yüksek frekansta ise dielektrik kayıplarının artış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 2.5. Frekansa bağlı dielektrik ve kaçak kayıp ilişkisi

2.1.3. Akıma Bağlı Kayıplar

Bu kayıplar, akımın karesiyle orantılı olarak değişen ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkan kayıplardır. Enerji dağıtım sisteminde meydana gelen kayıpların önemli bir bölümünü oluştururlar. Kablo bağlantı klemenslerinde oluşan kayıplar, kablolardaki zırh ve ekran kayıpları ile karşılıklı reaktansın neden olduğu kayıplar, akıma bağlı kayıplar kategorisinde yer alır (Yaşar, Aslan ve Biçer, 2010).

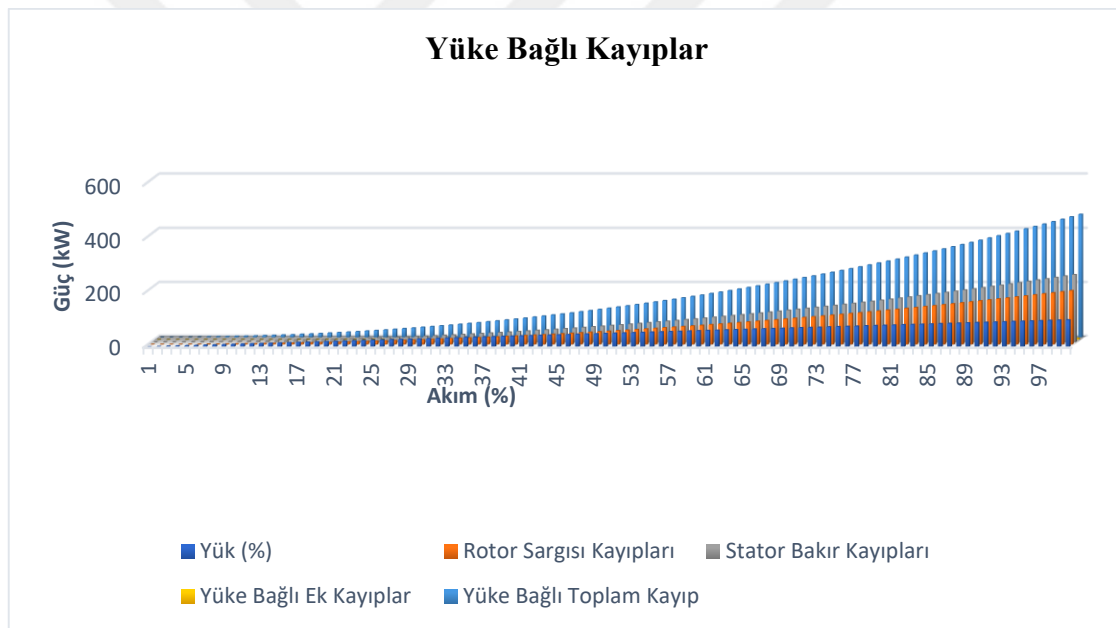


Şekil 2.6. Trafodan çekilen akıma göre örnek teknik kayıp grafiği

Şekil 2.6' daki grafik dengeli yüklenmiş bir sisteme ait olduğu söylenebilmektedir. Çünkü fazlar arasındaki kayıplar çoğunlukla dengeli olduğu görülmektedir. Fazlardan birinin grafiği çok farklı kayıp değerleri göstermiş olsaydı sistemde dengesizlik olduğu ve aşırı yüklenme veya herhangi bir arıza söz konusu olduğu çıkarımına varılabilirdi.

2.1.4. Yüke Bağlı Kayıplar

Şebekenin yüklenmesiyle ortaya çıkan ve yükün miktarına bağlı olarak değişen kayıplara yüke bağlı kayıplar denir. Bu kayıplar, transformatörler ve kablolardaki (bakır) kayıpları içerir. Yüke bağlı kayıplar, genellikle hatlarda, kablolarda ve transformatörlerin bakır kısımlarında meydana gelir ve taşınan elektrik enerjisinin miktarına göre değişiklik gösterir. Bu kayıplar, akımın karesiyle doğru orantılıdır (Yaşar, Aslan ve Biçer, 2010). Şekil 2.7' deki grafikte yüke bağlı kayıpların akımın karesi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

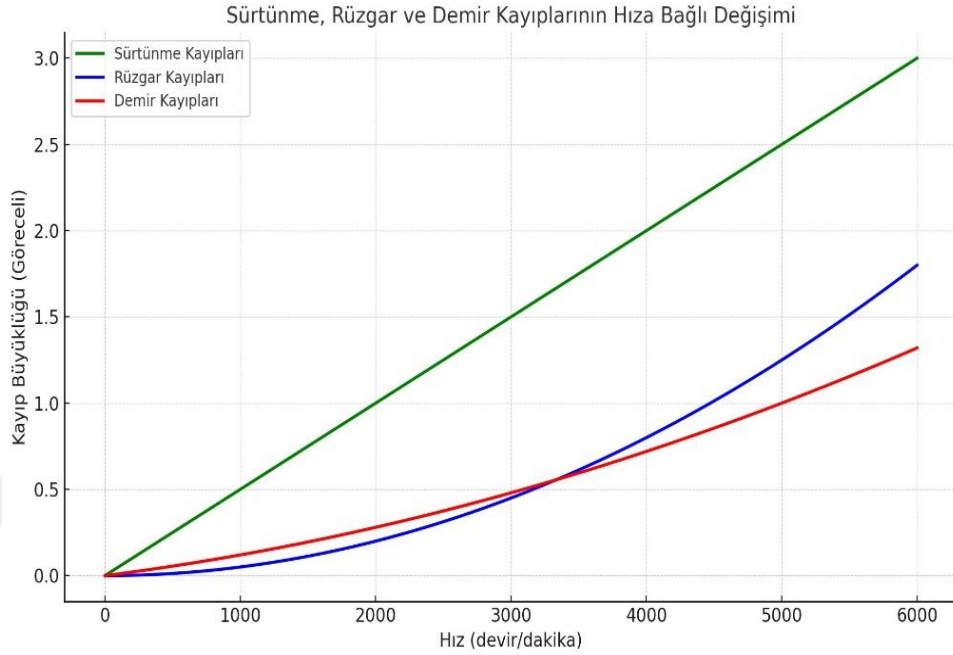


Şekil 2.7. Yüke bağlı kayıplar

2.1.5. Yüke Bağlı Olmayan Kayıplar

Yüke bağlı olmayan kayıplar, genellikle transformatörlerin çekirdeklerinde meydana gelir ve elektrik akımından etkilenmezler. Bu tür kayıplar, şebeke gerilim altında olduğu sürece, şebeke yüklü olsun veya olmasın her zaman ortaya çıkarlar. Büyüklükleri, şebeke yükünden tamamen bağımsızdır. Sürtünme ve rüzgâr kayıpları ile demir kayıpları, yükten bağımsız kayıplara örnek olarak verilebilir (Yaşar, Aslan ve Biçer, 2010). Şekil 2.8' deki grafikte sürtünme, rüzgâr ve demir kayıpları motor hızına

bağlı olarak değişmektedir. Motor hızı arttıkça büyüdüğünün fakat büyüme hızları ve etkileri farklı olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.8. Sürtünme, rüzgar ve demir kayıplarının hıza bağlı değişimi

2.2. Teknik Olmayan Kayıplar

Teknik olmayan kayıplar, elektriğin yaygın kullanımıyla birlikte ortaya çıkan uzun süredir devam eden bir problemdir (Depuru, Wang ve Devabhaktuni, 2011). Kaçak elektrik kullanımı; sayaçların tahrip edilmesi, sayaca müdahale edilmesi, dağıtım fiderlerinden izinsiz kablo çekilmesi ve tüketicilerin sayaç okuma mekanizmalarını manipüle etmesi gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleşmektedir (El-Saadany ve Salama, 2004; Depuru ve ark., 2011). Özellikle yüksek tüketimli işletmelerin etiketi değiştirmesi veya tarımsal sulama pompaları için dağıtım hattına doğrudan bağlanması sıkça rastlanan uygulamalardandır (Sultania ve Nema, 2011). Kaçak elektrik kullanımının temel nedenleri arasında ekonomik zorluklar, cezaların caydırıcı olmaması, okuryazarlık oranının düşüklüğü ve politik destek eksikliği bulunmaktadır (Depuru ve ark., 2011; Zulkernine ve Mohamed, 2018). Ayrıca, bu durum dağıtım şebekelerinde aşırı yüklenmeye, gerilim yükselmelerine ve buna bağlı olarak elektrikli cihazlarda hasara yol açan kesintilere neden olmaktadır (Düzgün, 2018; Hussain ve Mahmood, 2020). Kaçak elektrik tespiti için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir; bunlar arasında tüketim ile gözlem sayaçlarının karşılaştırılması, hat empedans analizleri, genetik algoritma ve destek vektör makineleri kullanılarak yük profillerinin analizi yer almaktadır (Mishra ve Tripathi, 2016;

Wang ve ark., 2019). Bu yöntemler kaçak kullanımı minimize etmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla giderek daha fazla tercih edilmektedir. Teknik olmayan kayıpların nedenleri çizelge 2.1' de özetlenmiştir. Çizelge' de izinsiz bağlantılar, ölçüm cihazlarıyla oynamak ve ödenmeyen faturaların kötü yönetimi, teknik olmayan kayıpların en önemli nedenleri arasında yer almaktadır. Sayaçların elektromekanik yapıda olmasından kaynaklanan kayıplar da teknik olmayan kayıplar kategorisine girmektedir (İbrahim, 1999).

Çizelge 2.1. Teknik olmayan kayıpların sebepleri (İbrahim, 1999)

Ölçülemeyen enerji	Faturalanamayan Enerji	
Tüketim kayıpları	Fatura hataları	Ödeme kayıpları
1) Yasadışı (izinsiz) bağlantılar	A) Yanlış müşteri dosyaları	A) Ödenmeyen faturalar
2) Ölçüm donanımlarının montajında gecikme	1) Sözleşme bilgilerinin yetersizliği	1) Dağıtılamayan faturalar
3) Ölçüm cihazlarıyla oynamak	2) Uygun olmayan ölçme katsayıları	2) Müşterilerin ödeme zorlukları
4) Hatalı ölçümler	3) Dosya güncelleme hataları	3) Uygun olmayan toplama prosedürleri
5) Etkin tüketimlerin çok düşük tahmin edilmesi	B) Yanlış fatura	4) Ödenmeyen faturaların kötü yönetilmesi
6) Hatalı bağlantılar	1) Yetersiz bilgiden ve takipsizlikten kaynaklanan ücretlendirilmemiş müşteriler	B) Ödeme yönetimi
7) Ölçüm cihazlarının uyumsuzluğu	2) Özel tarifleri ya da tarifersiz olan müşterilerin takipsizliği	
8) Hesaba katılmayan müşteriler	3) Faturalamada raporlamanın ve takibin eksik olması	1) Ödemelerin uygun olmaması
9) Endeks okuma hataları	4) Düzeltilmiş faturaların kontrolünün yapılmaması	2) Ödeme kayıpları

3. ELEKTRİK ENERJİSİNDEKİ KAYIPLARI ÖNLEME YÖNTEMLERİ

Elektrik enerjisindeki kayıpların azaltılması için teknik kayıplarda ve teknik olmayan kayıplarda çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler aşağıdaki alt başlıklarda anlatılmaktadır.

3.1. Teknik Kayıpların Azaltılması İçin Verimliliği Artırma Yöntemleri

Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde enerji verimliliğinin artırılması hem sistemsel performansın yükseltilmesi hem de teknik kayıpların azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, kullanılan iletken malzemelerin uzun ömürlü, düşük dirençli ve ısıya dayanıklı olacak şekilde seçilmesi; enerji akışında oluşabilecek direnç kaynaklı kayıpların önüne geçilmesinde etkili bir mühendislik uygulamasıdır (Yıldız ve Karakaş, 2021). Aynı şekilde, kablo ve kondansatör sistemlerinde kullanılan yalıtkanların çevresel koşullara ve sistem gerilim seviyelerine uygun olarak seçilmesi, izolasyon kaynaklı kayıpların minimize edilmesine katkı sağlamaktadır (Demir ve Ateş, 2020). İşletme geriliminin yükseltilmesi, belirli yük seviyelerinde iletim hatlarındaki akım miktarını azaltarak omik kayıpların düşürülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, uygun değerlerde seçilmiş ve doğru biçimde kurulan kompanzasyon panoları ile reaktif güç kontrolü sağlanmakta; bu durum da hem enerji kalitesini artırmakta hem de dağıtım sistemindeki yüklenmeleri azaltarak kayıpları önlemektedir (Erdem ve Uğur, 2022). Hatların boştta bırakılmaması, çift devreli sistemlerde yükün dengeli bir biçimde dağıtılması ve sistemin ihtiyacına uygun özelliklerde motor ve transformatör kullanımı da teknik kayıpların azaltılmasında etkili yöntemlerdir. Öte yandan, özellikle kırsal bölgelerde ekonomik ömrünü tamamlamış iletim hatlarında zamanla ortaya çıkan ilave kayıpların önlenmesi için bakım ve yenileme çalışmalarının zamanında ve etkili şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elektrik dağıtım şirketleri tarafından yürütülen düzenli bakım, iyileştirme ve modernizasyon faaliyetleri sayesinde sistem güvenilirliği artırılmakta, arıza sıklığı düşürülmekte ve enerji iletim sürekliliği sağlanmaktadır (ETKB, 2023). Bu bütünsel yaklaşımlar sayesinde teknik kayıpların minimize edilmesi mümkün olmakta ve ulusal ölçekte enerji verimliliği hedeflerine katkı sağlanmaktadır.

3.2. Teknik Olmayan Kayıpların PLC/Uzaktan Kontrol ile Önleme Yöntemi

Power Line Communication (PLC) tabanlı sayaç sistemleri, enerji izleme ve yönetiminde önemli teknolojik gelişmeler arasında yer almakta olup, özellikle kırsal

bölgelerde kaçak elektrik kullanımının azaltılmasında etkili bir araç olarak kullanılmaktadır (Yılmaz ve Kaya, 2021). Bu sistemler sayesinde sayaçlar, kullanıcıların doğrudan erişiminden uzaklaştırılarak, enerji temin edilen dağıtım direklerinin tepe noktalarına monte edilmekte; bu da sayaçlara yönelik müdahale girişimlerinin büyük ölçüde önüne geçmektedir. Uzaktan okuma yöntemi ile entegre edilen bu sistemler, veri iletişimini güvenli hale getirirken, kaçak kullanımın tespiti ve önlenmesinde etkili bir izleme sağlamaktadır (Çetin ve Arslan, 2019). Ayrıca, çok sayıda abonenin bulunduğu apartmanlar, kamu binaları veya kooperatif tipi yerleşim alanlarında, sayaçlar merkezi bir noktada toplanarak özel PLC panoları ya da güvenlik düzeyi artırılmış PLC kutuları içerisine yerleştirilmektedir. Bu uygulamalar, sayaçlara yönelik dış müdahaleleri azaltmakta ve denetim süreçlerini kolaylaştırmaktadır (Demirtaş ve ark., 2020). Bu sayede enerji yönetiminde şeffaflık artırılmakta, tüketim verileri düzenli şekilde takip edilerek kayıp-kaçak oranları daha güvenilir biçimde değerlendirilebilmektedir. Söz konusu teknolojik iyileştirmeler, yalnızca teknik denetim avantajı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kaçak enerji kullanımına karşı caydırıcılığı da artırarak, enerji piyasasında sürdürülebilirlik ve milli ekonomik kazanç açısından da olumlu sonuçlar doğurmaktadır (ETKB, 2022). Bu bağlamda, PLC sistemlerinin yaygınlaştırılmasıyla birlikte, kayıpların önlenmesi ve gelir tahsilatının güvence altına alınması yoluyla enerji sektöründeki verimlilik hedeflerine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

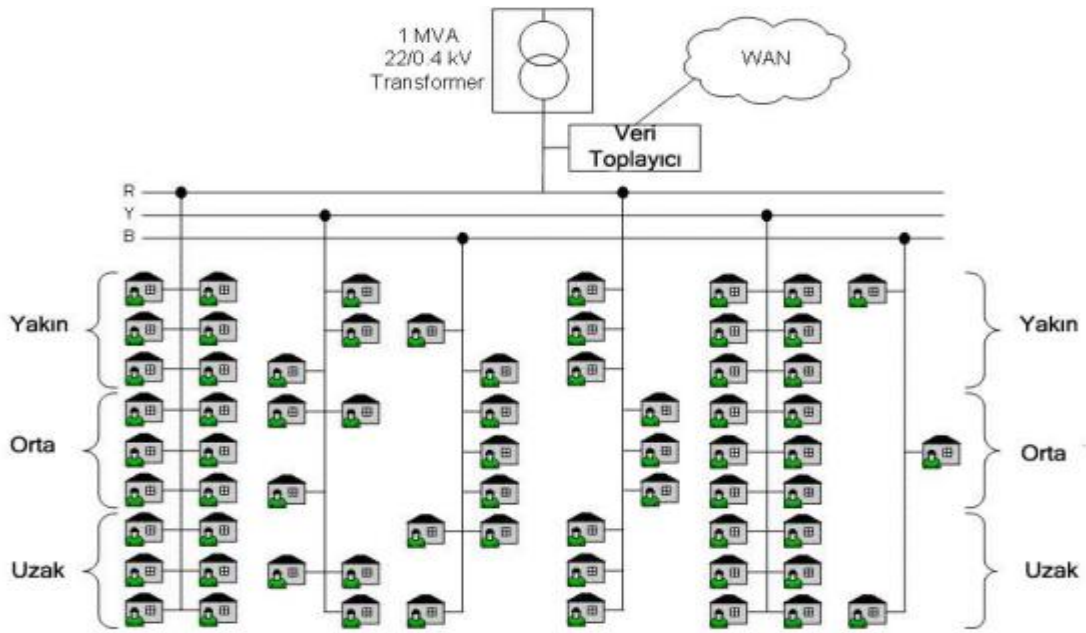
3.2.1. PLC Teknolojisi

Elektrik iletişim sistemleri, bant genişliğine göre üç temel kategoriye ayrılmaktadır: ultra dar bant, dar bant ve geniş bant (Galli ve ark., 2011). Ultra dar bant sistemleri, düşük frekanslı sinyallerle sınırlı veri iletimini (yaklaşık 100 bps) desteklemekte olup genellikle tek yönlü ve uzun menzilli (yüzlerce kilometreye kadar) haberleşme uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu özellikleri sayesinde özellikle yük kontrolü gibi uygulamalarda etkin bir rol oynamaktadır. Dar bant sistemleri ise Avrupa’da yaygın olarak 3 kHz ile 148,5 kHz aralığında çalışmakta olup, tek taşıyıcılı versiyonları birkaç Kbps seviyelerinde veri iletimine olanak tanırken, çok kanallı dar bant teknolojileri günümüzde 500 Kbps’ye kadar veri hızı sağlayabilmektedir. Geniş bant sistemleri daha yüksek frekanslarda (1,8-250 MHz) çalışmakta ve saniyede yüzlerce megabit veri transferi gerçekleştirebilmektedir. Bu bağlamda geniş bant üzerinden çalışan PLC (Power Line Communication) sistemleri, hızlı veri iletimi ve mevcut elektrik altyapısının etkin

kullanımı açısından en uygun haberleşme teknolojilerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Tüm bu teknolojik gelişmelere karşın, günümüzde elektrik enerjisi tüketiminin faturalandırılma süreçleri mevcut iletişim altyapılarıyla tam anlamıyla entegre olamamıştır. Bu nedenle PLC sistemlerinden yararlanmak giderek daha önemli hale gelmektedir. PLC teknolojileri, yalnızca veri iletimi değil aynı zamanda güç kalitesi izleme gibi işlevleri de bir arada sunabilmektedir. Örneğin, bu sistemlerde kullanılan modemler, iletişim aracı olmanın ötesinde aynı zamanda güç kalitesini izleyen sensörler olarak da kullanılabilir (Ribeiro ve ark., 2007). Bu çift işlevsellik, enerji izleme ve gelişmiş enerji yönetimi çözümlerinin tek bir sistem üzerinden yürütülmesine olanak tanır. Ayrıca, PLC sistemleri yedeklilik gerektiren uygulamalar için alternatif bir iletişim kanalı sunarak güvenilirliği artırmaktadır (Kasztenny ve ark., 2007). Ek olarak, PLC, elektrik şirketinin kontrolü altında bir iletişim kanalı sunar (Mlynek ve ark., 2015). Bu teknoloji, veri iletimi için özel kablolar döşeme zorunluluğunu ortadan kaldırarak elektrik hattı altyapısını kullanır (Rinaldi ve ark., 2015). Genel olarak, PLC' ler, güç şebekesi otomasyonu, kablosuz iletişime alternatif olarak akıllı sayaç bağlantıları ve ev otomasyonunda akıllı cihazların entegrasyonu gibi çeşitli akıllı şebeke uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Giustina ve ark., 2013; Mrozinski, 1991; Flammini ve ark., 2011; Alonso ve ark., 2000). PLC' nin şu anki en büyük dezavantajı, standartlaşmanın olmamasıdır. Fiber optik bağlantı teknolojileri, yüksek performanslı, güvenilir ve hızlı iletişim sunmalarına rağmen, maliyetlidir. PLC' ler, endüstriyel cihazlar ve bilgisayar sistemleriyle etkileşim kurarak süreçlerin kontrolünü sağlayan aygıtlardır. Modern PLC sistemleri; güç kaynağı, mikroişlemci, dijital ve analog giriş/çıkış modülleri ve iletişim birimlerinden meydana gelen modüler yapılara sahiptir (Stouffer, Falco ve Scarfone, 2011; Sharma, 2011). PLC' ler, Endüstriyel Kontrol Sistemleri'nin (EKS) önemli bir parçası olarak, çeşitli endüstriyel süreçlerin işletme kontrolünü üstlenir. Birçok endüstriyel uygulamada, sistem giriş verilerine dayanarak önceden programlanmış talimatları yürütmek için yaygın olarak kullanılırlar. Enerji sektöründe, PLC'ler genellikle akışkan hacmi, debi ve basınç gibi değişkenlerin kontrolünde rol oynar. Bu sistemler, belirlenen süreç sınırlarına göre girilen parametrelerle programlandığında, insan müdahalesi ihtiyacını azaltarak otomatik işletmeyi mümkün kılar (Stouffer, Falco ve Scarfone, 2011; Sharma, 2011). PLC'ler; sıralama, zamanlama ve sayma gibi önceden tanımlanmış işlevleri yerine getirmek için programlanabilir belleklerinde sakladıkları komutları çalıştıran mikroişlemciler içerir (Storr, 2014). Yapısal olarak oldukça esnekler ve yeni modüller eklenerek kolaylıkla genişletilebilirler. Ayrıca, yeniden

programlanabilir olmaları, sistemdeki donanımı değiştirmekten daha ekonomik çözümler sunar (Bolton, 2015). Kontrol mühendisleri, bu sistemleri açık veya kapalı döngü prensibine göre, hata tespiti ve saha cihazlarıyla iletişim kuracak şekilde yazılım desteğiyle programlar. 1993'te, kâr amacı gütmeyen Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), programlanabilir mantık denetleyicileri için uluslararası bir standart olan IEC 61131'i yayınladı. Bu standart; merdiven diyagramları, fonksiyon blok diyagramları, sıralı fonksiyon çizelgeleri, yapılandırılmış metinler ve komut listeleri gibi beş farklı programlama dilini kapsar (Galloway ve Hancke, 2013). Endüstriyel kontrol sistemleri (EKS), üretim ve kontrol süreçlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Modern altyapıların büyük bir kısmı, EKS tarafından yönetilmektedir. Ancak güvenlik açısından incelendiğinde, EKS'nin önemli bir bileşeni olan ve kritik işlevleri yerine getirerek insan hayatına büyük katkılar sağlayan PLC, dış ağlara ve özellikle internet tabanlı yapılarla açık bir mimaride yer almaktadır. PLC'ler, 1960'ların başından beri kullanılmakta olup, başlangıçta otomatik endüstriyel süreçlerin güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır. İlk tasarımlar yapıldığı dönemde, internet, tehdit unsurları ya da kötü amaçlı yazılımlar bulunmadığı için güvenli yazılım ve iletişim protokolleri de yoktu. Bu sebeple, güvenlik, EKS saha ekipmanları için bir gereklilik olarak görülmemekteydi. Sonuç olarak, EKS saha cihazları doğal olarak güvensizdir ve bu cihazlardan en önemlilerinden biri olan PLC'ler, saldırılara karşı savunmasızdır. Bir PLC'nin güvenilirliği, birçok bileşenin işleyişine ve bu bileşenler arasındaki iletişime bağlıdır. PLC'lerin temelini oluşturduğu EKS'lerin iletişimini kesintiye uğratmak isteyen saldırganlar, siber ortamdaki zayıf noktaları kullanarak sistem bileşenlerine, özellikle de yönetim birimlerine erişim sağlayabilir ve bu bileşenleri farklı cihazlar gibi yapılandırabilir ya da yanlış bilgiler göndererek sisteme ciddi zararlar verebilir. TCP/IP (İletim Kontrol Protokolü/İnternet Protokolü) protokolü kullanan geleneksel Ethernet ağlarının analizine yönelik çalışmalar artmaktadır. Bu çalışmalar, ağdaki veri paketlerinin yakalanması ve analiz edilmesinin, bir saldırı sırasında ya da sonrasında alınacak önlemler açısından büyük önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Yakalanan paketler doğru şekilde kaydedildiği sürece, saldırıların kaynağını belirlemek için tekrar tekrar incelenebilir. Günümüzde ağ analizi için kullanılan çeşitli paket yakalama ve analiz araçları bulunmaktadır, bunların çoğu TCP/IP protokolüne ait paketleri incelemeye odaklanmıştır. Ancak açık kaynak kodlu ve ticari ağ analiz cihazlarının yalnızca sınırlı bir kısmı, SCADA sistemleri gibi endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılan ModBUS, DNP3 gibi protokollerin analizine olanak tanımaktadır. Bu nedenle bu çalışmada,

EKS'lerin önemli bir bileşeni olan PLC cihazlarında kullanılan protokoller üzerinden güvenlik açıklarını tespit etmek amacıyla bir test ortamı (Testbed) oluşturulmuştur. Test ortamında, Ortadaki Adam (Man in the Middle-MitM), Hizmet Reddi (Denial of Service-DoS), Port Tarama ve Başlat/Durdur (Start/Stop) saldırıları kullanılarak endüstriyel kontrol sistemlerinin yönetim birimi olan PLC'nin güvenlik zafiyetleri değerlendirilmiştir. Sonrasında, gerçekleştirilen saldırılara ait veri paketleri yakalanarak analiz edilmiş ve saldırıların kalıpları çıkarılmıştır. Böylece, ağın saldırılardan en az zararla kurtarılması ve benzer saldırıların önlenmesi için etkili bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır (Gönen, 2018).



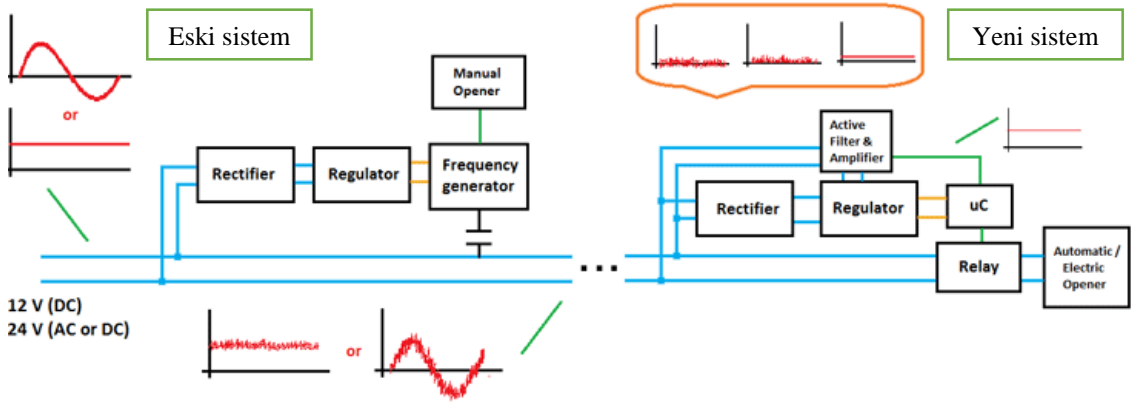
Şekil 3.1. PLC haberleşme topolojisi (Sivaneasan ve Gunawan, 2008)

PLC tabanlı haberleşme altyapısında istikrarın sağlanabilmesi için hızlı ve düşük maliyetli çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. PLC ile oluşturulan bir AMR sistemine ait ağ topolojisi ise şekil 3.1' de gösterilmektedir (Li, Hu, Huang ve He, 2008).

3.2.1.1. PLC Sisteminin Eski Sisteme Göre Karşılaştırılması

PLC (Power Line Communication), diğer tüm iletişim teknolojilerinde olduğu gibi bir gönderici (transmitter) ve bir alıcı (receiver) bileşenlerinden oluşur. Gönderici, iletilmesi gereken verileri modüle ederek güç hattı üzerinden iletirken; alıcı, gelen sinyali demodüle ederek analiz veya kontrol işlemleri için hazır hale getirir (Wang, Chen ve Sun, 2011). PLC sistemlerinin önemli avantajlarından biri, enerji iletiminde kullanılan mevcut kablolama altyapısı üzerinde veri iletimine de olanak tanınmasıdır. Bu sayede kullanıcılar,

güç hattına bağlı cihazları uzaktan izleme ve kontrol etme yeteneği kazanır (Mlynek, Koutny ve Misurec, 2010; IRJET, 2014). PLC teknolojisi, klasik sistemlere kıyasla daha düşük dalgalanma ve kararlı sinyal iletimi sağlar. Bu avantaj, sistemde kullanılan doğrultucu, filtre, mikrodenetleyici ve röle anahtarı gibi bileşenlerin koordineli çalışmasından kaynaklanmaktadır (Texas Instruments, 2024). Özellikle eski sistemlerde çıkış dalgalanmaları daha belirginken, PLC sistemleri daha stabil bir frekans çıktısı sunarak veri iletiminde doğruluk ve güvenilirlik sağlamaktadır (Wang ve ark., 2011). Şekil 3.2’deki diyagramda görüldüğü gibi, eski sistemde doğrultucu ve frekans jeneratörü kullanılarak istenen frekansın mümkün olduğunca kararlı bir çıktı elde edilmeye çalışılırken, çıktı üzerinde küçük dalgalanmalar meydana gelmekteydi. Buna karşın, PLC sistemi; röle anahtarının yardımıyla kararlı ve istenen değerde bir çıktı sağlayan filtre, mikrodenetleyici ve doğrultucu kullanılmaktadır. Sonuç olarak, veri iletimi daha doğru ve daha karardır ve iyi çıktı sinyalleri oluşmaktadır.

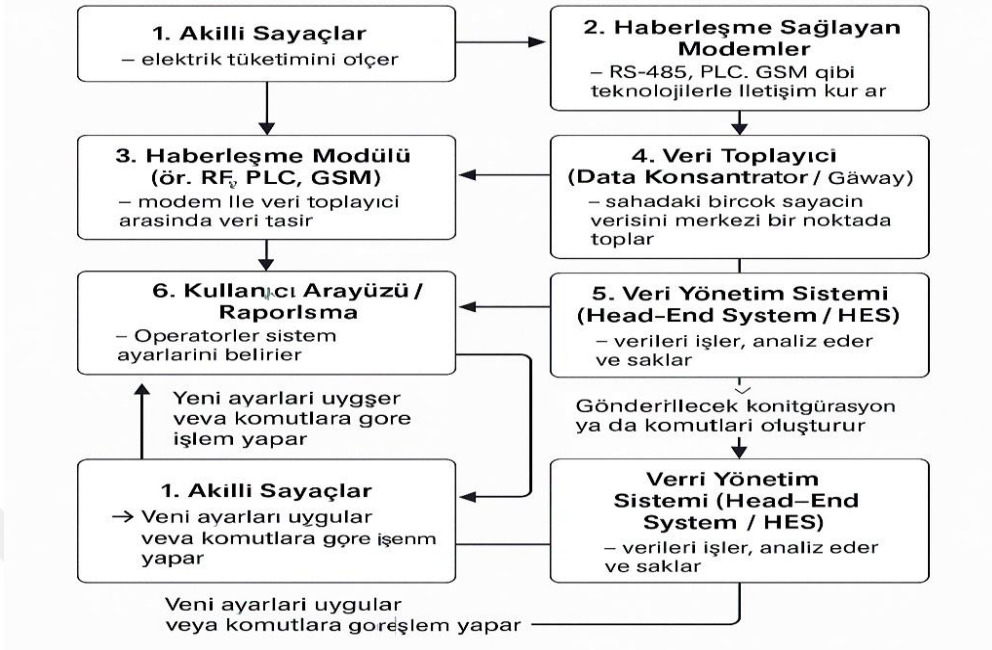


Şekil 3.2. PLC şebeke sisteminin eski sisteme göre kıyası (Pandit, 2019)

3.2.2. Akıllı Sayaçlar ve Haberleşmesi

Akıllı sayaçlar, elektrik tüketicileri ile enerji sağlayıcıları arasında GPRS (General Packet Radio Service), PLC (Power Line Communication) ve RF (Radyo Frekansı) gibi iletişim teknolojileri aracılığıyla çift yönlü veri alışverişi gerçekleştirebilmektedir. Bu sayaçlar, ödeme bilgilerini toplayabilmenin yanı sıra, anlık veri sağlayarak güç kalitesini izleme, elektrik kesintilerini tespit etme, sayaç manipülasyonlarını belirleme ve tüketim verilerini iletme gibi işlevleri yerine getirebilir. Bu özellikler sayesinde, arıza durumlarında ekiplerin doğru konuma daha hızlı bir şekilde yönlendirilmesi mümkün olur. Enerji yönetiminin daha etkin hale gelebilmesi için, dağıtım ağının uç noktalarına ne kadar fazla izleme ve kontrol donanımı entegre edilirse, şebekenin yönetimi de o kadar verimli olur. Tüketim alışkanlıklarımızı ayrıntılı olarak analiz eden ve bu verileri elektrik

dağıtım firmalarıyla paylaşarak arz-talep dengesinin sağlanmasına katkı sunan akıllı sayaçlar, akıllı şebeke sistemlerinin temel bileşenlerinden biridir (Eldem, 2017).



Şekil 3.3. Akıllı elektrik sayaçlarının operasyonel gösterimi

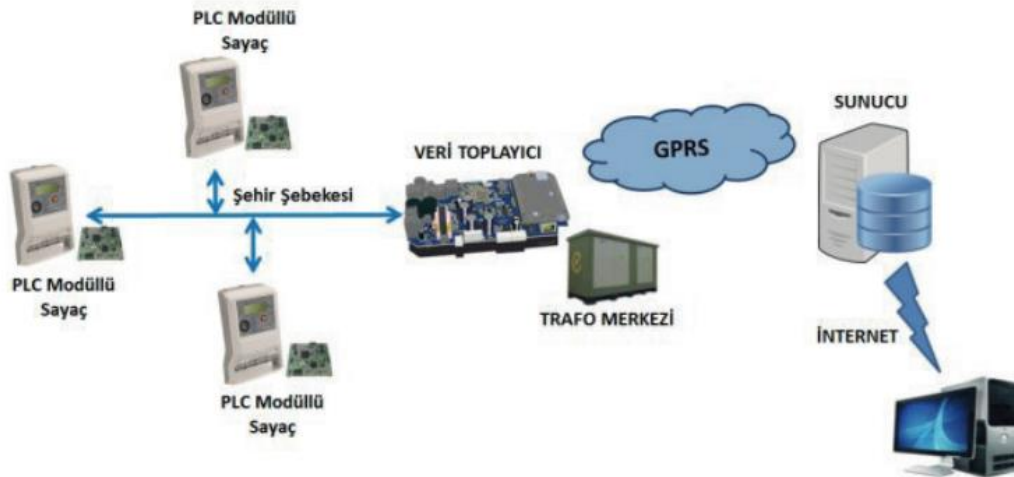
Akıllı elektrik sayaçları, elektrik enerjisinin üretiminden son kullanıcıya ulaşmasına kadar geçen süreçte çeşitli operasyonel amaçlarla kullanılacak geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Aktaş, 2021). Şekil 3.3'te sistemin operasyonel gösterimi verilmiştir. Şekil 3.4'te PLC modüllü akıllı elektrik sayacı gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.4. PLC modüllü akıllı elektrik sayacı (Kocaman, 2018)

Elektrik şebekelerinde veri iletiminin kullanılması uzun süredir uygulanan bir yöntemdir. Bu kullanımın erken örneklerinden biri, iletim hatlarında gerçekleştirilen uzaktan koruma (tele-koruma) sistemleridir. Bunun yanı sıra, uzaktan kontrol (tele-kontrol) ve ölçüm (telemetry) sistemleri de bu kapsamda değerlendirilebilecek sınırlı uygulamalardır. Zaman içinde ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ve elektrik

şebekelerinde aktarılmış verilerin kullanılma ihtiyacı, elektrik şebekelerinde veri iletişimini çok parlak konular arasına sokmuştur (Costa ve ark., 2001; Usta ve ark., 1998). Dijital bilgisayar sistemleriyle birlikte haberleşme teknolojilerindeki hızlı gelişim, düşük maliyetli veri iletimini mümkün kılarak elektrik şebekeleri için güçlü bir altyapı sağlamıştır. Bu gelişmeler, ölçüm, uzaktan okuma, izleme, koruma ve kontrol işlevlerini yerine getiren ekipmanların Akıllı Elektronik Cihazlar (AECr) olarak evrilmesini beraberinde getirmiştir. Elektrik piyasasının liberalleşmesiyle birlikte, şebekelerin verimli işletilmesi hedeflenirken; aynı zamanda düzenleyici otoriteler, şeffaflığı artırmak adına yeni yönetmelikler yayınlamaktadır. Bu durum, tüketici ile şebeke işletmecisi arasında çift yönlü bilgi akışını zorunlu hâle getirmiştir. Bu kapsamda, başta Avrupa olmak üzere birçok ülkede, elektrik sayaçlarının uzaktan okunabilmesi ve çift yönlü veri iletiminin sağlanabilmesi için elektrik şebekelerine entegre iletişim altyapılarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.



Şekil 3.5. Akıllı sayaç haberleşme altyapısı (Takmaz, 2014)

Uzaktan Sayaç Okuma Sistemleri (USOS), temelde SCADA mimarisinin bir alt uygulaması olarak değerlendirilebilir (IEEE, 1991). Şekil 3.5'te gösterildiği üzere USOS; Uzaktan Sayaç Okuma Merkezi (USOM), Veri Toplama Üniteleri (VTÜ), modem donanımlı dijital sayaçlar, web tabanlı erişim terminalleri ve bu bileşenler arasındaki veri iletimini sağlayan haberleşme altyapısından oluşur. Bu yapılar bütün olarak değerlendirildiğinde, USOS sistemleri aynı zamanda bir bilgisayar ağı yapısı sergilemektedir (Usta, Sonsuz ve Eksi, 2008). Dijital sayaçların kullanımıyla birlikte otomatik sayaç okuma (AMR) sistemleri geliştirilmiştir. İlk aşamada sayaçlar optik port veya RF yöntemiyle araç üzerinden okunuyordu (Duman ve Aydoğan, 2019; Güçlü,

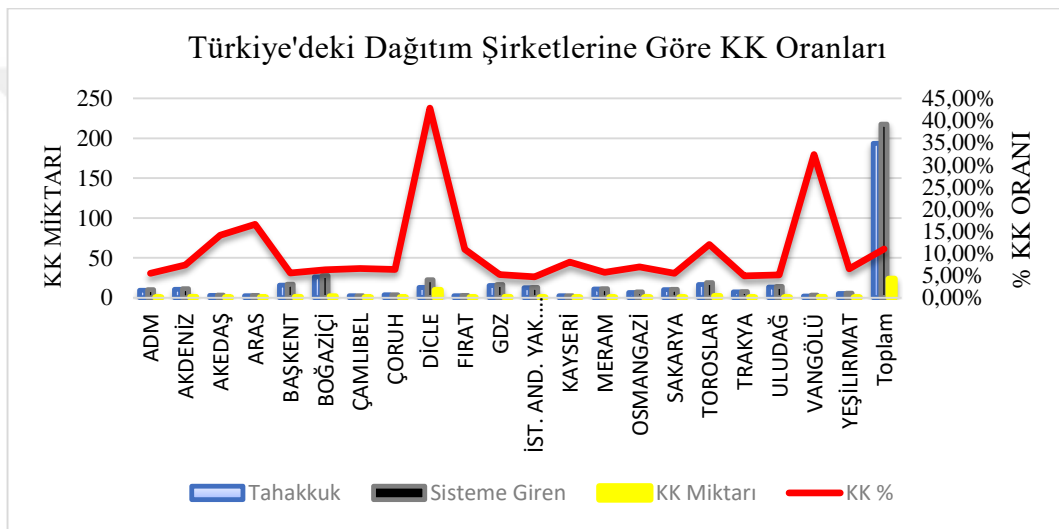
Bayrakçı ve Süzen, 2019). Daha sonra sayaçlara uzaktan kesme-yeniden bağlama fonksiyonları eklenerek yönetilebilirlik artırılmıştır (Ertaş ve Arslan, 2014). Günümüzde ise AMR, iki yönlü iletişim sunan ve enerji tüketiminin yanı sıra şebeke gerilimi, talep yönetimi gibi özellikleri içeren akıllı sayaç (AMI) sistemleri haline dönüşmüştür (Nane, Gök, Akyazı ve Aksoy, 2023; Karaca, 2023). Bu tür sistemler, uzaktan sayaç okumanın ötesinde, kod tabanlı sayaç yönetimi, veri analitiği ve talep tarafı yönetimi gibi gelişmiş işlevleri desteklemektedir (Karaca, 2023). Akıllı sayaçların bu işlevleri;

- Uzaktan elde edilen tüketim verileri üzerinden hızlı ve etkin faturalandırma yapılabilmesi,
- Abonelere ait sözleşme parametrelerinin uzaktan güncellenmesi,
- Tüketicilerin bilgilendirilmesi ve yönlendirilmesi,
- Tepe talep yükleri daha küçük zaman dilimlerine dağıtılarak tüketim yönetimi kolaylaştırılması,
- Kolay tarife yönetimi yapılması (esnek tarife, gerçek-zamanda fiyatlandırma, çok tarifeli fiyatlandırma vs.),
- Sayaç noktalarından alınan verilerle şebeke parametreleri sürekli olarak izlenebilmesi,
- Arıza ve kesinti bölgeleri uzaktan izlenebilmesi ve müdahale süreçlerinin daha hızlı planlanabilmesi,
- Mikro ölçekte yük atma ve tekrar devreye alma işlemleri gerçekleştirilebilmesi,
- Kaçak elektrik kullanımının takip edilmesi,
- Elektrik tüketim oranları belirli noktalarda gerçek zamanlı olarak karşılaştırılarak elektrik kayıp-kaçak oranı azaltılabilmesi,
- Elektronik ortamda aboneyle doğrudan iletişim kurulabilir; ticari kayıplar azaltılır, tahakkuk ve tahsilat oranları yükselir, şebeke işletme dengesi sağlanır, teknik kayıplar düşer ve hizmet kalitesinin artması,
- Tüketici bazlı yük profilleri oluşturularak tüketim davranışları analiz edilebilir,
- Yük ve talep yönetimi yapılması,
- İleriye yönelik planlamalar için istatistiksel bilgi toplanması, şeklinde ifade edilebilir.

3.3. Türkiye'deki ve Muş İlindeki Kayıpların İncelenmesi

Türkiye'deki dağıtım lisansının verildiği 21 bölgedeki en yüksek kayıp kaçak oranı ise yüzde 46,19'luk kayıp kaçak oranı ile birinci dağıtım bölgesini oluşturan ve

Diyarbakır, Batman, Siirt, Şırnak, Mardin ve Şanlıurfa illerini kapsayan Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.' ye aittir. Bu oranı %38,07'lik kayıpla Van Gölü Elektrik Dağıtım Şirketi ve %20,08'lik oranla ise Aras Elektrik Dağıtım Şirketi takip etmektedir (Alemdağ, 2023). Diğer dağıtım bölgelerindeki kayıp değerleri oransal olarak şekil 3.6'da gösterilmektedir. Kayıp kaçak oranının yüksek olması, bedelini ödeyerek elektrik tüketen hane halkları açısından elektrik birim maliyetinin artmasına yol açarak enerji yoksulluğu profilini derinleştirmektedir. Ayrıca kayıp kaçak oranının yüksekliği, tamamen düşük gelir düzeyine sahip ve faturalarını ödeyemeyen yoksul hane halkları yüzünden gerçekleşmemekte, gelir düzeyi ile alakasız bedava elektrik enerjisi tüketen hane halklarının varlığından da kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.6. Türkiye' de ki dağıtım bölgelerindeki kayıp oranları (Alemdağ, 2023)

Bölgelere göre kayıp değerlerinin miktarı çizelge 3.1' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Türkiye' de ki bölgelerin elektrik kayıp değerleri (MWh) (EPDK, 2019)

Bölge İsimleri	Kayıp Miktarı (Mwh)
İç Anadolu Bölgesi	1.875.533,00
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	6.378.530,46
Doğu Anadolu Bölgesi	2.140.649,89
Marmara Bölgesi	5.038.984,46
Ege Bölgesi	2.367.520,18
Karadeniz Bölgesi	1.043.230,58
Akdeniz Bölgesi	3.040.994,48
Toplam	21.885.443,05

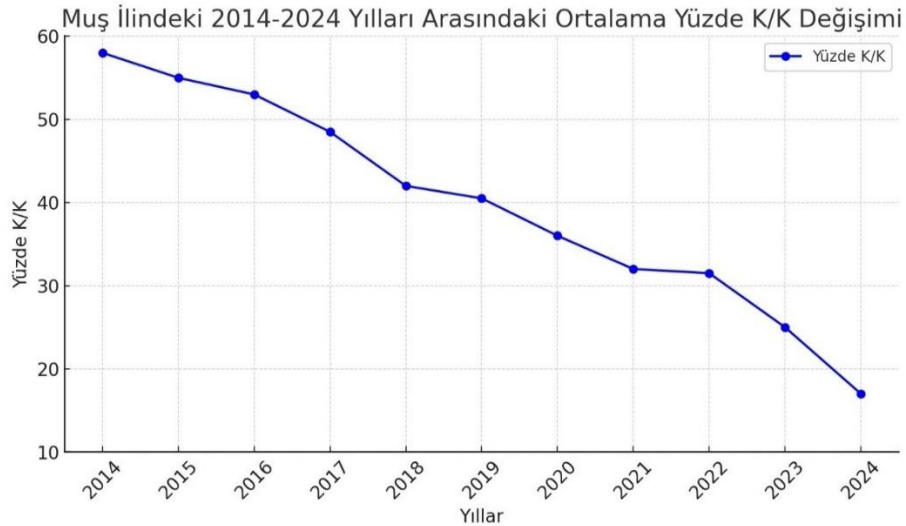
EPDK-Piyasa Gelişim Raporu, ülkemizin 2019 yılında toplamda faturalanan tüketim miktarını 229.597.913,65 (MWh) olarak açıklamıştır (EPDK, 2019). Çizelge 3.1' de

görüreceği üzere EPDK verilerine göre ülkemiz genelinde üretimdeki kayıp miktarı 21.885.443,05 (MWh) olup, yüzdelik oran olarak da %10,49'a denk gelmektedir. Yani ülkemizde kullanılan elektrik miktarının sadece %10,49'unun 'kayıp' olduğu nitelendirilebilir. Dünya ortalamasının %7-8 civarlarında olduğu düşünüldüğünde Türkiye'deki %10'luk kayıp oranı makul olarak görülebilir. Çünkü iletim hatlarının uzun ve şebekelerin eski, yenilenmemiş olmamasının bu kayıplarda payı olduğu gibi kayıp oranının hiçbir zaman %0 olmayacağı da bilinmektedir. Hiçbir trafo, hiçbir hat ne yaparsan yap sıfır kayıpla enerjiyi iletmez. Muş ilinin bağlı olmuş olduğu elektrik dağıtım şirketi olan Vedaş' ta 2020-2023 yılları arasında bağlı olan diğer illerin (Van, Bitlis, Hakkâri) toplam kayıp kaçak değerleri çizelge 3.2'de gösterilmektedir

Çizelge 3.2. Vedaş bölgesindeki illerin kayıp kaçak (2020-2023) verileri

YILLAR/ İLLER	2020	2021	2022	2023
	K/K	K/K	K/K	K/K
Bitlis	35,10%	29,82%	25,32%	24,03%
Hakkari	56,73%	55,64%	55,40%	52,16%
Muş	35,77%	33,42%	32,34%	25,09%
Van	45,45%	35,46%	32,20%	29,43%
Toplam	44,57%	38,07%	35,64%	32,35%

Muş ilindeki 2014 ve 2024 yılları arasındaki kk oranlarındaki yıl bazlı değişim grafiği şekil 3.7' de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Muş ili 2014-2024 yılları arası kayıp kaçak oranları

3.4. Muş İlindeki Kayıpların Azaltılması İçin Verimliliği Artırma Yöntemleri

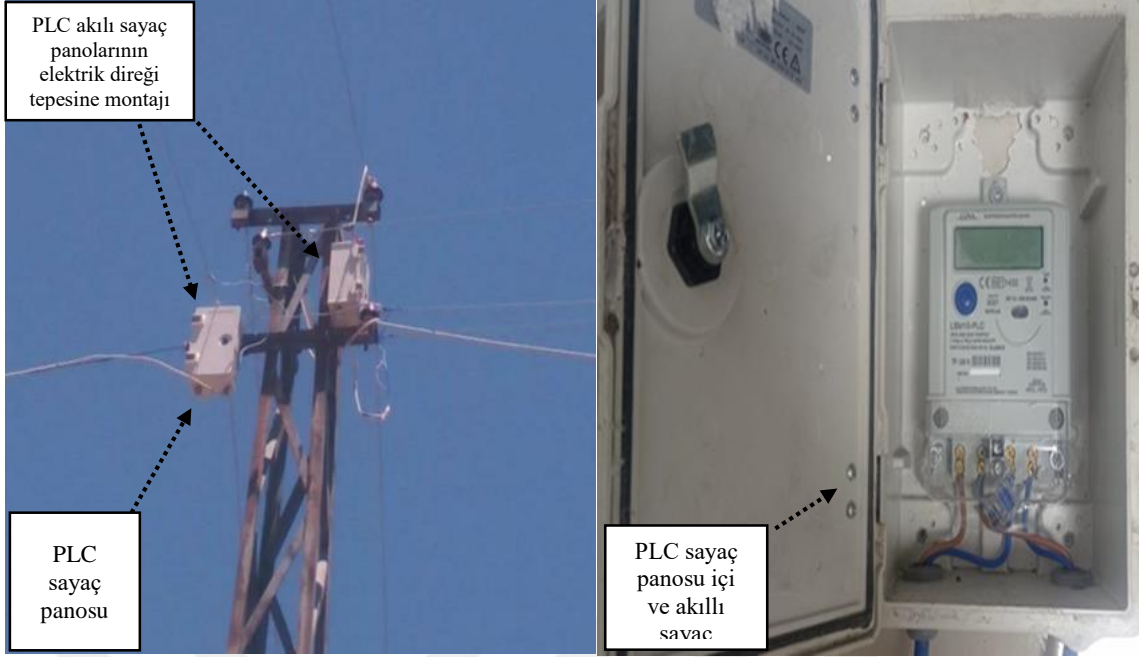
Muş ilindeki özellikle Bulanık ve Malazgirt ilçelerinde kaçak kullanımının çok yüksek olması ve elektrik hatlarının eski olması sebebiyle teknik kayıpların oranında

yükselmesi durumlarından kaynaklanmaktadır. Teknik olmayan kayıpların azaltılması için ilk olarak 2016 da Bulanık ilçesinde yapılmaya başlanan PLC çalışmasıyla birlikte sayaçların hem abonelerden uzaklaştırılarak müdahale edilmesinin önüne geçilmesi hem de kaçak kullananların sistem üzerinde tespit edilmesiyle ilgili yapılacak olan çalışmalarda önemli yer edinmiştir. Çizelge 3.3' te örnek olarak Bulanık ilçesinde yapılan PLC çalışması sonucu öncesi ve sonrası belirtilerek kaçak/kayıp değerleriyle PLC etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Bulanık ilçesinde yapılan PLC çalışması değişim sonuçları (Kocaman, 2018)

BULANIK		2016	2017	Değişim (kWh)	Değişim (%)
Ocak	Alınan Enerji	15.983.793	11.410.035	-4.573.758	-28,61
	Tahakkuk	3.642.655	5.125.400	1.482.745	40,71
	Kayıp Kaçak	77,21%	55,08%	-3.091.013	-22,13%
Şubat	Alınan Enerji	14.721.498	11.445.100	-3.276.398	-22,26
	Tahakkuk	4.372.403	7.049.470	2.677.067	61,23
	Kayıp Kaçak	70,30%	38,41%	-599.331	-31,89%
Mart	Alınan Enerji	13.968.146	7.752.980	-6.215.166	-44,50
	Tahakkuk	6.723.153	6.069.498	-653.655	-9,72
	Kayıp Kaçak	51,87%	21,71%	-5.561.511	-30,15%
Toplam 3 Aylık	Alınan Enerji	44.673.437	30.608.115	-14.065.322	-31,48
	Tahakkuk	14.738.211	18.244.368	3.506.157	23,79
	Kayıp Kaçak	67,01%	40,39%	-10.559.165	-26,62%

Çizelge 3.3' te Bulanık ilçesindeki, 2017 yılının Ocak, Şubat ve Mart aylarında alınan enerji bir önceki yılın aynı aylarına göre %31,48 oranıyla 14.065.322 kWh azalmıştır. Aynı dönemde tahakkuk edilen enerji, %23,79 artışla 3.506.157 kWh artmıştır. Benzer şekilde kayıp kaçak oranı %26,62 oranında azalmıştır (Kocaman, 2018). KK ile mücadele kapsamında Muş ilinde PLC sayaç montajları ile kaçak oranlarında bariz düşüşler yaşanmıştır. Bulanık ilçesi 2016, Malazgirt İlçesi 2018, Varto-Hasköy-Korkut 2020 ve Muş Merkez ilçesi 2023 yılında PLC sayaç değişimi kapsamında çalışmalar başlatılmıştır. Şekil 3.8' de Muş ilinde PLC çalışması yapılan dağınık abonelerin bulunduğu kırsal bölgelerde akıllı sayaçların elektrik direğinin tepesine montajı gösterilmektedir. Bu şekilde kullanıcıların sayaca müdahale etmesi engellenerek sayaca müdahale ile yapılan kaçak kullanımının önüne geçilmesi açısından büyük oranda azalma gerçekleşmiştir.



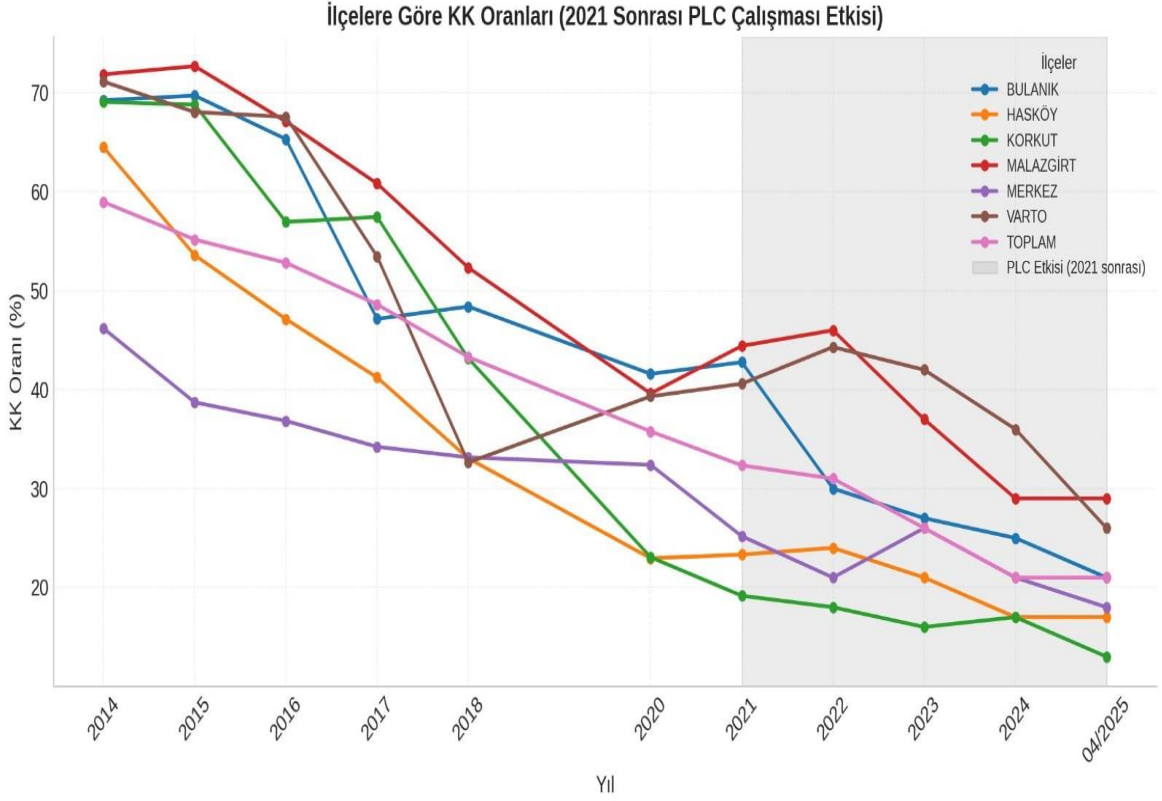
Şekil 3.8. Kırsal kesimlerde sayaçların direklerin üzerine taşınması

Abonelerin dağınık olmadığı merkezi alandaki toplu yerlerde ise genellikle PLC box panolar kullanılmaktadır. Şekil 3.9’ de çoklu sayaçların bulunduğu PLC box pano montajı gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Toplu sayaçların bulunduğu merkezi yerdeki PLC sayaç panosu (Elektrik Mühendisleri Odası, n.d.)

Bu çalışmalar doğrultusundaki PLC sayaç çalışmasının kayıp kaçak üzerindeki etkisini gösteren şekil aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Muş ilindeki ilçelerin 2014-04/2025 arası kk oranları ve 2021 sonrası kk PLC etkisi. Şekil 3.10' daki grafikte ilçelere ait KK oranlarının yıllara göre değişimi gösterilmektedir. 2021 yılı itibarıyla birçok ilçede belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüş, aynı dönemde başlayan PLC uygulamalarının etkisiyle ilişkilendirilebilir. Uygulama sürecinde yaşanan kullanıcı uyum sorunları veya sistem değişikliklerine adaptasyon gibi sebepler kısa vadede oranların düşmesinde etkili olduğu söylenebilir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

Elektrik dağıtım sistemlerinde kayıp-kaçak oranlarının tahmini, enerji yönetiminin en önemli bileşenlerinden biridir. Bu bağlamda, zaman serisi analizinde son yıllarda öne çıkan Long Short-Term Memory (LSTM) modelleri, özellikle düzensiz ve dalgalı tüketim verilerinde sağladığı yüksek doğruluk oranları sayesinde tercih edilmektedir. Literatürdeki güncel çalışmalar, LSTM tabanlı modellerin geleneksel istatistiksel yöntemler ve diğer makine öğrenmesi algoritmalarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük hata oranları sunduğunu ortaya koymaktadır.

4.1. LSTM'nin Zaman Serisi Modelleme Performansı

LSTM modelleri, klasik ARIMA, SARIMA gibi istatistiksel modellere kıyasla uzun vadeli bağımlılıkları daha etkin şekilde yakalayarak tahmin başarısını artırmaktadır. Duan, Hu ve Zhang (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, tünel deformasyonu zaman serileri üzerinde LSTM ve ARIMA karşılaştırılmış; LSTM modeli, RMSE açısından daha düşük hata ile üstünlük sağlamıştır (Duan ve ark., 2023). Benzer şekilde, Siami-Namini, Tavakoli ve Namin (2019), finansal veri setlerinde LSTM'nin ARIMA ve GRU'ya göre %84–87 oranında daha düşük hata sunduğunu belirtmiştir (Siami-Namini ve ark., 2019). Ayrıca Livieris, Pintelas ve Pintelas (2021), enerji fiyat tahmini üzerine yürüttükleri çalışmada LSTM'in %10 oranında daha düşük hata verdiğini bildirmiştir (Livieris ve ark., 2021).

4.2. LSTM'nin Alternatif Yöntemlerle Karşılaştırılması

XGBoost, Prophet, SARIMA gibi modeller de kısa dönem tahminlerde kullanılmaktadır. Ancak genel bulgular, bu modellerin uzun vadeli tahminlerde LSTM kadar etkili olmadığını göstermektedir. Makridakis, Spiliotis ve Assimakopoulos (2018), kısa dönem için XGBoost'un avantajlarını ortaya koyarken (Makridakis ve ark., 2018), Smyl (2020) hibrit yaklaşımların (örneğin SARIMA–LSTM, LSTM–XGBoost) klasik modellere göre daha düşük hata sunduğunu vurgulamıştır (Smyl, 2020). Bu hibrit yapılar, özellikle yüksek volatiliteye sahip serilerde model başarısını artırmaktadır.

4.3. Elektrik Kayıp-Kaçak Uygulamalarında LSTM Kullanımı

Elektrik dağıtımında kayıp-kaçak tespiti, özellikle kaçak kullanımın önlenmesi açısından kritik bir konudur. LSTM ve türev modeller, burada yüksek doğruluk oranları ile öne çıkmaktadır. PeerJ Computer Science (2024) tarafından yayımlanan bir çalışmada,

RNN–BiLSTM–CRF modeli günlük ve haftalık tüketim verileri üzerinden uygulanmış ve geleneksel modellere kıyasla daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir (PeerJ, 2024). Ayrıca Li, Chen ve Huang (2023) tarafından geliştirilen CNN–LSTM tabanlı model, farklı türdeki hırsızlık tiplerini sınıflandırmada yüksek başarı sağlamıştır (Li ve ark., 2023). PubMed (2025) kaynaklı başka bir çalışmada ise CNN–LSTM mimarisi kullanılarak %97 doğruluk, %98,75 precision, %95,45 recall ve %98,75 F1-score elde edilmiştir (PubMed, 2025).

4.4. LSTM'nin Bölgesel Tahminler İçin Uygunluğu

LSTM, zamana bağlı ve mevsimsel desenler içeren serilerde; sosyal, iklimsel ve ekonomik verilerin de dahil edilmesiyle genişletilebilecek yapısı sayesinde bölgesel analizlerde güçlü bir alternatif sunmaktadır. Jokar, Arianpoo ve Leung (2016) ile Rassaei ve Khalilzadeh (2022) gibi çalışmalar, CNN–LSTM kombinasyonunun enerji hırsızlığının tespitinde %96'nın üzerinde doğruluk verdiğini belirtmiştir (Jokar ve ark., 2016; Rassaei ve Khalilzadeh, 2022). Bu durum, LSTM modellerinin hem esnekliğini hem de çok değişkenli veriye adaptasyon kabiliyetini göstermektedir.

4.5. Yöntem Seçiminin Gerekçesi

Yukarıda özetlenen literatür, LSTM modellerinin hem doğruluk hem de genelleme açısından kayıp-kaçak tahminine uygun olduğunu göstermektedir. LSTM'nin uzun vadeli bağımlılıkları yakalama kabiliyeti, gürültülü ve karmaşık verilerdeki başarısı ve hibrit yapılara uygunluğu nedeniyle, bu tezde 2030 yılına kadar Muş ili özelinde kayıp-kaçak tahmini için LSTM tabanlı bir model tercih edilmiştir.

5. MATERYAL ve METOD

Tez çalışmasında bu bölümde çalışmayla ilgili transformatör de oluşan kayıpların modellenmesi yapılarak kayıp analizleri ile LSTM (Long Short-Term Memory) yöntemi kullanılarak Muş ilinin kayıp kaçak verilerinin tahmin edilmesi yöntemi ile analizler yapılmış olup kayıp kaçak konusunda alınması gereken aksiyonlara kaynak oluşturması hedeflenmiştir.

5.1. Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıpların Modellemesi

- Bir trafonun farklı bölümlerindeki kayıpların doğru anlaşılması ve kontrolü, verimli bir tasarım için temel olup, çekirdek, konstrüksiyon ve sargıların boyutlandırılmasıyla müşteri gereksinimlerini karşılayan ve maliyetleri minimize eden çözümler sunar.
- Bu modelin amacı, güç transformatörlerinde elektriksel büyüklüklerin tahmini için tipik simülasyon kurulumlarını sunmaktır. Bu kapsamda:
 - Standart testler (örneğin kısa devre ve açık devre testleri)
 - Farklı test koşullarında trafonun farklı bölgelerinde oluşan kayıpların kökenlerinin değerlendirilmesi

Çizelge 5.1'de Comsol uygulamasında yapılan trafo modelleme analizleri anlatılmaktadır.

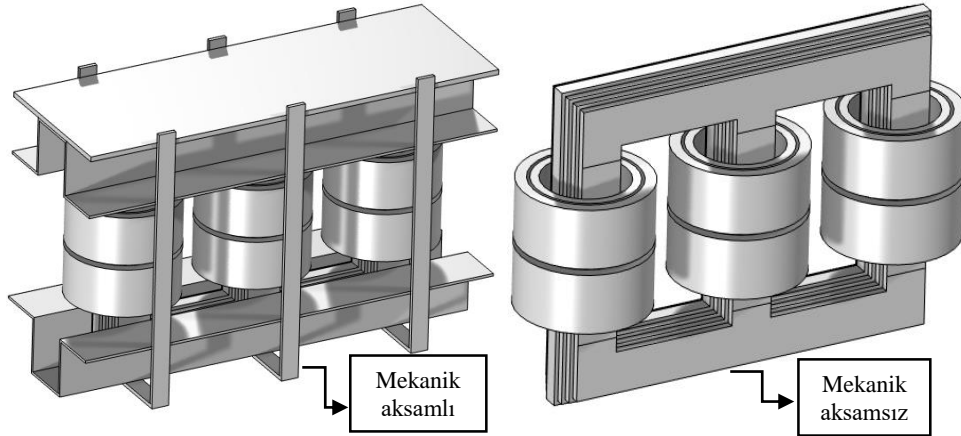
Çizelge 5.1. Modellemede yapılan analizler

Yapılan Analizler
Frekans alanında manyetik analizler şunları çıkarmak için: <ul style="list-style-type: none"> • Toplu elektrik ve manyetik parametreler • Kayıplar
3B modelde tüm nüve ve konstrüksiyon modellenmiş, sargılar ise homojenleştirilmiştir
İlgili büyüklükleri elde etmek için açık devre ve kısa devre testleri uygulanmıştır

Üç fazlı güç transformatörleri, elektrik enerjisinin verimli bir şekilde iletimi için dünya genelindeki enerji şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek fazlı transformatörlere göre kapasite, yük dengesi ve verimlilik açısından önemli avantajlar sunsalar da bu sistemlerdeki kayıpların hesaplanması daha karmaşıktır. COMSOL Multiphysics® yazılımı kullanılarak, transformatör çekirdeğinde, sargılarda ve yapısal bileşenlerde oluşan kayıpların yanı sıra birincil ve ikincil endüktans gibi temel yığılmış parametreler güvenilir bir şekilde hesaplanabilmektedir. COMSOL Multiphysics, birden fazla fiziksel olayın bir arada incelenmesi gereken karmaşık sistemleri analiz etmek için

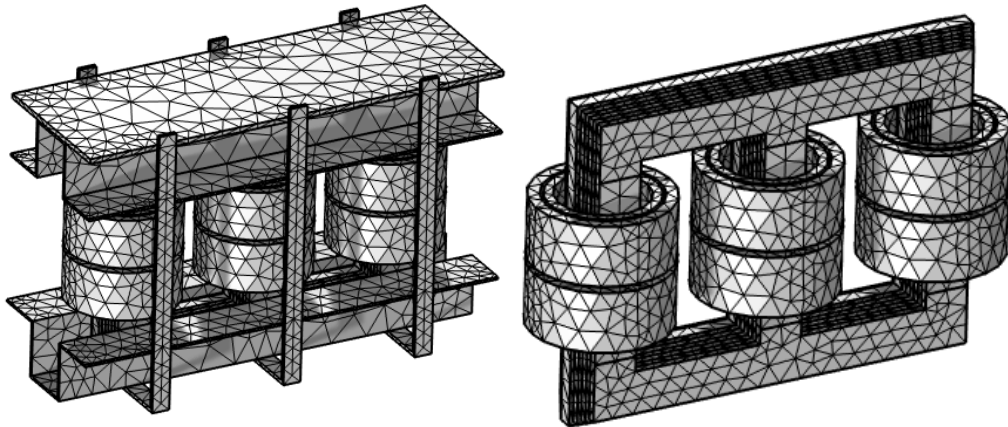
kullanılan gelişmiş bir simülasyon yazılımıdır. Mühendislik, fizik ve uygulamalı bilimler gibi alanlarda, hassas modelleme ihtiyacı duyulan araştırma, tasarım optimizasyonu ve performans değerlendirmelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Salkim, Shiraz ve Demosthenous, 2019; Salkim ve ark., 2022). COMSOL' ün temelinde, fiziksel büyüklüklerin zaman ve mekâna bağlı olarak nasıl değiştiğini tanımlayan kısmi diferansiyel denklemleri (PDE) çözebilme yeteneği yatar. Bu sayede ısı transferi, akışkanlar mekaniği, yapısal gerilmeler, elektromanyetik alanlar ve kimyasal tepkimeler gibi birçok fiziksel süreci modellemek mümkündür. Yazılımın en öne çıkan özelliklerinden biri, bu farklı fiziksel olayların aynı ortamda birbirleriyle kolayca etkileşimli şekilde modellenbilmesidir. Örneğin, elektrik akımının neden olduğu ısınma ya da elektromanyetik alanların yapısal gerilim üzerindeki etkisi gibi karmaşık senaryolar COMSOL Multiphysics yazılımı ile çoklu fiziksel alanların eş zamanlı simülasyonuna olanak tanır (COMSOL, n.d.). Elektrik tesisatı tasarımı için kullanıldığında COMSOL, kablolar, şalterler, bara sistemleri, anahtarlama elemanları ve topraklama gibi bileşenlerin gerçek çalışma koşulları altında modellenmesine olanak tanır. Bu sayede gerilim düşümü, akım dağılımı, yalıtım davranışı ve elektromanyetik girişim gibi parametreler detaylı şekilde analiz edilebilir. Ayrıca, kayıp modellemesi elektrik sistemlerinin verimliliği ve güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. COMSOL sayesinde trafo kayıpları analiz edilebilir. Bu kayıplar farklı yüklemeye senaryoları ve çevresel koşullar altında modellenerek, malzeme seçimi, sistem konfigürasyonu ve güvenlik önlemleri optimize edilebilir. COMSOL' ün grafiksel arayüzü, kullanıcıların üç boyutlu geometriler oluşturmasına, gerçekçi malzeme özellikleri atamasına, sınır koşullarını tanımlamasına ve sonuçları detaylı grafikler ve verilerle analiz etmesine olanak sağlar. Bu entegre yaklaşım, bina, sanayi tesisi veya enerji sistemleri gibi farklı alanlardaki elektrik tesisatlarının verimli, güvenilir ve güvenli bir şekilde tasarlanması için büyük bir avantaj sunar. Transformator tasarımında kayıpların etkin şekilde kollara dağıtılması, güvenlik ve işletme güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu konuda yapılacak ihmal hem yasal yaptırımlara hem de ciddi kazalara yol açabilir. Bu nedenle Muş ilinde bulunan örnek transformatorün elektriksel özellikleri baz alınarak sistem üzerinde bulunan mekanik kayıplar COMSOL kullanılarak incelenmiştir. Çoklu fizik (multiphysics) simülasyonu kullanarak, üç fazlı bir güç transformatorünün bireysel bileşenlerindeki kayıpları yüksek doğrulukla hesaplanabilir. Bu, özellikle Ar-Ge'nin test aşamasında büyük fayda sağlar. Simülasyon sonuçlarına dayanarak, geometrik parametreler ile sargı

kalınlığı gibi diğer değişkenler üzerinde deneyler yapılabilir ve minimum kayıpla en uygun performansa sahip transformatörler tasarlanabilmektedir.



Şekil 5.1. Transformatörün mekanik aksam varken ve yokken 3B model gösterimi

Transformatörün 3B modeli COMSOL da elde edildi. Elde edilen şekillerin gösterimi şekil 5.1'de gösterilmektedir. Daha sonra magnetik simülasyon için gerekli olan materyallerin özellikleri COMSOL da bulunan kütüphaneden çekilerek modellemede böylelikle ikinci adım tamamlanmış oldu. Fizik olarak magnetik alan simülasyonu seçilerek iletken ve yalıtkan kısımlar belirlendi. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere mesh uygulanarak 3B transformatör küçük parçalara ayrılarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 3B model magnetik simülasyon için hazır hale getirilmiş oldu.



Şekil 5.2. Transformatörün mesh kullanılarak çözüme hazır hale getirilmesi

5.2. LSTM (Long Short-Term Memory)

LSTM (Long Short-Term Memory), uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme kapasitesine sahip özel bir yapay sinir ağı türüdür. Tekrarlayan sinir ağlarının (RNN) gelişmiş bir sürümü olan LSTM, özellikle zaman serileri ve sıralı veri türleri (örneğin metin, ses veya finansal veriler) üzerinde uzun süreli ilişkileri etkili bir şekilde

modelleyebilir. Bu mimarinin temel gücü, geçmiş bilgileri unutma veya hatırlama mekanizmaları sayesinde seçici bir biçimde işleyerek önemli verilerin korunmasını sağlamasından gelir. Bu yetenek, LSTM' yi zaman serisi analizi, doğal dil işleme ve konuşma tanıma gibi birçok alanda ön plana çıkarmıştır (Hochreiter ve Schmidhuber, 1997). Klasik RNN, kısa süreli bağımlılıkları öğrenmede başarılı olsa da uzun dizilerdeki ilişkileri yakalamakta zorluk çeker ve sıklıkla vanishing gradient olarak bilinen gradyan kaybı problemiyle karşılaşır. LSTM mimarisi, bu sorunun üstesinden gelmek için "kapı" mekanizmalarını kullanır. Bu yapılar, hücre durumu olarak adlandırılan özel bir bellek yapısı üzerinde bilginin ne zaman tutulacağı ne zaman silineceği ve ne zaman çıktı olarak kullanılacağına dair kararları esnek bir biçimde verir (Tombaloğlu ve Erdem, 2021; Tuğal, 2024). LSTM mimarisinde yer alan unutma kapısı, geçmişten gelen bilgilerin hangi kısmının korunup hangi kısmının atılacağına karar verir. Giriş kapısı, yeni verilerin hücre belleğine ne ölçüde dahil edileceğini denetlerken; çıkış kapısı, hücrede tutulan bilgilerin bir sonraki adıma ne şekilde aktarılacağını belirler. Bu üç kapı, sigmoid ve hiperbolik tanjant (tanh) aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla bilgi akışını hassas biçimde yönetir. Örneğin, bir hisse senedi fiyatının öngörülmesinde, LSTM geçmiş fiyat hareketlerini belleğinde tutarak kısa süreli dalgalanmaları ayıklayabilir ve uzun vadeli eğilimleri daha sağlıklı şekilde analiz edebilir. Bu mimari, özellikle zaman içinde gelişen olaylar arasında nedensel ilişkilerin önemli olduğu uygulamalarda yüksek başarı sağlar (Bamisile ve ark., 2022). LSTM hücrelerinin gerçekleştirdiği işlemler, aşağıda verilen denklemlerle ifade edilmektedir. Giriş kapısı i_t , o anda gelen yeni bilginin hücre durumuna ne ölçüde ekleneceğini belirler. Bu işlem, aday hücre durumu c_t^* ile birlikte değerlendirilerek belleğe kaydedilecek içeriği tanımlar. Unutma kapısı f_t ise, bir önceki zaman adımındaki hücre durumunda $t - 1$ bulunan hangi bilgilerin korunacağı ya da silineceğine karar verir. Çıkış kapısı o_t , hücrede tutulan bilginin ne kadarının o anki gizli duruma h_t yansıtılacağını kontrol eder (Livieris ve ark., 2020).

$$i_t = \sigma(U_i x_t + W_i h_{t-1} + b_i) \quad (1)$$

$$f_t = \sigma(U_g x_t + W_g h_{t-1} + b_g) \quad (2)$$

$$c_t^* = \tanh(U_c x_t + W_c h_{t-1} + b_c) \quad (3)$$

$$c_t = g_t \odot c_{t-1} + i_t \odot c_t^* \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(U_o x_t + W_o h_{t-1} + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \quad (6)$$

Denkleimde kullanılan terimler şu şekilde tanımlanır: x_t , mevcut giriş vektörünü; W_* ve U_* , sırasıyla giriş ve geçmiş durumlara ait ağırlık matrislerini; b_* , önyargı (bias) vektörlerini temsil eder. Aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid σ kullanılırken, \odot simgesi öge bazlı (element-wise) çarpma işlemi ifade etmektedir. Hücre durumunun çıktısını oluşturan gizli durum h_t ile hesaplanmaktadır (Karbasi ve ark., 2024).

5.2.1. Hareketli Ortalama (Moving Average)

Hareketli ortalama, zaman serisi verilerindeki kısa vadeli dalgalanmaları yumuşatarak uzun vadeli eğilimi (trend) belirginleştiren istatistiksel bir tekniktir. Özellikle finans, ekonomi ve mühendislik alanlarında, verideki gürültüyü azaltmak ve temel kalıpları ortaya çıkarmak için yaygın olarak kullanılır. Belirli bir pencere boyutu (örneğin 5 gün veya 12 ay) seçilerek, bu pencere içindeki verilerin ortalaması alınır ve pencere zaman içinde ilerletilir. Bu yöntem, ani sapmaların etkisini minimize ederken trendin yönü hakkında net bir görüş sağlar. Basit Hareketli Ortalama (SMA), Üssel Hareketli Ortalama (EMA) ve Ağırlıklı Hareketli Ortalama (WMA) gibi türleri bulunur. Örneğin, hisse senedi fiyatlarında 200 günlük SMA, uzun vadeli trendi izlemek için sıklıkla tercih edilir. Bu tezde basit hareketli ortalama kullanılmaktadır (Caraka ve ark., 2019; Saleti ve ark., 2024).

SMA, belirli bir periyottaki veri noktalarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır. k periyotluk SMA formülü şu şekildedir:

$$\hat{y}_t = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k y_{t-n} \quad (7)$$

k adet önceki değerin ortalaması alınır. Pencere genişliği (örneğin 5 ay) olarak da ifade edilebilir. \hat{y}_t , t zamanındaki hareketli ortalamayı gösterir. $t - n$, t 'den n zaman önceki veri değeridir.

5.2.2. Elektrik Dağıtım Şebekelerindeki Kayıp-Kaçak Oranlarının Zaman Serisi Analizi

Bu kısımda, elektrik dağıtım şebekelerindeki kayıp-kaçak oranlarının zaman serisi analizi ve tahmini için kapsamlı bir modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. İlk aşamada, ham veri seti üzerinde ön işleme adımları uygulanarak veri kalitesi artırılmıştır. Yüzdelerik değerlerin sayısallaştırılması ve tarih değişkeninin standart datetime formatına dönüştürülmesinin ardından, veri seti mevsimsel ayrıştırmaya (seasonal decomposition)

tabi tutulmuştur. Bu aşamada, additive model kullanılarak seri; trend, mevsimsellik ve artıklar (residuals) bileşenlerine ayrıştırılmış ve her bir bileşenin zaman içindeki davranışı görselleştirilmiştir. Additive modellerde bileşenler toplamsal olarak ifade edilir. Bu ayrıştırma, tahmin modellerinin iyileştirilmesinden politika etki analizlerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Aşağıdaki Şekillerde Merkez ve İlçelerde kayıp kaçak için zaman içinde nasıl davranış ortaya çıktığı görülebilir. Zaman serisi ayrıştırma (seasonal decomposition), bir zaman serisini dört temel bileşene ayırarak analiz eder: gözlemlenen değerler (observed), trend, mevsimsellik (seasonal) ve artıklar (residuals). Bu bileşenler, serinin dinamiklerini anlamak ve modelleme yapmak için kritik rol oynar. Gözlemlenen değerler (observed), ham verinin kendisini temsil eder ve zaman içindeki gerçek ölçümleri yansıtır. Trend, verinin uzun vadeli eğilimini (yükseliş, düşüş veya stabilite) gösterir ve kısa vadeli dalgalanmalardan arındırılmış bir perspektif sunar. Mevsimsellik (seasonal), belirli bir periyotta (örneğin aylık veya yıllık) tekrarlanan düzenli dalgalanmaları ifade eder ve genellikle dış faktörlerle (iklim, tatil dönemleri) ilişkilidir. Artıklar (residuals) ise trend ve mevsimsellik bileşenleri çıkarıldıktan sonra geriye kalan rastgele varyasyon veya açıklanamayan gürültüdür. Bu bileşen, modelin tahmin edemediği anomalileri, dışsal şokları veya öngörülemeyen olayları barındırır. Artıkların analizi, modelin performansını değerlendirmek ve eksik kalan dinamikleri belirlemek açısından kritik öneme sahiptir (Das ve Barman, 2025; Dudek, 2023). Çizelge 5.2’ de Muş ili merkez ve ilçelerinin 2013-2024 yılları arasındaki aylık kayıp kaçak verileri kullanılarak LSTM modelleme ile ileriye yönelik kayıp-kaçak tahmini yapılması hedeflenmiştir.

Çizelge 5.2. Muş ili merkez ve ilçelerinin 2013-2024 yılları arasındaki aylık kk oran değerleri

MUŞ - BULANIK							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	84,95%	Tem.16	61,62%	Oca.19	62,02%	Tem.21	36,42%
Şub.14	64,50%	Ağu.16	57,15%	Şub.19	61,41%	Ağu.21	36,19%
Mar.14	71,84%	Eyl.16	54,29%	Mar.19	64,81%	Eyl.21	32,18%
Nis.14	46,23%	Eki.16	71,67%	Nis.19	58,93%	Eki.21	54,64%
May.14	66,22%	Kas.16	71,58%	May.19	36,03%	Kas.21	44,01%
Haz.14	43,30%	Ara.16	69,01%	Haz.19	49,05%	Ara.21	46,77%
Tem.14	72,54%	Oca.17	55,08%	Tem.19	32,20%	Oca.22	38,86%
Ağu.14	70,70%	Şub.17	38,41%	Ağu.19	18,74%	Şub.22	46,64%
Eyl.14	64,12%	Mar.17	21,99%	Eyl.19	19,78%	Mar.22	47,20%
Eki.14	67,19%	Nis.17	11,65%	Eki.19	11,12%	Nis.22	31,83%
Kas.14	79,63%	May.17	20,75%	Kas.19	36,80%	May.22	29,42%
Ara.14	77,36%	Haz.17	29,10%	Ara.19	47,54%	Haz.22	19,94%
Oca.15	80,41%	Tem.17	25,62%	Oca.20	59,87%	Tem.22	41,58%
Şub.15	31,70%	Ağu.17	21,51%	Şub.20	63,00%	Ağu.22	41,98%

Çizelge 5.2.' nin devamı

Mar.15	73,29%	Eyl.17	16,18%	Mar.20	52,26%	Eyl.22	34,11%
Nis.15	62,75%	Eki.17	32,45%	Nis.20	49,15%	Eki.22	47,82%
May.15	74,61%	Kas.17	45,04%	May.20	41,87%	Kas.22	56,68%
Haz.15	54,85%	Ara.17	51,02%	Haz.20	34,89%	Ara.22	55,93%
Tem.15	72,97%	Oca.18	49,22%	Tem.20	23,96%	Oca.23	38,45%
Ağu.15	76,36%	Şub.18	54,07%	Ağu.20	34,66%	Şub.23	42,43%
Eyl.15	65,33%	Mar.18	56,32%	Eyl.20	17,92%	Mar.23	43,79%
Eki.15	77,06%	Nis.18	51,75%	Eki.20	30,76%	Nis.23	35,89%
Kas.15	74,44%	May.18	40,41%	Kas.20	45,98%	May.23	27,78%
Ara.15	85,90%	Haz.18	36,11%	Ara.20	48,47%	Haz.23	19,26%
Oca.16	77,21%	Tem.18	36,82%	Oca.21	45,96%	Tem.23	25,73%
Şub.16	70,30%	Ağu.18	39,55%	Şub.21	43,62%	Ağu.23	20,61%
Mar.16	51,87%	Eyl.18	35,12%	Mar.21	55,24%	Eyl.23	14,09%
Nis.16	67,56%	Eki.18	41,35%	Nis.21	42,02%	Eki.23	25,21%
May.16	55,52%	Kas.18	56,46%	May.21	23,72%	Kas.23	20,74%
Haz.16	63,87%	Ara.18	53,07%	Haz.21	23,99%	Ara.23	33,79%
MUŞ - MALAZGİRT							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	78,89%	Tem.16	49,78%	Oca.19	65,88%	Tem.21	34,00%
Şub.14	69,16%	Ağu.16	31,61%	Şub.19	61,58%	Ağu.21	27,11%
Mar.14	73,37%	Eyl.16	60,59%	Mar.19	61,78%	Eyl.21	33,49%
Nis.14	59,96%	Eki.16	59,92%	Nis.19	48,96%	Eki.21	64,05%
May.14	48,31%	Kas.16	76,87%	May.19	20,38%	Kas.21	27,33%
Haz.14	64,33%	Ara.16	80,64%	Haz.19	34,99%	Ara.21	39,89%
Tem.14	71,81%	Oca.17	84,31%	Tem.19	12,98%	Oca.22	34,77%
Ağu.14	72,54%	Şub.17	81,67%	Ağu.19	10,60%	Şub.22	55,24%
Eyl.14	52,25%	Mar.17	64,62%	Eyl.19	10,75%	Mar.22	53,24%
Eki.14	81,86%	Nis.17	68,37%	Eki.19	16,81%	Nis.22	54,17%
Kas.14	79,17%	May.17	62,01%	Kas.19	18,89%	May.22	54,85%
Ara.14	87,04%	Haz.17	60,11%	Ara.19	19,84%	Haz.22	57,71%
Oca.15	77,83%	Tem.17	58,60%	Oca.20	63,05%	Tem.22	39,02%
Şub.15	48,60%	Ağu.17	70,62%	Şub.20	65,81%	Ağu.22	35,48%
Mar.15	73,64%	Eyl.17	67,81%	Mar.20	52,88%	Eyl.22	16,46%
Nis.15	80,66%	Eki.17	67,35%	Nis.20	61,20%	Eki.22	42,50%
May.15	69,72%	Kas.17	77,42%	May.20	46,32%	Kas.22	37,78%
Haz.15	74,94%	Ara.17	58,87%	Haz.20	40,37%	Ara.22	32,71%
Tem.15	72,80%	Oca.18	81,14%	Tem.20	23,76%	Oca.23	44,21%
Ağu.15	71,59%	Şub.18	74,95%	Ağu.20	7,16%	Şub.23	48,22%
Eyl.15	72,64%	Mar.18	71,84%	Eyl.20	2,28%	Mar.23	51,01%
Eki.15	79,62%	Nis.18	69,55%	Eki.20	12,51%	Nis.23	48,11%
Kas.15	81,13%	May.18	69,11%	Kas.20	10,88%	May.23	51,72%
Ara.15	70,50%	Haz.18	50,79%	Ara.20	9,24%	Haz.23	48,62%
Oca.16	80,01%	Tem.18	24,57%	Oca.21	12,04%	Tem.23	43,91%
Şub.16	69,72%	Ağu.18	39,74%	Şub.21	22,34%	Ağu.23	44,56%
Mar.16	61,31%	Eyl.18	41,92%	Mar.21	34,84%	Eyl.23	46,02%
Nis.16	62,49%	Eki.18	42,96%	Nis.21	59,29%	Eki.23	47,12%
May.16	65,56%	Kas.18	47,89%	May.21	50,54%	Kas.23	41,33%
Haz.16	56,53%	Ara.18	54,69%	Haz.21	51,34%	Ara.23	47,10%
MUŞ - HASKÖY							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	74,22%	Tem.16	68,42%	Oca.19	50,01%	Tem.21	15,63%
Şub.14	63,96%	Ağu.16	56,60%	Şub.19	47,02%	Ağu.21	15,48%
Mar.14	60,94%	Eyl.16	31,91%	Mar.19	52,17%	Eyl.21	12,90%

Çizelge 5.2.' nin devamı

Nis.14	40,38%	Eki.16	46,07%	Nis.19	60,10%	Eki.21	55,19%
May.14	152,38%	Kas.16	49,30%	May.19	32,98%	Kas.21	38,12%
Haz.14	28,40%	Ara.16	81,47%	Haz.19	19,02%	Ara.21	21,04%
Tem.14	57,76%	Oca.17	67,05%	Tem.19	27,44%	Oca.22	14,53%
Ağu.14	54,63%	Şub.17	57,38%	Ağu.19	20,27%	Şub.22	13,45%
Eyl.14	63,74%	Mar.17	34,81%	Eyl.19	14,71%	Mar.22	16,12%
Eki.14	36,97%	Nis.17	47,93%	Eki.19	25,36%	Nis.22	13,20%
Kas.14	82,27%	May.17	28,97%	Kas.19	36,00%	May.22	24,69%
Ara.14	50,84%	Haz.17	38,33%	Ara.19	30,98%	Haz.22	13,43%
Oca.15	72,93%	Tem.17	30,61%	Oca.20	10,58%	Tem.22	28,33%
Şub.15	39,94%	Ağu.17	40,15%	Şub.20	15,34%	Ağu.22	30,11%
Mar.15	61,34%	Eyl.17	32,49%	Mar.20	23,02%	Eyl.22	21,83%
Nis.15	51,55%	Eki.17	41,26%	Nis.20	23,71%	Eki.22	31,38%
May.15	55,88%	Kas.17	71,05%	May.20	17,65%	Kas.22	32,93%
Haz.15	55,94%	Ara.17	37,35%	Haz.20	15,11%	Ara.22	29,60%
Tem.15	57,58%	Oca.18	48,57%	Tem.20	14,46%	Oca.23	8,43%
Ağu.15	18,52%	Şub.18	45,30%	Ağu.20	14,69%	Şub.23	32,02%
Eyl.15	45,83%	Mar.18	51,86%	Eyl.20	12,44%	Mar.23	33,47%
Eki.15	58,01%	Nis.18	37,57%	Eki.20	98,06%	Nis.23	28,76%
Kas.15	56,36%	May.18	39,53%	Kas.20	60,34%	May.23	34,30%
Ara.15	55,01%	Haz.18	28,09%	Ara.20	22,61%	Haz.23	42,16%
Oca.16	52,32%	Tem.18	33,96%	Oca.21	25,77%	Tem.23	40,71%
Şub.16	39,81%	Ağu.18	37,11%	Şub.21	24,44%	Ağu.23	22,44%
Mar.16	40,06%	Eyl.18	26,91%	Mar.21	31,42%	Eyl.23	14,73%
Nis.16	52,87%	Eki.18	38,21%	Nis.21	23,87%	Eki.23	14,14%
May.16	52,43%	Kas.18	46,75%	May.21	29,59%	Kas.23	15,66%
Haz.16	59,90%	Ara.18	49,96%	Haz.21	16,89%	Ara.23	29,08%
MUŞ - KORKUT							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	69,37%	Tem.16	45,26%	Oca.19	70,03%	Tem.21	23,24%
Şub.14	84,93%	Ağu.16	37,03%	Şub.19	64,14%	Ağu.21	16,85%
Mar.14	72,14%	Eyl.16	66,95%	Mar.19	72,01%	Eyl.21	17,96%
Nis.14	69,68%	Eki.16	50,92%	Nis.19	72,53%	Eki.21	24,79%
May.14	50,21%	Kas.16	73,40%	May.19	53,76%	Kas.21	63,54%
Haz.14	51,24%	Ara.16	68,70%	Haz.19	34,51%	Ara.21	22,62%
Tem.14	82,32%	Oca.17	84,76%	Tem.19	29,26%	Oca.22	21,54%
Ağu.14	56,70%	Şub.17	72,62%	Ağu.19	12,24%	Şub.22	9,86%
Eyl.14	67,55%	Mar.17	59,64%	Eyl.19	11,44%	Mar.22	22,23%
Eki.14	78,40%	Nis.17	67,14%	Eki.19	10,63%	Nis.22	14,88%
Kas.14	75,68%	May.17	56,07%	Kas.19	21,10%	May.22	10,66%
Ara.14	85,85%	Haz.17	38,50%	Ara.19	20,37%	Haz.22	11,93%
Oca.15	67,84%	Tem.17	52,13%	Oca.20	24,70%	Tem.22	30,51%
Şub.15	74,89%	Ağu.17	50,86%	Şub.20	27,60%	Ağu.22	16,88%
Mar.15	72,42%	Eyl.17	59,58%	Mar.20	23,97%	Eyl.22	18,48%

Çizelge 5.2.' nin devamı

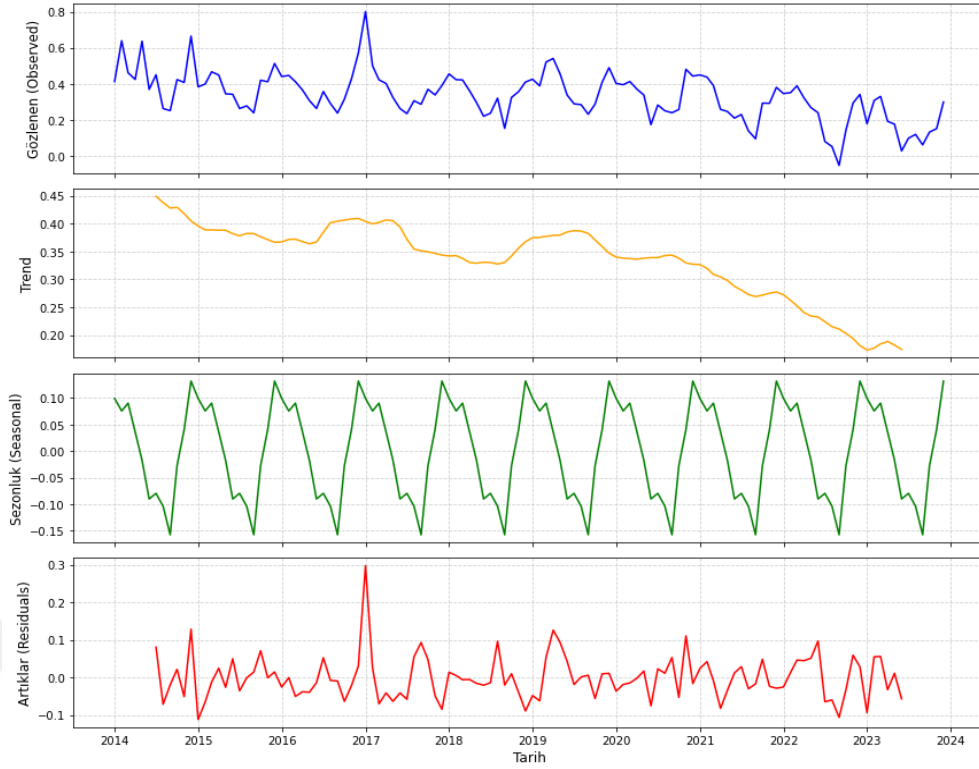
Nis.15	78,88%	Eki.17	60,32%	Nis.20	4,57%	Eki.22	19,74%
May.15	59,43%	Kas.17	58,67%	May.20	13,13%	Kas.22	25,86%
Haz.15	77,75%	Ara.17	59,11%	Haz.20	15,32%	Ara.22	26,57%
Tem.15	72,81%	Oca.18	69,40%	Tem.20	21,74%	Oca.23	18,74%
Ağu.15	28,31%	Şub.18	65,44%	Ağu.20	25,29%	Şub.23	18,29%
Eyl.15	71,81%	Mar.18	65,47%	Eyl.20	28,59%	Mar.23	16,95%
Eki.15	59,16%	Nis.18	60,69%	Eki.20	25,85%	Nis.23	22,29%
Kas.15	74,13%	May.18	60,75%	Kas.20	23,12%	May.23	14,14%
Ara.15	73,45%	Haz.18	42,90%	Ara.20	30,42%	Haz.23	16,07%
Oca.16	68,87%	Tem.18	57,77%	Oca.21	25,90%	Tem.23	14,08%
Şub.16	54,76%	Ağu.18	29,03%	Şub.21	19,80%	Ağu.23	2,98%
Mar.16	64,30%	Eyl.18	34,45%	Mar.21	21,79%	Eyl.23	5,46%
Nis.16	71,39%	Eki.18	54,18%	Nis.21	11,29%	Eki.23	1,52%
May.16	65,38%	Kas.18	63,91%	May.21	13,29%	Kas.23	0,30%
Haz.16	37,85%	Ara.18	58,80%	Haz.21	8,38%	Ara.23	11,45%
MUŞ - VARTO							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	82,17%	Tem.16	42,89%	Oca.19	47,85%	Tem.21	27,80%
Şub.14	68,18%	Ağu.16	51,73%	Şub.19	31,70%	Ağu.21	30,85%
Mar.14	85,86%	Eyl.16	56,14%	Mar.19	28,51%	Eyl.21	34,77%
Nis.14	57,38%	Eki.16	68,32%	Nis.19	7,21%	Eki.21	62,06%
May.14	96,91%	Kas.16	68,96%	May.19	7,13%	Kas.21	48,83%
Haz.14	69,87%	Ara.16	82,12%	Haz.19	37,74%	Ara.21	48,62%
Tem.14	37,55%	Oca.17	80,11%	Tem.19	44,53%	Oca.22	31,44%
Ağu.14	70,26%	Şub.17	72,89%	Ağu.19	44,53%	Şub.22	26,38%
Eyl.14	67,45%	Mar.17	69,80%	Eyl.19	43,68%	Mar.22	29,74%
Eki.14	58,53%	Nis.17	78,83%	Eki.19	52,18%	Nis.22	30,04%
Kas.14	79,95%	May.17	74,17%	Kas.19	53,62%	May.22	27,69%
Ara.14	67,93%	Haz.17	68,87%	Ara.19	52,55%	Haz.22	30,01%
Oca.15	81,28%	Tem.17	51,09%	Oca.20	43,65%	Tem.22	57,83%
Şub.15	46,96%	Ağu.17	53,46%	Şub.20	46,97%	Ağu.22	55,49%
Mar.15	86,00%	Eyl.17	49,71%	Mar.20	33,81%	Eyl.22	45,29%
Nis.15	57,38%	Eki.17	59,42%	Nis.20	42,76%	Eki.22	47,42%
May.15	79,72%	Kas.17	65,06%	May.20	42,06%	Kas.22	56,08%
Haz.15	30,39%	Ara.17	67,39%	Haz.20	21,45%	Ara.22	57,40%
Tem.15	72,25%	Oca.18	70,23%	Tem.20	12,04%	Oca.23	21,87%
Ağu.15	63,60%	Şub.18	70,96%	Ağu.20	22,83%	Şub.23	20,80%
Eyl.15	81,19%	Mar.18	69,79%	Eyl.20	22,65%	Mar.23	42,86%
Eki.15	58,12%	Nis.18	59,72%	Eki.20	18,90%	Nis.23	32,60%
Kas.15	80,89%	May.18	62,78%	Kas.20	34,26%	May.23	30,59%
Ara.15	63,77%	Haz.18	56,29%	Ara.20	40,06%	Haz.23	30,67%
Oca.16	81,14%	Tem.18	43,28%	Oca.21	33,44%	Tem.23	25,44%
Şub.16	71,17%	Ağu.18	50,86%	Şub.21	34,87%	Ağu.23	19,29%
Mar.16	73,31%	Eyl.18	37,51%	Mar.21	36,08%	Eyl.23	17,97%

Çizelge 5.2.' nin devamı

Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Nis.16	61,75%	Eki.18	42,23%	Nis.21	57,72%	Eki.23	23,10%
May.16	72,40%	Kas.18	12,86%	May.21	35,95%	Kas.23	7,22%
Haz.16	59,32%	Ara.18	25,04%	Haz.21	20,24%	Ara.23	26,18%
MUŞ - MERKEZ							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	41,25%	Tem.16	35,75%	Oca.19	42,57%	Tem.21	22,97%
Şub.14	63,95%	Ağu.16	29,02%	Şub.19	38,84%	Ağu.21	13,86%
Mar.14	46,14%	Eyl.16	23,73%	Mar.19	52,10%	Eyl.21	9,44%
Nis.14	42,45%	Eki.16	31,51%	Nis.19	54,09%	Eki.21	29,26%
May.14	63,68%	Kas.16	42,75%	May.19	45,59%	Kas.21	29,19%
Haz.14	36,90%	Ara.16	57,14%	Haz.19	33,77%	Ara.21	38,03%
Tem.14	45,01%	Oca.17	80,10%	Tem.19	28,91%	Oca.22	34,59%
Ağu.14	26,26%	Şub.17	50,00%	Ağu.19	28,43%	Şub.22	35,11%
Eyl.14	25,10%	Mar.17	42,23%	Eyl.19	23,10%	Mar.22	38,90%
Eki.14	42,36%	Nis.17	40,15%	Eki.19	28,72%	Nis.22	32,09%
Kas.14	40,75%	May.17	32,43%	Kas.19	40,91%	May.22	26,80%
Ara.14	66,53%	Haz.17	26,26%	Ara.19	48,98%	Haz.22	23,94%
Oca.15	38,32%	Tem.17	23,44%	Oca.20	40,24%	Tem.22	7,96%
Şub.15	39,91%	Ağu.17	30,60%	Şub.20	39,51%	Ağu.22	5,14%
Mar.15	46,69%	Eyl.17	28,66%	Mar.20	41,28%	Eyl.22	9,72%
Nis.15	44,88%	Eki.17	36,97%	Nis.20	37,02%	Eki.22	14,30%
May.15	34,47%	Kas.17	33,81%	May.20	33,80%	Kas.22	29,36%
Haz.15	34,18%	Ara.17	39,06%	Haz.20	17,31%	Ara.22	34,11%
Tem.15	26,28%	Oca.18	45,50%	Tem.20	28,25%	Oca.23	17,80%
Ağu.15	27,77%	Şub.18	42,31%	Ağu.20	25,03%	Şub.23	30,70%
Eyl.15	23,90%	Mar.18	42,18%	Eyl.20	23,92%	Mar.23	33,02%
Eki.15	42,03%	Nis.18	36,06%	Eki.20	25,75%	Nis.23	19,16%
Kas.15	41,13%	May.18	29,62%	Kas.20	48,08%	May.23	17,59%
Ara.15	51,31%	Haz.18	21,98%	Ara.20	44,27%	Haz.23	2,71%
Oca.16	44,05%	Tem.18	23,67%	Oca.21	44,97%	Tem.23	9,76%
Şub.16	44,67%	Ağu.18	32,04%	Şub.21	43,72%	Ağu.23	11,91%
Mar.16	41,18%	Eyl.18	15,24%	Mar.21	39,04%	Eyl.23	6,07%
Nis.16	36,55%	Eki.18	32,44%	Nis.21	25,80%	Eki.23	13,19%
May.16	30,73%	Kas.18	35,67%	May.21	24,63%	Kas.23	15,09%
Haz.16	26,30%	Ara.18	41,01%	Haz.21	20,95%	Ara.23	29,89%
MUŞ - TOPLAM							
Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı	Yıllar	KK Oranı
Oca.14	63,60%	Tem.16	45,78%	Oca.19	51,66%	Tem.21	26,69%
Şub.14	66,15%	Ağu.16	38,66%	Şub.19	47,76%	Ağu.21	21,03%
Mar.14	61,54%	Eyl.16	39,26%	Mar.19	55,69%	Eyl.21	19,05%
Nis.14	48,69%	Eki.16	48,60%	Nis.19	53,77%	Eki.21	41,40%
May.14	67,04%	Kas.16	58,39%	May.19	39,88%	Kas.21	33,00%
Haz.14	44,95%	Ara.16	67,30%	Haz.19	35,85%	Ara.21	39,32%

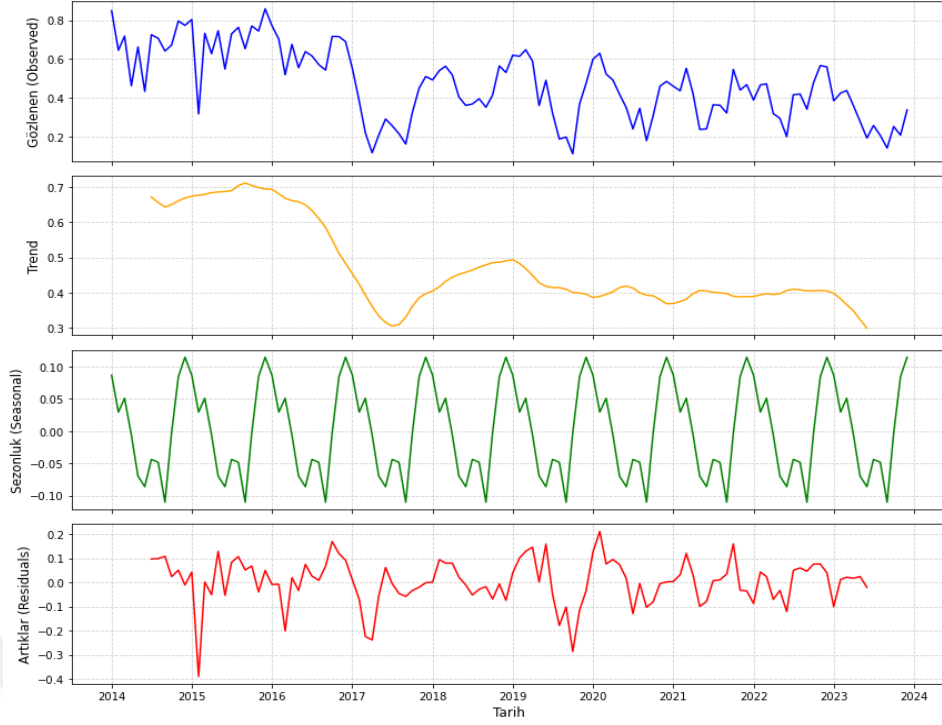
Çizelge 5.2.' nin devamı

Tem.14	55,16%	Oca.17	76,60%	Tem.19	29,43%	Oca.22	33,96%
Ağu.14	46,42%	Şub.17	56,90%	Ağu.19	25,83%	Şub.22	37,98%
Eyl.14	40,91%	Mar.17	46,82%	Eyl.19	21,35%	Mar.22	40,47%
Eki.14	56,55%	Nis.17	46,97%	Eki.19	25,77%	Nis.22	34,40%
Kas.14	62,90%	May.17	40,96%	Kas.19	38,81%	May.22	31,20%
Ara.14	72,89%	Haz.17	36,69%	Ara.19	45,08%	Haz.22	28,93%
Oca.15	60,72%	Tem.17	32,44%	Oca.20	46,46%	Tem.22	26,80%
Şub.15	41,55%	Ağu.17	38,52%	Şub.20	47,49%	Ağu.22	24,00%
Mar.15	62,20%	Eyl.17	35,54%	Mar.20	43,50%	Eyl.22	14,07%
Nis.15	57,67%	Eki.17	44,92%	Nis.20	41,97%	Eki.22	29,85%
May.15	54,05%	Kas.17	49,77%	May.20	36,40%	Kas.22	38,91%
Haz.15	46,51%	Ara.17	47,88%	Haz.20	23,11%	Ara.22	40,29%
Tem.15	48,76%	Oca.18	56,30%	Tem.20	22,59%	Oca.23	8,21%
Ağu.15	45,28%	Şub.18	54,06%	Ağu.20	24,46%	Şub.23	19,38%
Eyl.15	46,17%	Mar.18	53,62%	Eyl.20	20,70%	Mar.23	22,11%
Eki.15	57,90%	Nis.18	47,63%	Eki.20	27,07%	Nis.23	20,97%
Kas.15	60,93%	May.18	42,61%	Kas.20	37,87%	May.23	14,26%
Ara.15	64,99%	Haz.18	32,50%	Ara.20	40,87%	Haz.23	15,87%
Oca.16	62,78%	Tem.18	29,44%	Oca.21	40,30%	Tem.23	21,09%
Şub.16	57,56%	Ağu.18	35,88%	Şub.21	39,74%	Ağu.23	16,95%
Mar.16	50,80%	Eyl.18	24,84%	Mar.21	40,67%	Eyl.23	12,61%
Nis.16	51,88%	Eki.18	37,15%	Nis.21	36,90%	Eki.23	17,51%
May.16	46,95%	Kas.18	41,55%	May.21	29,74%	Kas.23	13,41%
Haz.16	42,75%	Ara.18	45,56%	Haz.21	25,79%	Ara.23	30,99%



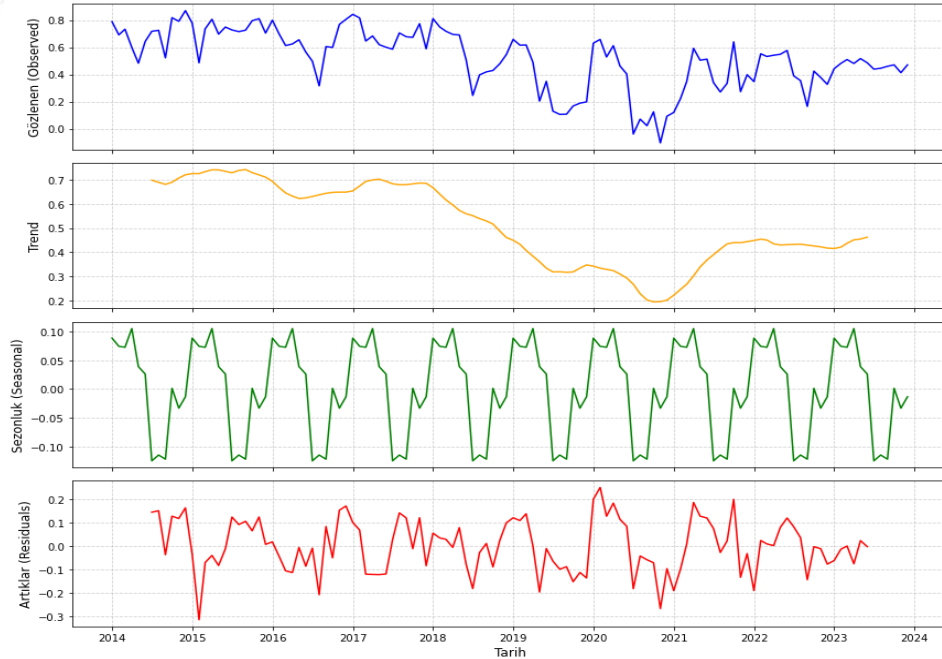
Şekil 5.3. Muş merkeze ait trendsel kk grafikleri

Şekil 5.3' deki trend bileşeni, 2014-2024 yılları arasında gözlemlenen verilerin uzun vadeli eğilimini yansıtmaktadır. Trend değerlerinin 0.45'ten 0.20'ye düzenli bir şekilde azalması, analiz edilen metriğin (örneğin kayıp-kaçak oranı) zaman içinde istikrarlı bir düşüş eğilimi sergilediğini göstermektedir. Bu azalma, olasılıkla altyapı iyileştirmeleri, enerji verimliliği politikaları veya kayıp önleme stratejileri gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir. Trendin lineer olmaktan ziyade 0.35 ile 0.25 arasında daha belirgin bir yavaşlama göstermesi, sürecin son yıllarda stabilize olduğuna işaret edebilir. Kayıp kaçak mevsimsel bir davranış göstermiş, kayıp kaçak için beklenen biçimde artıklar göstermiştir. Kayıp-kaçak verilerinde artıklar (residuals), genellikle ani operasyonel şoklar (altyapı arızaları, kaçak kullanım artışı), eksik mevsimsel etkiler veya zaman bağımlı sistematik hatalar ile ilişkilidir. Bu artıklar, özellikle pozitif yöndeki sapmalar, kaçak elektrik tüketimindeki anormal artışlara işaret ederken, negatif sapmalar altyapı iyileştirmelerinin etkinliğini yansıtabilir.



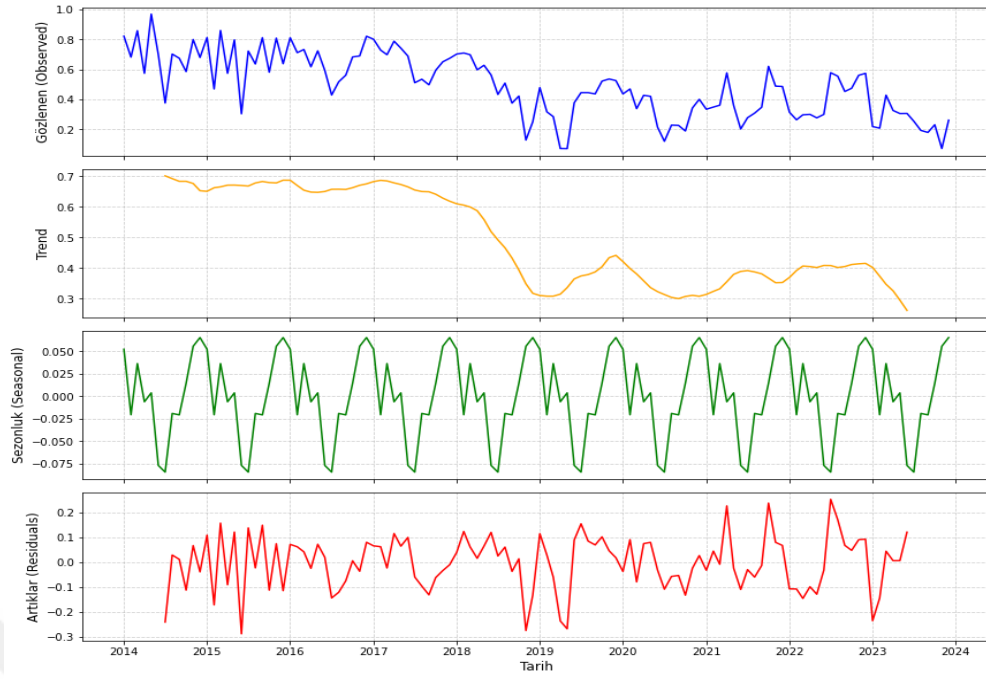
Şekil 5.4. Muş Bulanık ilçesine ait trendsel kk grafikleri

Şekil 5.4 incelendiğinde Bulanık için trend genel azalma eğiliminde olsa da 2017'den sonra artış ve azalış belli bir trend izlememiştir. Belli dönemlerde davranış yönü tahmin edilemez değişim göstermiştir. Bu yüzden artıklık aralığı geniştir.



Şekil 5.5. Muş Malazgirt ilçesine ait trendsel kk grafikleri

Şekil 5.5 incelendiğinde Malazgirt 2021 yılına kadar kayıp kaçak azalma göstermiştir. 2021 yılında sonra artış görülmektedir. Merkez'e göre kayıp kaçak oranındaki düşüş az olmuştur.



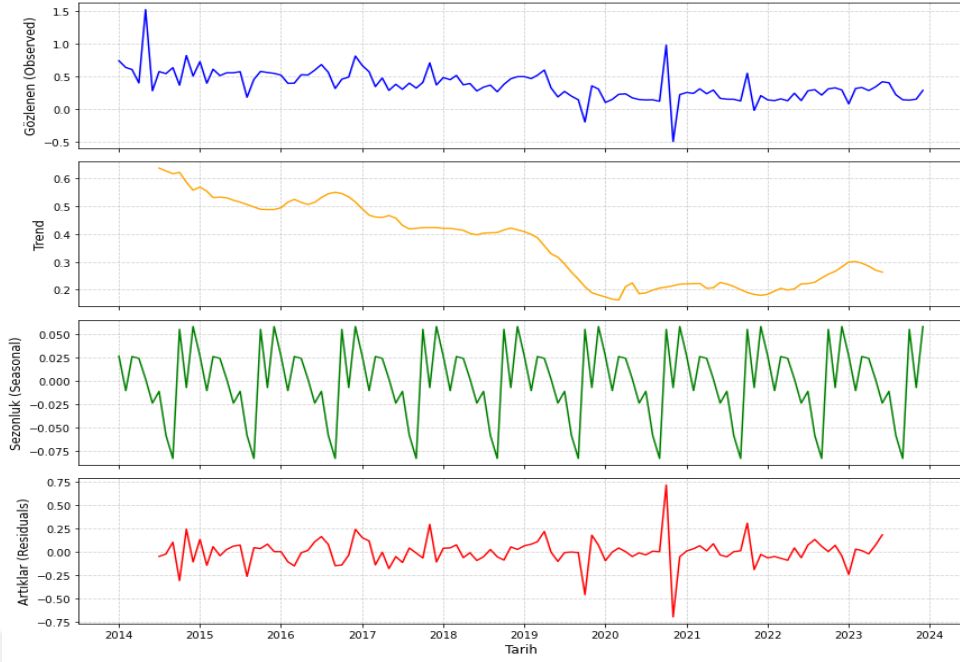
Şekil 5.6. Muş Varto ilçesine ait trendsel kk grafikleri

Şekil 5.6 incelendiğinde Varto için düşüş 2018'e kadar belirgin değil, bu tarihten sonra düşüş trendine girmiştir. Artıklarda görülebileceği gibi anormallikler genelde pozitif olsa da negatif olarak da çıkıyor.



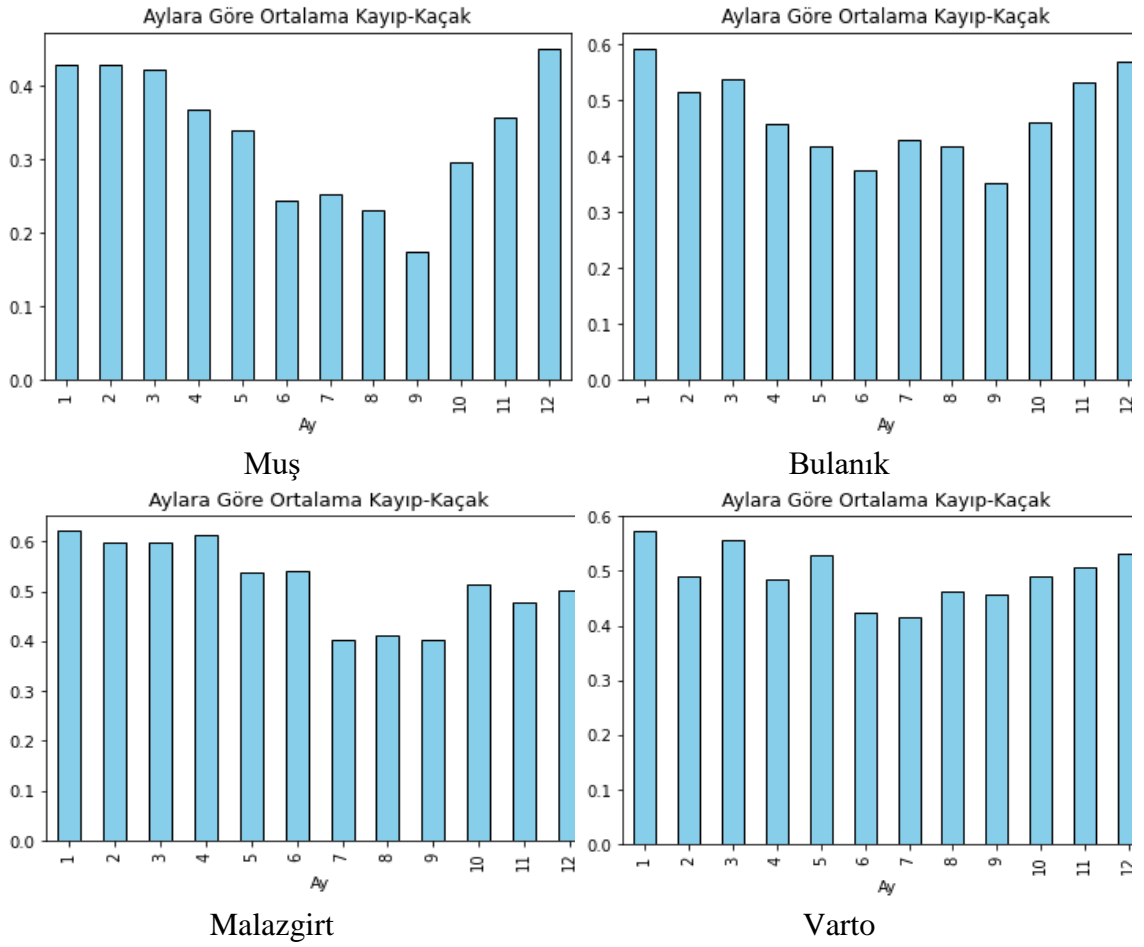
Şekil 5.7. Muş Korkut ilçesine ait trendsel kk grafikleri

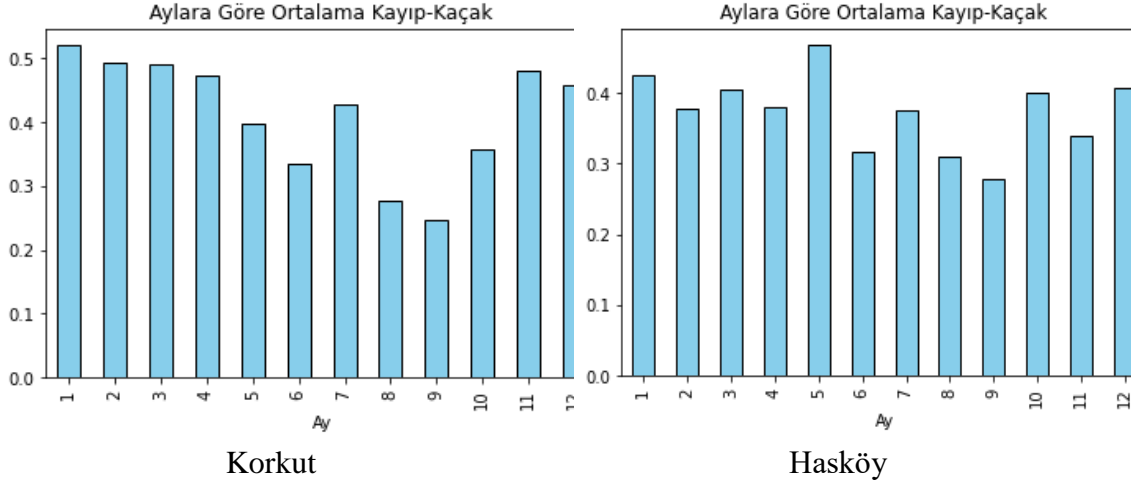
Şekil 5.7 incelendiğinde trend azalma eğiliminde, diğer ilçelere göre artıklar daha düşük görülmektedir. 2019 ve 2020 arasında büyük bir azalma göstermiş, tekrar yükselme trendine girmemiştir.



Şekil 5.8. Muş Korkut ilçesine ait trendsel kkk grafikleri

Şekil 5.8 incelendiğinde Hasköy için de düşme trendi görülebilmektedir. Korkut ile benzer davranış gösterdiği söylenebilir.





Şekil 5.9. Muş merkez ve ilçeler aylara göre ortalama kayıp kaçak değerleri

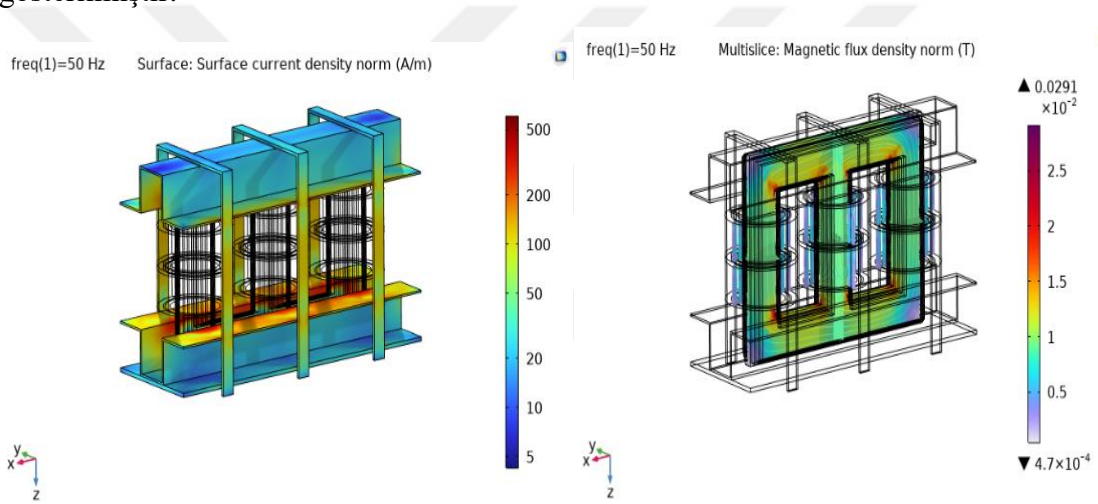
Şekil 5.9'da kayıp-kaçak oranlarının aylık temel tabanda ortalamaları hesaplanarak mevsimsel etkilerin boyutu incelenmiştir. İlçelere göre aylık değişim anlaşılmaya çalışılmıştır. Analizin ikinci aşamasında, veri setinin yumuşatılması ve trendin belirlenmesi amacıyla hareketli ortalama (moving average) tekniği uygulanmıştır. Beş aylık bir pencere genişliği ile hesaplanan basit hareketli ortalama, orijinal verideki kısa vadeli dalgalanmaları filtreleyerek uzun vadeli eğilimi ortaya çıkarmıştır. Bu yöntem, özellikle LSTM modelinin eğitiminde kullanılacak verinin gürültüden arındırılması ve modelin daha istikrarlı tahminler üretebilmesi için kritik bir rol oynamıştır. Hareketli ortalama ile dönüştürülen veri seti, MinMaxScaler kullanılarak [0, 1] aralığında ölçeklendirilmiş ve LSTM modeli için uygun hale getirilmiştir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu bölümde COMSOL Multiphysics programında transformatör üzerinde bulunan mekanik kayıplar ve LSTM metoduyla Muş ili merkez ve ilçelerine ait kayıp kaçak değerleri kullanılarak tahmin ve modellemeler yapılmış olup bunlarla ilgili sonuç ve öneriler ayrı başlık altında anlatılmıştır.

6.1. Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıpların Analizi

Güç trafosunun modellenmesi sonucu trafo da meydana gelen kayıplar analiz edilmesi sağlanmıştır. Comsol uygulamasıyla yapılan trafo modellenmesi sonucu elde edilen analiz görselleri şekil 6.1’de ve mekanik aksam kayıplarının grafiği şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Yüzey akım yoğunluğu normu ve manyetik akı yoğunluğu



Şekil 6.2. Mekanik aksam kayıpları (W)

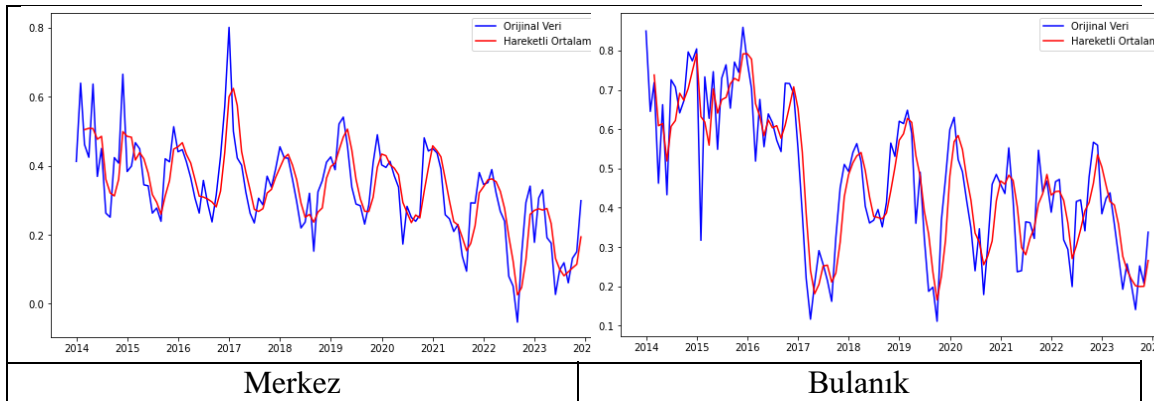
Transformatör modellenmesinde farklı frekans değerlerine göre çıkan çekirdek, sarm ve mekanik kayıp değerleri çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

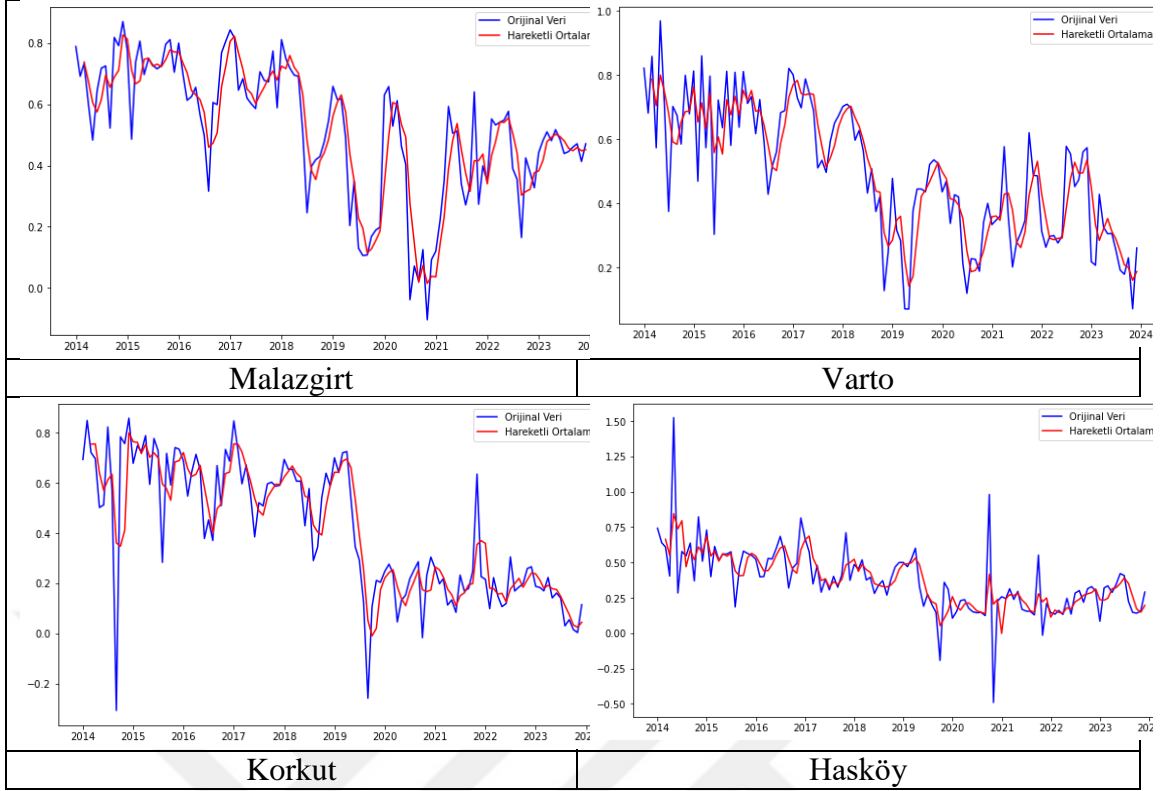
Çizelge 6.1. Farklı frekans değerlerindeki çekirdek, sarım ve mekanik kayıp değerleri

Freq (Hz)	Çekirdek kaybı (kW)	Sarım kaybı (DC) (kW)	Mekanik kayıp (kW)
50.000	4.5508E-4	0.51241	0.0013004
100.00	4.3332E-4	0.51242	0.0025623
150.00	4.9561E-4	0.51242	0.0037385
250.00	6.8415E-4	0.51242	0.0058969
500.00	0.0012432	0.51242	0.010573
1000.0	0.0024269	0.51242	0.018283

6.2. LSTM ile Yapılan Tahmin Analizleri ve Sonuçları

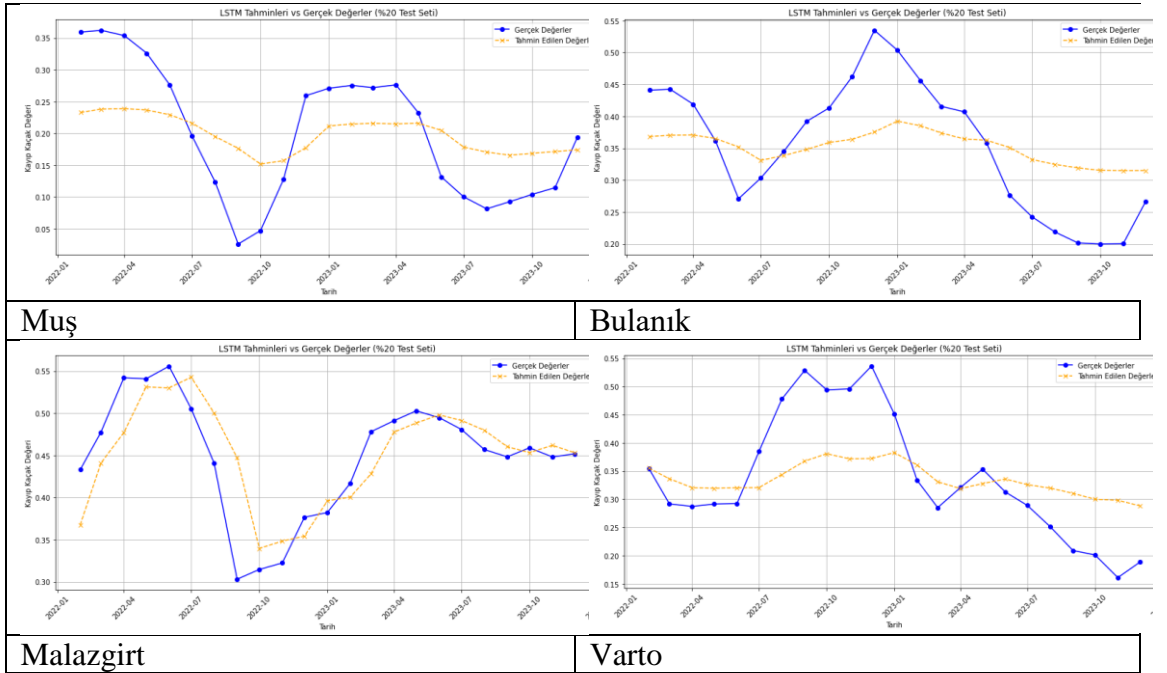
Bu aşamada, derin öğrenme tabanlı bir LSTM metoduyla kayıp-kaçak oranlarının tahmini gerçekleştirilmiştir. Model, iki katmanlı LSTM yapısı ve dropout regularizasyonu ile aşırı öğrenmeyi (overfitting) engellemek üzere tasarlanmıştır. Eğitim sürecinde, erken durdurma (early stopping) tekniği kullanılarak modelin en iyi performans gösterdiği epoch'ta eğitimin sonlandırılması sağlanmıştır. Test verisi üzerinde yapılan tahminler, ortalama karesel hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve kök ortalama karesel hata (RMSE) metrikleri ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, hareketli ortalama ile ön işleme yapılan verinin LSTM modellerinde kullanımının tahmin performansını nasıl etkilediğini deneysel olarak ortaya koymaktadır. Şekil 6.3' de hareketli ortalama ile oluşan tahminsel test verileri gösterilmektedir.

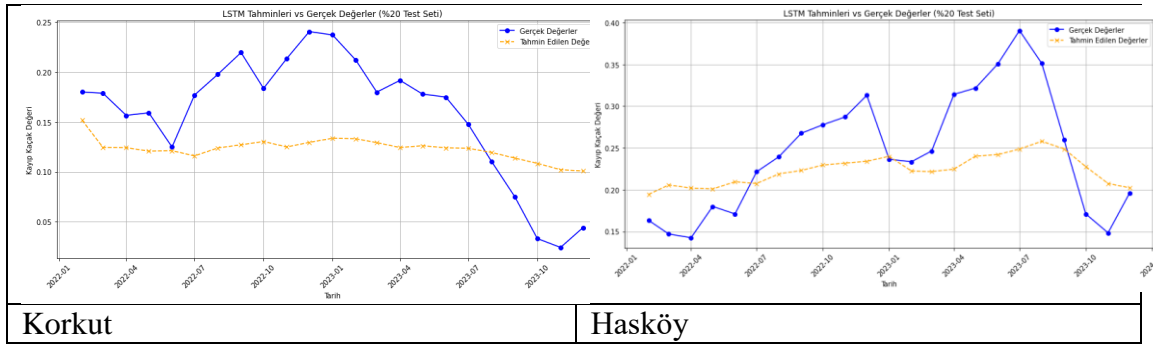




Şekil 6.3. Hareketli ortalama ile oluşan test tahmin grafikleri

Eğitim veri seti 2014 ile 2021 (96 ay) yıllarını kapsıyor. Tahminde 2022 ve 2023 yılları (24 ay) test için yani modelin tahmin sonucunun doğruluğunu ölçmek için kullanıldı. Tahmin sonuçlarının düşük çıkması test için kullanılan veri örneklerinin azlığından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.4 incelendiğinde Malazgirt İlçesindeki başarının sebebi bu aylardaki verinin modele uygunluğu olmaktadır.





Şekil 6.4. LSTM ile yapılan tahminler ve gerçek değerlerin karşılaştırılması

Çizelge 6.2. Lstm ile tahmin hata metrikleri

	MSE	MAE	RMSE
Merkez	0.0064	0.0725	0.0803
Bulanık	0.0065	0.0698	0.0804
Malazgirt	0.0018	0.0303	0.0429
Varto	0.0075	0.0709	0.0863
Korkut	0.0041	0.0575	0.0637
Hasköy	0.0038	0.0503	0.0615

- **MSE (Mean Squared Error – Ortalama Kare Hata):**

MSE, modelin yaptığı tahminlerin gerçek değerlerden ne kadar saptığını ölçen bir metriktir. Her bir hatanın (yani tahmin – gerçek değer farkının) karesi alınır, bu karelerin ortalaması hesaplanır. Kare alındığı için büyük hatalar daha fazla cezalandırılır. Bu nedenle MSE, özellikle büyük sapmaları vurgulamak için uygundur.

- **MAE (Mean Absolute Error – Ortalama Mutlak Hata):**

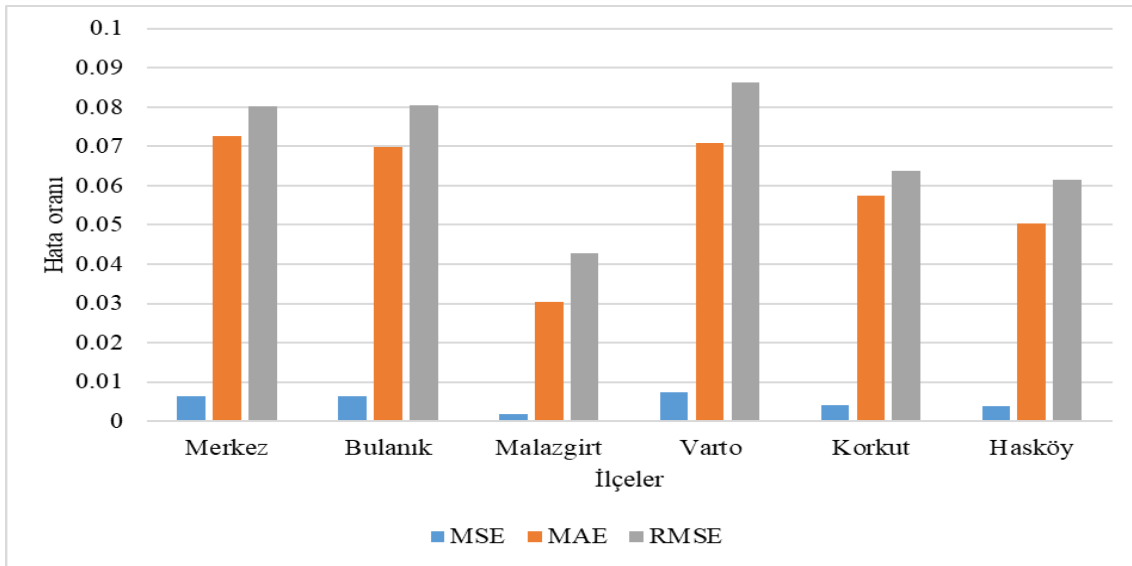
MAE, her tahminin gerçek değerden ne kadar saptığını mutlak değer cinsinden ölçer. Tüm mutlak farkların ortalaması alınır. MAE, doğrudan ortalama hata büyüklüğünü verdiği için yorumlaması daha sezgiseldir. Aykırı değerlere karşı MSE'ye göre daha dayanıklıdır çünkü kare alma işlemi yoktur.

- **RMSE (Root Mean Squared Error – Kare Kök Ortalama Hata):**

RMSE, MSE'nin karekökü alınarak elde edilir. Bu sayede sonuç, orijinal veri birimiyle (örneğin kWh, TL, vb.) aynı birimde ifade edilir, bu da yorumu daha kolay hale getirir. RMSE, büyük hatalara karşı duyarlıdır; çünkü MSE gibi kare alarak hataları büyütür.

Çizelge 6.2 incelendiğinde, Malazgirt ilçesinin tüm hata metriklerinde en düşük değerlere sahip olduğu görülüyor. MSE 0.0018, MAE 0.0303 ve RMSE 0.0429. Bu, Malazgirt için modelin diğer ilçelere göre çok daha iyi performans gösterdiğini gösteriyor. Düşük RMSE (ölçüm birimiyle uyumlu), tahminlerin gerçek değerlere yakın olduğunu ve büyük

sapmaların nadir görüldüğünü işaret eder. Bu durum, Malazgirt'teki veri kalitesinin yüksekliği veya mevsimsel/trend dinamiklerinin daha düzenli olmasıyla açıklanabilir. Diğer ilçelerde bu değerler daha yüksek. Örneğin Varto, en yüksek MSE (0.0075) ve RMSE (0.0863) değerlerine sahip. Bu da Varto'daki tahminlerin diğer ilçelere göre daha büyük hatalar içerdiğini gösteriyor. Özellikle RMSE' nin yüksek olması, tahminlerde büyük ve sık sapmalar olduğunu gösterir. Bu ilçede altyapı sorunları, kaçak kullanımda ani artışlar veya veri toplama sürecindeki tutarsızlıklar model performansını düşürmüş olabilir.



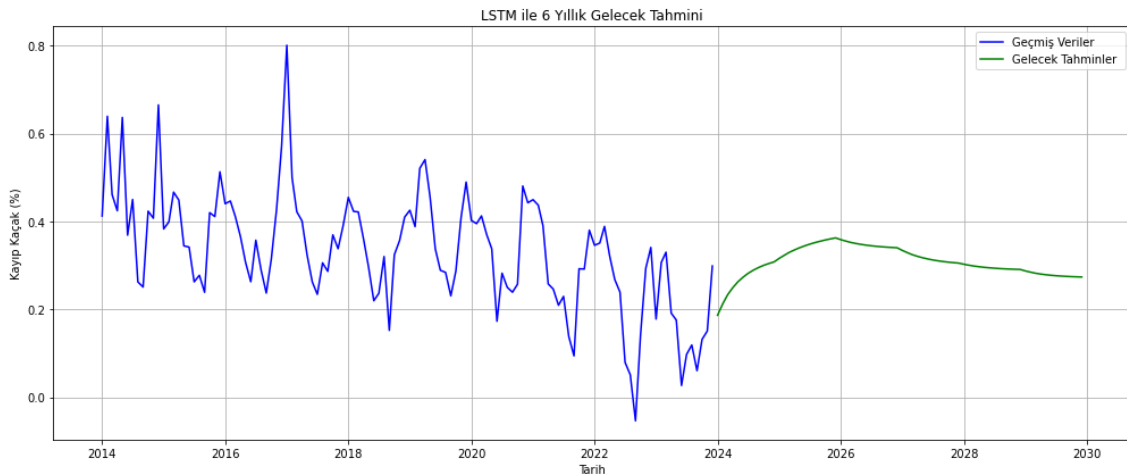
Şekil 6.5. LSTM ile hata metrik başarıları

Şekil 6.5' teki grafiğe göre Merkez ve Bulanık ilçeleri benzer hata değerlerine sahip olduğu ve MSE, RMSE değerlerinin yakın, MAE' de ise Bulanık ilçesinin biraz daha iyi olduğu gözlenmektedir. Hasköy ve Korkut ilçeleri orta düzeyde hatalara sahip değerler göstermektedir. Özellikle Hasköy' ün MAE değeri 0.0503 ile Korkut' tan daha iyi, fakat RMSE' de Korkut biraz daha iyi durumdadır. Buradan, Hasköy' de ki hataların daha küçük ama daha sık, Korkut' ta ise daha büyük ama daha seyrek hatalar olabileceği çıkarımı yapılabilir.

6.3. LSTM ile Gelecek Tahmini (2024-2030)

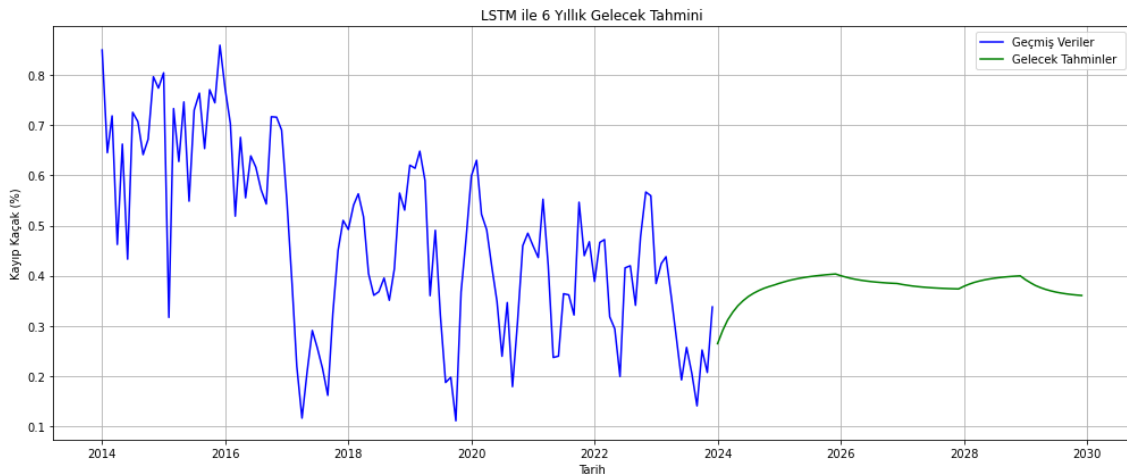
2024'ten başlayarak 2030 yılına kadar bir zaman için aylık kayıp kaçak tahmini yapıldı. Geleceğe yönelik tahminde şöyle bir yaklaşım benimsendi. Başlangıçta eldeki veri ile eğitilen model, son veri noktasından başlayarak her seferinde 12 ay ileriye doğru gelecek tahmini yapıyor. Elde edilen bu 12 aylık tahminler, eğitim verisine eklenerek model her seferinde yeniden eğitilir. Bu döngü toplam 6 kez tekrarlanarak, model her

adımda hem öğrenir hem de tahmin ufkunu genişletir. Böylece model, 6 yıl (72 ay) ileriye uzanan tutarlı ve veriyle güçlendirilmiş bir tahmin üretir. Bu yöntem, zamanla değişen desenlere daha iyi uyum sağlamak için sürekli öğrenme avantajı sunar.



Şekil 6.6. LSTM ile Muş Merkez ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini

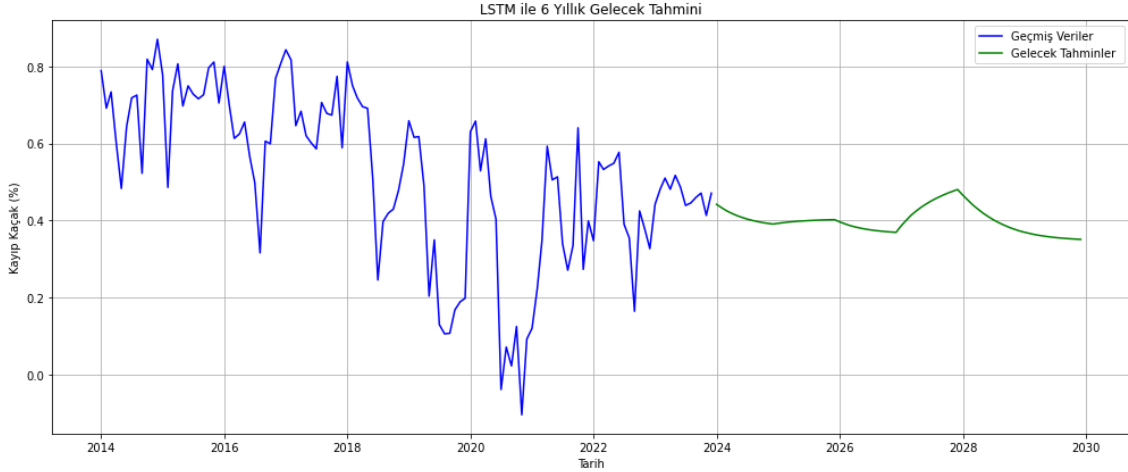
Şekil 6.6’ da Muş Merkez ilçesine ait 6 yıllık kayıp kaçak tahmin grafiği bulunmaktadır. PLC çalışmasının 2023’ten sonra başladığı göz önünde bulundurulursa bu tarihten sonraki süreçte PLC ile daha sürekli ve doğru veriler sağlanabildiği söylenebilir. Ayrıca PLC çalışmasıyla gelen yeni sistemde kullanıcıların bilinçlenmesi ve adaptasyon süreci göz önüne alındığında hemen hızlı bir düşüş görülemeyeceği fakat genel olarak ileriki yıllarda istikrarlı bir düşüş olabileceği tahmini öngörülmektedir.



Şekil 6.7. LSTM ile Muş Bulanık ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini

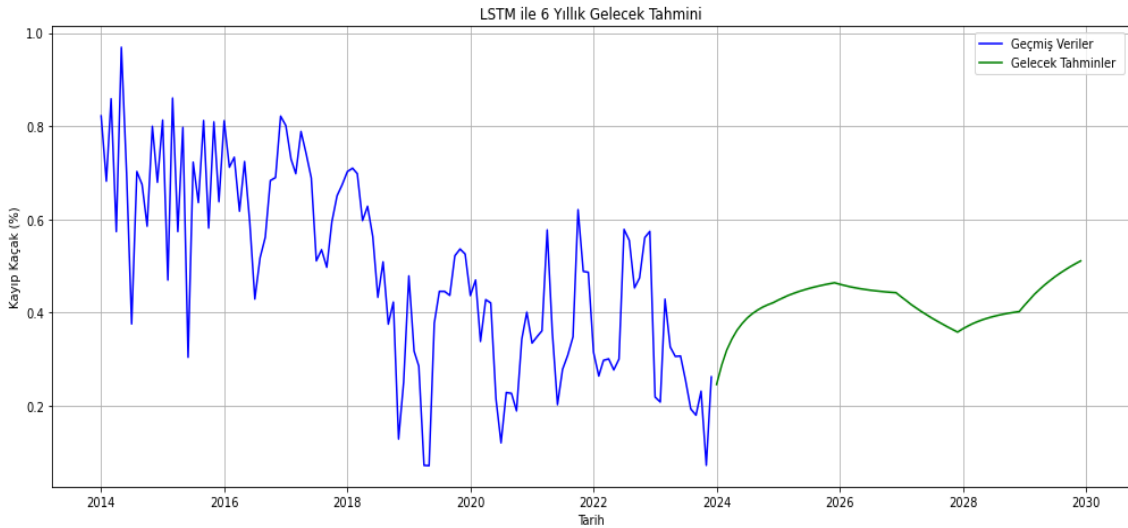
Şekil 6.7’de görülen kayıp-kaçak oranı grafiğinde, 2014–2018 yılları arasında yüksek ve dalgalı seyir dikkat çekmekte olup, bu düzensizlikte bölgedeki zorlu kış şartları ve ulaşım problemleri nedeniyle veri eksikliği veya ölçüm hatalarının etkili olabileceği söylenebilir. 2017 yılında başlatılan PLC uygulamaları sayesinde, ölçüm doğruluğunun ve veri sürekliliğinin artmasıyla birlikte, takip eden yıllarda daha tutarlı ve azalan kayıp-kaçak

oranları gözlemlenmektedir. LSTM tahmin modelinin 2024–2030 dönemi için ürettiği öngörülerde, bu iyileşmenin etkisiyle kayıp-kaçak oranlarında belirgin dalgalanma gözlenmemekte; düşük ve dengeli bir seyir öngörülmektedir.



Şekil 6.8. LSTM ile Muş Malazgirt ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini

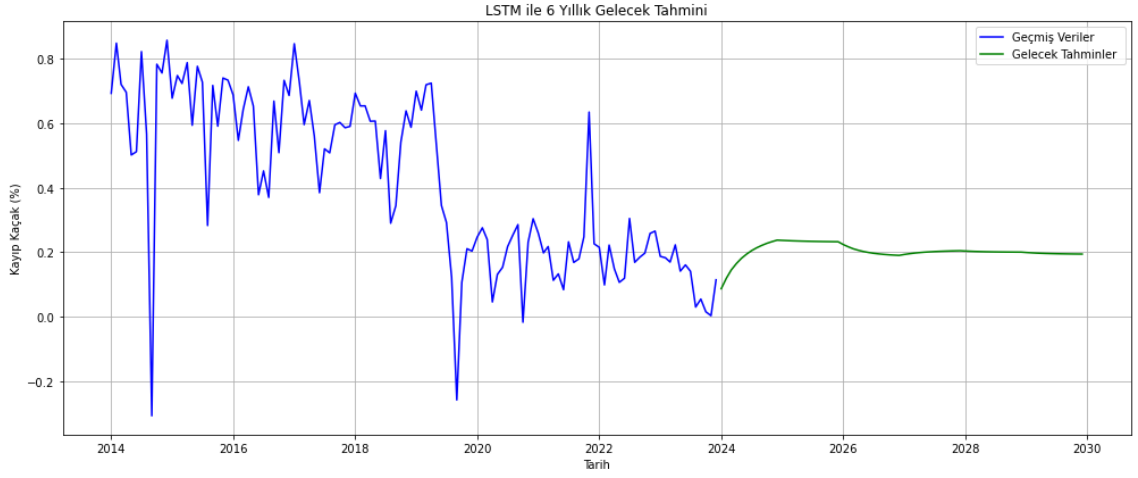
Şekil 6.8’ de Malazgirt ilçesinin 2030 yılına kadar ki 6 yıllık tahmin grafiği bulunmaktadır. 2024 yılından 2030 yılına kadar ki süreçte 2028 yılında kısa bir artış görülme olasılığı olsa da genel olarak bir düşüş olacağı gözlemlenmektedir. 2028 yılındaki artışa neyin etki edebileceği araştırılıp önlem almaya yönelik çalışmalar yapılabilir.



Şekil 6.9. LSTM ile Muş Varto ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini

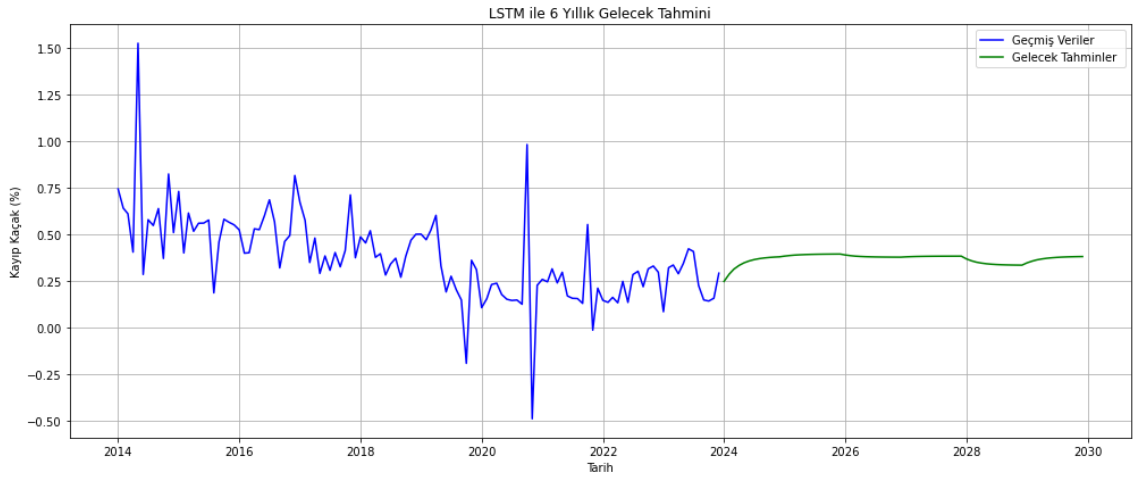
Şekil 6.9’ da Varto ilçesinin 2030 yılına kadar ki 6 yıllık tahmin grafiği bulunmaktadır. Varto ilçesi, diğer ilçelere kıyasla en istikrarsız desenleri sergilemektedir. Örneğin, 2019’da %7’lere kadar düşen oranlar, 2021’de tekrar %60’a yaklaşmıştır. Bu ani sıçramalar, modelin tahmin doğruluğunu zorlaştırmış ve LSTM algoritması Varto için inişli çıkışlı bir tahmin deseni üretmiştir. Bu durum, gerçek verilerdeki yüksek varyans

ve istikrarsız saha uygulamalarından kaynaklanıyor olabilir. Varto için yapılacak yorumda, verinin yapısı nedeniyle LSTM' nin düşük güvenilirlikte tahmin üretebileceği belirtilmelidir.



Şekil 6.10. LSTM ile Muş Korkut ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini

6.10' da Korkut ilçesine bağlı 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmin verileri bulunmaktadır. Tahmin verileri göz önüne alındığında 2030 yılına kadar kayıp kaçak verilerinde çok büyük değişim gözlemlenmeyeceği, çok küçük de olsa 2026'dan sonra düşüş olabileceği gözlemlenmektedir.



Şekil 6.11. LSTM ile Muş Hasköy ilçesi 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmini

6.11' de Hasköy ilçesine bağlı 2030 yılına kadar kayıp kaçak tahmin verileri bulunmaktadır. Tahmin verilerine bakıldığında bu ilçede de kayıp kaçak verilerinde çok büyük değişimlerin gözlemlenmediği çok küçük artış veya azalış olabileceği tahmini yapılmıştır.

6.4 Genel Sonuç

Elektrik enerjisi kullanımı kolay ve yaygın bir enerji türüdür. Ancak üretimden tüketiciye kadar çeşitli teknik ve teknik olmayan kayıplar meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Muş ilindeki elektrik dağıtım şebekesinde teknik kayıplar trafo modellemeleriyle analiz edilmiş, kaçak kullanımlar ise özellikle PLC sistemlerinin devreye girmesiyle büyük oranda azaltma etkisi göstermiştir. Çalışmanın en önemli konusu, geçmiş verilere dayanarak LSTM makine öğrenmesi modeli ile 2030 yılına kadar kayıp-kaçak tahminlerinin yapılmasıdır. Bu model, Muş ili elektrik şebekesinde kaçak kullanımlarını önleme riskli dönemleri önceden belirleme ve odaklı saha müdahaleleri planlama açısından hedefli operasyonel stratejilerde ilk olması sebebiyle literatüre önemli bir yenilik getirmekte ve tahmin sonuçlarına göre stratejik aksiyonlar alınmasına zemin hazırlayacaktır. Sonuçta bu çalışmayla Muş ilinde elektrik enerjisi kayıp-kaçak oranının çok daha düşük seviyelere düşürülmesi ve kayıp-kaçak tespitine yönelik yürütülen operasyonlara katkı sunulması hedeflenmiştir.

6.5 Öneriler

Bu çalışmada kullanılan LSTM modeli, zaman serisi verilerinden yararlanarak kayıp-kaçak tahmininde yüksek doğruluk amaçlanmıştır. Ancak model performansı daha da artırılabilir. Bu doğrultuda aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- **Model Karşılaştırmaları:** LSTM dışındaki diğer makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri (GRU, ARIMA, Prophet, XGBoost, Random Forest vb.) kullanılarak performans karşılaştırmaları yapılabilir.
- **Veri Genişletme:** Sosyoekonomik veriler (nüfus artışı, sanayi tüketimi, mevsimsel değişkenler) ve çevresel faktörler modele entegre edilerek daha kapsamlı tahminler yapılabilir.
- **Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS):** Kayıp-kaçak oranlarının mekânsal dağılımı analiz edilerek sorunlu bölgelerin haritalandırılması sağlanabilir.
- **Anomali Tespiti:** Derin öğrenmeye dayalı anomali tespit yöntemleri ile ani artış gösteren veya olağan dışı tüketimlerin gerçek zamanlı olarak belirlenmesi sağlanabilir.

- **Akıllı Şebeke Entegrasyonu:** Akıllı sayaçlardan gelen verilerle gerçek zamanlı tahmin sistemleri geliştirilebilir; böylece kayıp-kaçaklara hızlı müdahale mümkün hale gelir.
- **Politika ve Denetim Desteği:** Yapay zekâ temelli tahmin sistemleri, dağıtım şirketlerinin kayıp-kaçakla mücadelede daha etkili yatırım ve denetim stratejileri belirlemesine katkı sunabilir.

Bu öneriler doğrultusunda yapılacak yeni çalışmalar, hem modelleme doğruluğunu artıracak hem de Muş ilinin elektrik enerji verimliliği politikalarına daha sağlam bilimsel zeminler sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Alemdağ, m., 2023, Elektrik dağıtım şirketleri kayıp-kaçak oranları, linkedin yazısı, <https://tr.linkedin.com/pulse/elektrik-da%C4%9F%C4%B1t%C4%B1m-%C5%9Firketleri-kay%C4%B1p-ka%C3%A7ak-oranlar%C4%B1-mehmet-alemda%C4%9F-jlhqf> [erişim tarihi: 03/09/2023].
- Ali, S., Khan, A. A., Mahmood, T., 2019, Finite element modeling of transformer core losses using COMSOL Multiphysics, *International Journal of Electrical Engineering Education*, 56 (4), 305–318.
- Alonso, J. M., Ribas, J., Coz, J. J. D., Calleja, A. J., Corominas, E. L., Rico-Secades, M., 2000, Development of a distributive control scheme for fluorescent lighting based on LonWorks technology, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47 (6), 1253–1262.
- Altıntaş, A. (2013), "Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin elektrik üretimi açısından ekonomik etkileri: Avrupa Birliği ve Türkiye uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi.
- Aslan, A., 2021, Jeotermal enerji santralleri [online], İnşaPORT, <https://www.insaport.com/makale/jeotermal-enerji/>.
- Aydem Perakende., 2023, İyonlaşma nedir? İyonlaşma enerjisi ne anlama gelmekte? [online], Aydem Perakende, <https://www.aydemperakende.com.tr/blog/iyonlasma-nedir-iyonlasma-enerjisi-ne-anlama-gelmekte>.
- Bamisile, o., ejji, c. j., osei-mensah, e., chikwendu, i. a., li, j., huang, q., 2022, Long-term prediction of solar radiation using xgboost, lstm, and machine learning algorithms, *proceedings of the 2022 4th asia energy and electrical engineering symposium (aees)*, 214–218, *iee*, <https://doi.org/10.1109/AEEES54110.2022.9759359>.
- Bhatt, m. s., 2003, Energy efficiency improvement of electrical transmission distribution networks, *journal of scientific & industrial research*, 62, 473–490.
- Biçer, T. (2009), "Elektrik güç sistemleri ve kayıpları", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bolton, w., 2015, Chapter 1 - programmable logic controllers. in: *programmable logic controllers (sixth edition)*, boston: newnes, pp. 1-22.
- Caraka, r. e., chen, r. c., supatmanto, b. d., arnita, tahmid, m., toharudin, t., 2019, Employing moving average long short term memory for predicting rainfall, 2019 international conference on technologies and applications of artificial intelligence (taai), 1–5, *iee*, <https://doi.org/10.1109/taai48200.2019.8959804>. COMSOL. (n.d.). Multiphysics modeling. <https://www.comsol.com/multiphysics>
- Çelikpençe, M. (2023), "Elektrik dağıtım şebekelerinde teknik olmayan kayıp kaçakların makine öğrenmesi ile tespiti", Doktora Tezi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul.
- Çetin, M., and Arslan, H., 2019, Akıllı şebekelerde uzaktan sayaç okuma teknolojilerinin kullanımı, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 27(2), 45–52.
- Çetinkaya, Y., 2020, Elektrik iletim sistemlerinde enerji kayıplarının analizi, *Enerji Yayınları*, İstanbul.

- Das, p., barman, s., 2025, Perspective chapter: an overview of time series decomposition and its applications. in: applied and theoretical econometrics and financial crises [working title], intechopen, <https://doi.org/10.5772/intechopen.xxxxx>.
- Davidson, i. e., 2003, Evaluation and effective management of nontechnical losses in electrical power networks, the transactions of the south african institute of electrical engineers, 94 (3), 39–42.
- Demir, m., ateş, h., 2020, Enerji sistemlerinde yalıtkan seçiminin verimlilik üzerindeki etkisi, elektrik-elektronik teknolojileri dergisi, 8 (2), 55–63.
- Demirtaş, b., koç, a., yıldız, r., 2020, Kayıp-kaçak elektrikle mücadelede teknolojik çözümler: plc sistemlerinin rolü, enerji politikaları ve uygulamaları, 8 (1), 23–34.
- Depuru, s. s. s. r., wang, l., devabhaktuni, v., 2011, Electricity theft: overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft, energy policy, 39 (2), 1007–1015.
- Duan, h., hu, z., zhang, j., 2023, Comparative analysis of arima and lstm in long-term deformation prediction, engineering geology, 309, 106868.
- Dudek, g., 2023, Std: a seasonal-trend-dispersion decomposition of time series, ieee transactions on knowledge and data engineering, 35 (10), 10339–10350, <https://doi.org/10.1109/tkde.2022.3163282>.
- Duman, h., aydoğan, t., 2019, Elektronik-elektrik sayaç verilerinin optik porttan gömülü sistem kartları ile okunması, dumlupınar üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi, 27–36.
- Düzgün, b., 2018, Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları, politeknik dergisi, 21 (3), 621–632.
- Eldem, m. o., 2017, Akıllı şebekeler, tmmob emo ankar şubesi haber bülteni, 2, 6–9.
- Elektrik mühendisleri odası, t.y.-b., https://www.emo.org.tr/ekler/e34c09bf65ccaba_ek.pdf [erişim tarihi: 10/04/2025].
- El-saadany, e., salama, m., 2004, Theft detection in power systems: a review, electric power systems research, 69 (3), 291–300.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022, *Ulusal enerji verimliliği eylem planı 2022–2027*, ETKB Yayınları, Ankara.
- Erdem, F., Uğur, S., 2022. Reaktif güç kompanzasyonunun dağıtım şebekelerinde kayıp azaltımına etkisi, *Enerji Verimliliği Araştırmaları*, 6 (1), 22–30.
- Erol, E. (2007), *Türkiye’de elektrik enerjisinin tarihi gelişimi: 1902–2000*, Doktora Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Ertaş, E., Arslan, S., 2014, Pille çalışan sayaçlar için AMI sistem çözümleri, 2. Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekeler Kongre ve Fuarı, İstanbul, 167–172.
- ETKB – Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023, *Elektrik dağıtım sektör raporu 2023*, Ankara.
- ETKB, 2023, *Ulusal enerji verimliliği strateji belgesi 2023–2030*, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.

- Flammini, A., Rinaldi, S., and Vezzoli, A., 2011, The sense of time in open metering system, 2011 IEEE International Conference on Smart Measurements for Future Grids (SMFG), 22–27.
- Galli, S., Scaglione, A., and Wang, Z., 2011, For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid, *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 998–1027.
- Galloway, B., ve Hancke, G. P., 2013, Introduction to Industrial Control Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2), 860-880.
- Giustina, D. D., Ferrari, P., Flammini, A., Rinaldi, S., and Sisinni, E., 2013, Automation of distribution grids with IEC 61850: A first approach using broadband power line communication, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(9), 2372–2383.
- Gönen, S. (2018). PLC ile kontrol edilen mikro tip akıllı şebeke sistemlerde bilgi güvenliğinin sağlanması (Yayınlanmamış doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güney, İ., 2005, Şebeke kayıplarının azaltılması, *Elektrik Mühendisliği*, (262), 479–484
- Güngör, H., and Yılmaz, S., 2019, Elektrik şebekelerinde teknik kayıpların azaltılması için yöntem önerileri, *Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 24(3), 45–53.
- Güçlü, B., Bayrakçı, H. C., and Süzen, A. A., 2019, Elektrik sayaçlarının uzaktan okunması ve enerji analizi, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 10(3), 27–39.
- Hochreiter, S., and Schmidhuber, J., 1997, Long short-term memory, *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
- Hussain, I., and Mahmood, A., 2020, Impact of electricity theft on power distribution networks: Challenges and solutions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 116, 105584.
- Ibrahim, E. S., 1999, Management of loss reduction projects for power distribution systems, *Electric Power Systems Research*, 55, 49–56.
- International Electrotechnical Commission., 2007, Efficient electrical energy transmission and distribution, International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IRJET., 2014, Power Line Communication (PLC) using PIC Micro-controller, *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Jokar, M. R., Arian, M., and Khodabakhsh, H., 2012, A comprehensive review of non-technical loss detection in power systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2743–2753.
- Jokar, P., Arianpoo, N., and Leung, V. C. M., 2016, Electricity theft detection in AMI using customers' consumption patterns, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 216–226.
- Karaca, B. (2023). Tüketim sayaçlarında MBus standartlarının uygulanmasının geleneksel metotlara göre avantajları (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Maltepe Üniversitesi.
- Karaman, B., and Taşkın, S., 2023, Akıllı şebekeler ve akıllı bina uygulamaları için Wi-Fi tabanlı yeni nesil elektrik sayacı tasarımı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(6), 577–588.

- Karbasi, M., et al., 2024, Multi-step ahead forecasting of electrical conductivity in rivers by using a hybrid convolutional neural network–long short-term memory (CNN-LSTM) model enhanced by Boruta-XGBoost feature selection algorithm, *Scientific Reports*, 14(1), 15051
- Kasztenny, B., Hunt, R., and Vaziri, M., 2007, Protection and control redundancy considerations in medium voltage distribution systems, *Proceedings of the Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 418–439.
- Kocaman, b., 2018, Teknik olmayan enerji kayıplarının azaltılmasında plc sayaçlarının önemi, *beu fen bilimleri dergisi* 7 (2), 220–230.
- Koç, E., and Kaya, K., 2015, Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu, *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36–47.
- Koç, E., Şenel, M. C. 2013. “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu–Genel Değerlendirme,” *Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 54, sayı 639, s. 32-44.
- Kotu, V., and Deshpande, B., 2019, *Data science: Concepts and practice*, Morgan Kaufmann.
- Li, L., Hu, X., Huang, J., and He, K., 2008, Research on the architecture of automatic meter reading in next generation network, 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 92–97.
- Livieris, I. E., Pintelas, E., and Pintelas, P., 2020, A CNN–LSTM model for gold price time-series forecasting, *Neural Computing and Applications*, 32(23), 17351–17360.
- Livieris, I. E., Pintelas, E., and Pintelas, P., 2021, Forecasting energy consumption using machine learning models and hybrid algorithms, *Energies*, 14(12), 3450.
- Li, Y., Chen, Y., and Huang, Q., 2023, A hybrid CNN-LSTM model for multi-class electricity theft detection, *Energies*, 16(4), 1234.
- Makridakis, S., Spiliotis, E., and Assimakopoulos, V., 2018, Statistical and machine learning forecasting methods: Concerns and ways forward, *PLOS ONE*, 13(3), e0194889.
- Mishra, A., and Tripathi, M., 2016, Detection of non-technical losses in power utilities using data mining techniques, *Journal of Electrical Engineering*, 67(1), 30-39.
- Mlynek, P., Koutny, M., and Misurec, J., 2010, Power line modelling for creating PLC communication system, *International Journal of Communications*, 4(1).
- Mlynek, P., Misurec, J., Kolka, Z., Slacik, J., and Fujdiak, R., 2015, Narrowband power line communication for smart metering and street lighting control, *IFAC-PapersOnLine*, 48(4), 215–219.
- Mrozinski, D., 1991, New approaches to automatic consumption meter reading in Germany, *Computer Standards & Interfaces*, 12(1), 43–52.
- Nane, M., Gök, H., Akyazı, Ö., and Aksoy, C., 2023, Akıllı elektrik sayacı ile enerjinin takip ve kontrolü, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(4), 949–961.
- Onat, N., 2010, Transmission and distribution losses of Turkey’s power system, 4th WSEAS International Conference on Energy Planning, Energy Saving Environmental Education (EPESE’10), 170–175.

- Özel, K. (2006), "Losses in electric distribution systems", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Pandit, A., 2019, What is Power Line Communication (PLC) and how does it work [online], Circuit Digest, <https://circuitdigest.com/article/what-is-power-line-communication-plc-and-how-does-it-work>.
- PeerJ Computer Science., 2024, A novel RNN–BiLSTM–CRF model for electricity theft detection using daily and weekly consumption data, PeerJ Computer Science, 10, e1398.
- Piercy, R., and Cress, S. L., 2007, Recalculation of distribution system energy losses at Hydro One, Kinectrics Inc.
- PubMed, 2025. Detection of electricity theft using CNN and LSTM models, IEEE Transactions on Smart Grid, 16 (2), 1334–1346.
- Rassaei, F., and Khalilzadeh, M., 2022, A deep learning-based hybrid model for electricity theft detection in smart meters, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 13(7), 3425–3436.
- REN21., 2023, Renewables 2023 Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris.
- Ribeiro, M., Szczupak, J., Irvani, R., Gu, Y., Dash, P., and Mamishev, A., 2007, Emerging signal processing techniques for power quality applications, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007, 87425.
- Rinaldi, S., Ferrari, P., Flammini, A., Rizzi, M., Sisinni, E., and Vezzoli, A., 2015, Performance analysis of power line communication in industrial power distribution network, Computer Standards & Interfaces, 42, 9–16.
- Saleti, S., Panchumarthi, L. Y., Kallam, Y. R., Parchuri, L., and Jitte, S., 2024, Enhancing forecasting accuracy with a moving average-integrated hybrid ARIMA-LSTM model, SN Computer Science, 5(6), 704.
- Salkim, E., Shiraz, A., and Demosthenous, A., 2019, Impact of neuroanatomical variations and electrode orientation on stimulus current in a device for migraine: A computational study, Journal of neural engineering, 17(1), 016006.
- Salkim, E., Zamani, M., Jiang, D., Saeed, S. R., and Demosthenous, A., 2022, Insertion guidance based on impedance measurements of a cochlear electrode array, Frontiers in Computational Neuroscience, 16, 862126.
- Sargın, Ş. (2006). Üretimden tüketime elektrik enerjisi sistemlerinde meydana gelen kayıplar ve giderilmesine yönelik çalışmalar (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sharma, K. L. S., 2011, 12 - Types of automation systems, in: Overview of Industrial Process Automation, Elsevier, London, UK, 153-164.
- Siarni-Namini, S., Tavakoli, N., and Namin, A. S., 2019, A comparison of ARIMA and LSTM in forecasting time series, 2018 IEEE International Conference on Big Data, 1394–1401.
- Sivaneasan, B., So, P. L., and Gunawan, E., 2008, Modeling and performance analysis of automatic meter reading systems using power line communications, 2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 1446–1450.

- Smyl, S., 2020, A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting, *International Journal of Forecasting*, 36(1), 75–85.
- Storr, W., 2014, Basic Electronics Tutorial: Closed Loop System [online], <https://www.electronicstutorials.ws/systems/closed-loop-system.html> [Ziyaret Tarihi: 20.05.2018].
- Stouffer, K. A., Falco, J. A., ve Scarfone, K. A., 2011, Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security-SP 800-82, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1-155.
- Sultania, S., and Nema, R. K., 2011, Review of non-technical losses detection in electricity distribution system, *International Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2(3), 258-267.
- Takmaz, E., 2014, Modüler akıllı elektrik sayacı, ICSG İstanbul 2014: 2. Uluslararası Akıllı Şebekeler Kongresi ve Fuarı, İstanbul.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı., 2016, Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu raporu, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- T.C. Özelleştirme İdaresi Başkanlığı., 2009, 2008 Türkiye elektrik dağıtım ve tüketim istatistikleri [online], <http://www.oib.gov.tr/tedas/tedas.htm>.
- Texas Instruments., 2024, Solar Power Line Communication Reference Design, TIDUF48C.
- Tombaloğlu, B., and Erdem, H., 2021, Turkish speech recognition techniques and applications of recurrent units (LSTM and GRU), *Gazi University Journal of Science*.
- Tugal, I., and Sevgin, F., 2023, Analysis and forecasting of temperature using time series forecasting methods: A case study of Mus, *Thermal Science*, 27(4B), 3081–3088.
- Tuğal, İ., 2024, Comparative analysis of LSTM architectures for wind speed forecasting: A case study in Muş, Turkey, *Turkish Journal of Natural Sciences*, 13(4), 107–119.
- Usta, O., Sonsuz, K., and Eksi, S., 2008, Akıllı Sayaç Okunma Sistemleri için Alternatif İletişim Ağlarının Değerlendirilmesi, 13. Ulusal Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Kongresi, Ankara.
- Übelacker, E., 2005, enerji / enerji: neden ve nasıl 2, Tudem Publishing, İzmir, 48 sayfa.
- Wang, C.-H., Chen, C.-Y., and Sun, T.-P., 2011, Circuit implementation of OOK modulation for low-speed power line communication using X10 standard, *ICACT 2011 Conference Proceedings*.
- Wang, J., and Li, S., 2020, Advances in transformer core materials and efficiency improvement, *Journal of Electrical Engineering*, 45(4), 233-240.
- Wang, J., Zhang, X., and Liu, Y., 2019, An advanced approach for electricity theft detection using machine learning, *Energy*, 176, 682-691.
- Yaşar, C., Aslan, Y., and Biçer, T., 2010, Bir dağıtım transformatörü bölgesindeki kayıpların incelenmesi, *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (022), 9–22.
- Yıldız, A., and Karakaş, Z., 2021, Elektrik iletiminde malzeme seçiminin sistem kayıplarına etkisi, *Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 9(1), 13–19.

- Yılmaz, A., and Kaya, M., 2021, Elektrik iletiminde enerji kayıplarının azaltılmasına yönelik modern izleme sistemleri, Elektrik ve Enerji Araştırmaları Dergisi, 15(3), 12–20.
- Zhang, Y., Smith, T., and Lee, K., 2021, High-temperature superconductors for power transmission: A review, Superconductor Science and Technology, 34(6), 065007.
- Zulkernine, F., and Mohamed, N., 2018, An overview of electricity theft detection techniques and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 1145-1159.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Masallah Toplu

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Muş İbni Sina Anadolu Lisesi, Merkez, MUŞ	2015
Üniversite	: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Tuşba, VAN	2020
Yüksek Lisans	: Muş Alparslan Üniversitesi, Merkez, MUŞ	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2020 -2021	Enertest Enerji A.Ş	Elektrik-Elektronik Mühendisi
2021-	VEDAŞ	Elektrik-Elektronik Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Elektrik - Elektronik (Üretimden tüketime tüm elektrik şebekeleri, PLC)

YABANCI DİLLER

İngilizce (A2)

YAYINLAR

M. Toplu, İ. Tugal, E. Salkım, ‘‘Muş İlindeki Kaçak Kayıpların Makine Öğrenmesi ile Tahmini’’ 7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, 2025.