

HPLC ile teknik olmayan elektrik kayıplarının azaltılmasında etki skoru geliştirme ve istatistiksel karşılaştırma: Türkiye'den bir saha analizi

Developing an impact scoring method and statistical comparison for reducing non-technical electricity losses with HPLC: a field analysis from Turkey

Oğuz Deniz TOKLU¹  Necati VARDAR^{*2} 

¹KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Yönetimi Bölümü, 42020, Konya

²KTO Karatay Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya

• Geliş tarihi / Received: 14.04.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 23.10.2025

Öz

Bu çalışma, yüksek frekanslı enerji hattı haberleşmesi (HPLC) tabanlı uzaktan sayaç sistemlerinin teknik olmayan elektrik kayıplarına etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Türkiye'nin kırsal bir bölgesinde yer alan 16 trafoya ait üç yılla yayılmış saha verileri kullanılarak, HPLC kurulumu öncesi ve sonrası dönemlere ait kayıp-kaçak oranları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, yalnızca toplam sistem performansı değil, her bir trafo düzeyinde kayıp değişimleri de ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca HPLC uygulamasının etkisini nicel olarak ölçümleyebilmek amacıyla, Kayıp Oranı Azalma Yüzdesi (KAY) ve Başlangıç Risk Katsayısı (BRK) bileşenlerine dayalı yeni bir skorlandırma yaklaşımı olan Uygulama Etki İndeksi (UEİ) geliştirilmiştir. UEİ, sistemin sahadaki etkisini sayısal olarak derecelendirme imkânı sunmakta ve müdahale önceliklendirme süreçlerine entegre edilebilecek bir karar destek yapısı sağlamaktadır. Çalışma, veri odaklı karşılaştırmalı yöntem önerisiyle HPLC teknolojisinin izleme ve değerlendirme süreçlerindeki potansiyel rolünü disiplinler arası bir çerçevede ele almaktadır.

Anahtar kelimeler: Akıllı şebekeler, Enerji verimliliği, HPLC teknolojisi, Teknik olmayan kayıplar

Abstract

This study evaluates the impact of high-frequency power line communication (HPLC)--based remote metering systems on non-technical electricity losses. Drawing on a three-year dataset from 16 rural transformers in Turkey, it conducts a comparative analysis of loss rates before and after the implementation of HPLC. The analysis addresses both overall system performance and transformer-level variations in loss behavior. To quantitatively assess the effectiveness of HPLC, the study introduces the Implementation Impact Index (III). This novel scoring method incorporates the Loss Reduction Percentage (LRP) and the Initial Risk Coefficient (IRC). This index provides a numerical representation of field-level impact and offers a structured framework for prioritizing future interventions. The methodology situates HPLC within a data-driven, interdisciplinary evaluation model, contributing to a more systematic understanding of its role in energy monitoring and management processes.

Keywords: Energy efficiency, HPLC technology, Non-technical losses, Remote meter reading, Smart grids

1. Giriş

1.1. Introduction

Türkiye, enerji ihtiyacında dışa bağımlı bir ülke olarak, elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar meydana gelen kayıpları azaltmak amacıyla kapsamlı çalışmalar yürütmektedir. Elektrik dağıtım şebekesinde toplam kayıplar, şebekeye verilen enerji ile tahakkuk eden enerji arasındaki fark üzerinden hesaplanır ve bu fark genellikle “yüzde kayıp” olarak ifade edilmektedir (Düzgün, 2018). Elektrik enerjisi, üretimden tüketiciye ulaşana kadar hem teknik hem de teknik olmayan kayıplara maruz kalmaktadır.

Teknik kayıplar, şebekedeki iletim ve dağıtım süreçlerinde kullanılan ekipman ve altyapının fiziksel özelliklerinden kaynaklanırken, teknik olmayan kayıplar genellikle kaçak kullanım, kayıt dışı tüketim ve hatalı ölçümlerden oluşur. Teknik kayıplar, doğal bir kayıp türü olarak kabul edilmekte ve mümkün olan en düşük

*Necati Vardar; necativardar@gmail.com

seviyeye indirilmesi hedeflenirken, teknik olmayan kayıplar, sosyal, ekonomik, kültürel ve bölgesel faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve daha karmaşık bir yapı arz etmektedir. Yapılan araştırmalarda teknik olmayan kayıpların sebepleri arasında ekonomik zorluklar, dini inanç eksikliği, bilgi yetersizliği ve kişisel çıkarlar ön plana çıkmaktadır (Macit, 2014).

Teknik olmayan kayıplar, hem enerji dağıtım şirketlerinin ekonomik kaybına hem de şebeke güvenilirliğinin zayıflamasına yol açmaktadır. Bu nedenle teknik olmayan kayıpların azaltılması için enerji şirketleri sistematik çalışmalar yürütmektedir. Uygun teknolojilerin seçimi, politika belirleme süreçleri ve kayıpların düzenli takibi bu çalışmaların temel unsurları arasında yer almaktadır. Bu süreçlerin etkin yürütülmesi, enerji arz ve talebinin dengede tutulmasına katkı sağlar. Bu çalışmaların etkili olabilmesi, yalnızca denetim faaliyetlerine değil, aynı zamanda teknolojik altyapının modernizasyonuna da bağlıdır.

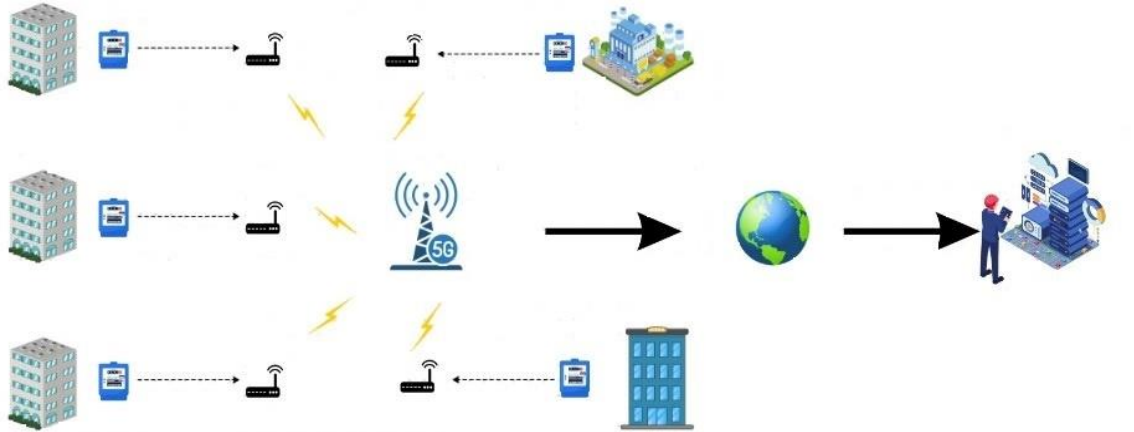
Dünya genelinde kaçak elektrik kullanımı, farklı sosyo-ekonomik ve yapısal etkenlere dayanmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Kanada'da enerji tüketiminin bir kısmı, yasa dışı hint keneviri üretimini gizlemek amacıyla kaçak elektrik kullanımıyla ilişkilendirilmiştir (Katherine, 2013). Latin Amerika'da her yıl üretilen toplam elektriğin yaklaşık %17'sinin kayıp ve kaçak kullanım nedeniyle tüketildiği, bu durumun yıllık 11 ila 17 milyar ABD doları arasında ekonomik kayba yol açtığı ifade edilmektedir (Mori vd. 2014). Teknik olmayan kayıpların azaltılması amacıyla gelişmiş ölçüm altyapıları ve haberleşme sistemleri giderek önem kazanmaktadır. HPLC, mevcut güç hatları üzerinden veri iletimi yapılmasına olanak tanıyarak, ilave iletişim altyapısı gereksinimini ortadan kaldırmakta ve sayaç verilerinin uzaktan, güvenilir şekilde okunmasına imkân tanımaktadır.

Türkiye'de elektrik dağıtım şebekelerinde teknik olmayan kayıplarla mücadele kapsamında çeşitli uygulama örnekleri bulunmaktadır. Bu uygulamalardan biri de Meram Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (MEDAŞ) tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen denetimlerdir. Söz konusu denetimler sonucunda, bir depoda piyasa değeri yaklaşık 10 bin dolar olan dijital para madenciliği cihazlarının kaçak elektrik kullandığı tespit edilmiştir. Konya, Aksaray, Niğde, Kırşehir, Nevşehir ve Karaman illerine hizmet veren MEDAŞ, 2023 itibarıyla 2.415.291 kullanıcıya, 98.701 km havai hat, 27.356 km yer altı kablosu ve 67.296 trafo ile elektrik dağıtımını sağlamaktadır. Denetimlerin sıklaştırılması sayesinde, şirketin kayıp-kaçak oranı 2022 yılında %6,14 iken 2023 yılında %5,77'ye düşmüştür (Elder, 2023). Ancak bu oranın daha da düşürülebilmesi için, sayaç okuma süreçlerinin dijitalleşmesi ve haberleşme altyapısının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Kayıpları azaltmak ve kaçak kullanımı önlemek için, sayaç okuma işlemlerinin yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesi, ölçüm verilerinin eksiksiz ve hatasız kaydedilmesi, faturalandırma süreçlerinin de tam ve zamanında yürütülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu süreçlerin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi yalnızca insan gücüne değil, aynı zamanda gelişmiş teknolojik altyapılara da bağlıdır. Bu bağlamda, sağlam bir haberleşme altyapısı, akıllı sayaç uygulamaları ve uzaktan okuma sistemleri enerji yönetimi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Geleneksel sayaçların aksine, akıllı sayaçlar yalnızca enerji tüketimini ölçmekle kalmayıp, uzaktan okuma, açma-kapama işlemleri, veri saklama ve arıza tespiti gibi pek çok işlevi desteklemektedir. Bu sayaçlar sayesinde tüketim verileri merkezi sistemler üzerinden izlenebilmekte, bu da yük dengeleme, talep tahmini ve enerji optimizasyonu gibi süreçlerin daha verimli yürütülmesini sağlamaktadır. Akıllı sayaçlar yalnızca bireysel konutlarda değil; sanayi tesisleri, ticari işletmeler ve tarımsal alanlar gibi geniş kullanım alanlarında da etkin biçimde kullanılmaktadır. Elektrik dağıtım şebekelerinde kayıp ve kaçak oranlarının azaltılabilmesi için hem teknik hem de teknik olmayan önlemlerin bütüncül bir biçimde uygulanması gerekmektedir. Bu kapsamda, akıllı sayaçların yaygınlaştırılması, uzaktan okuma sistemlerinin optimize edilmesi ve haberleşme altyapılarının geliştirilmesi büyük bir stratejik önem taşımaktadır. Aynı zamanda, bu sistemler kullanıcı farkındalığını artırmakta, denetim süreçlerini güçlendirmekte ve dağıtım şirketlerinin operasyonel verimliliğini yükseltmektedir. Bu noktada, HPLC teknolojisinin sunduğu avantajların somut saha verileriyle değerlendirilmesi, enerji yönetimi açısından önemli bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, teknik olmayan elektrik kayıplarının azaltılmasında HPLC teknolojisinin etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Literatürde HPLC ve benzeri haberleşme teknolojilerinin teknik avantajlarına sıklıkla yer verilmekle birlikte, Türkiye ölçeğinde bölgesel uygulamalardan elde edilen somut ve karşılaştırmalı verilerin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu eksiklikten yola çıkan çalışmada, Niğde iline bağlı kırsal bölgelerde yer alan 16 trafoda HPLC tabanlı sayaç sistemlerinin devreye alınmasından önce ve sonra oluşan teknik olmayan kayıp oranları sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. Böylece, yalnızca HPLC teknolojisinin mevcut avantajları değil, aynı zamanda saha uygulamalarına dayalı ölçülebilir etkileri de analiz

edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, sistemin verimliliğini artırmaya yönelik öneriler de sunulurken, HPLC teknolojisinin enerji yönetim süreçlerindeki rolüne yönelik yönetsel bir katkı sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 1. Akıllı sayaç sisteminin bileşenleri ve veri akışı

Figure 1. Components of the smart metering system and data flow

2. HPLC teknolojisinin temelleri ve akıllı şebekelerdeki rolü

2. Fundamentals of HPLC technology and its role in smart grids

HPLC teknolojisinin uygulandığı altyapının işleyişini ve veri aktarım mekanizmasını daha iyi kavrayabilmek için, sistemin temel bileşenlerini görsel olarak da incelemek önemlidir. Bu çerçevede, uzaktan sayaç okuma ve veri iletim sistemlerinin temel bileşenlerini gösteren şematik yapı Şekil 1’de sunulmaktadır. Bu sistem, sayaçlardan elde edilen enerji tüketimi verilerinin, 5G gibi kablosuz haberleşme teknolojileri kullanılarak merkezi bir veri tabanına iletilmesini ve burada analiz edilerek uzaktan yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Söz konusu yapı, Akıllı Şebekeler ve Otomatik Sayaç Okuma Sistemi (OSOS) gibi ileri düzey çözümlerin temel altyapısını oluşturmaktadır. Literatürde de görüldüğü üzere, RS485, LoRaWAN, RF, Power Line Communication (PLC) ve HPLC gibi farklı protokoller kullanılarak sayaçlardan endeks verisi, akım-gerilim bilgisi ve kesinti kayıtları alınabilmekte; aynı zamanda bu sistemler sayesinde uzaktan açma-kapama gibi işlemler de gerçekleştirilebilmektedir.

2.1. HPLC teknolojisinin temel prensipleri

2.1. Fundamental principles of HPLC technology

Enerji iletim hatları, yalnızca elektrik iletmekle kalmayıp aynı zamanda haberleşme amacıyla da kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu çerçevede, PLC mevcut elektrik iletim altyapısını kullanarak veri taşıma prensibine dayanan bir teknolojidir. Yeni bir iletişim altyapısı kurmaksızın, elektrik hatlarının mevcut varlığıyla senkronize çalışan bu sistem, özellikle kırsal alanlarda ekonomik ve teknik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır (Yıldız & Çetinkaya, 2022).

PLC teknolojisinin tarihçesi 1838 yılına kadar uzanmakta olup, Edward Davy tarafından Liverpool Telgraf Şirketi adına yapılan bir deneyde ilk kez kullanılmıştır (Brown, 1990). PLC teknolojisi kullanılan frekans aralığına göre dar bant, orta bant ve geniş bant olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Her bir bant aralığı, veri iletim hızı ve mesafe açısından farklılık göstermektedir. Özellikle dar bant PLC sistemleri, sayaç verilerinin toplanması ve merkezi sistemlere aktarılmasında ön plana çıkmaktadır.

2.2. PLC ve HPLC teknolojilerinin teknik özellikleri

2.2. Technical features of PLC and HPLC technologies

Enerji iletim ve dağıtım altyapıları yalnızca elektrik taşıma görevini üstlenmemekte, aynı zamanda veri iletimi amacıyla da kullanılabilir. Bu amaçla geliştirilen PLC teknolojisi, mevcut enerji hatlarını veri iletim kanalı olarak kullanarak hem ekonomik hem de altyapı açısından verimli çözümler sunmaktadır (Yigit vd., 2014). PLC sistemleri, iletim frekansına göre üç gruba ayrılmaktadır: dar bant (3–500 kHz), orta bant (500

kHz–10 MHz) ve geniş bant (10 MHz–100 MHz). Dar bant PLC sistemleri özellikle sayaç okuma, faturalama ve kontrol komutları için uygundur (Abrahamsen vd, 2021). Geniş bant sistemler ise yüksek veri hızı gerektiren uygulamalarda kullanılmakla birlikte, daha karmaşık ve maliyetli çözümler gerektirmektedir.

PLC teknolojisinin yüksek frekanslı bir türevi olan HPLC, özellikle akıllı sayaç sistemleri ve enerji yönetim uygulamaları için geliştirilmiştir. HPLC, daha fazla taşıyıcı sayısı ve daha geniş frekans bandı sayesinde, klasik PLC sistemlerine kıyasla daha yüksek veri aktarım hızı, daha düşük hata oranı ve daha güçlü kapsama performansı sunmaktadır (Aktif Elektronik, t.y.). Bu yönüyle HPLC, özellikle geniş coğrafi alanlara yayılmış ve GSM sinyali yetersiz olan kırsal bölgelerde tercih edilmektedir (Kocaman, 2018).

Tablo 1. Enerji hattı üzerinden haberleşme ile kablosuz bağlantı teknolojilerinin karşılaştırılması
Table 1. Comparison of power line communication and wireless communication technologies

Bağlantı teknolojisi	Maliyet	Yayılma	Veri oranı	Topoloji	Terminal	İletişim alanı
Uydu	Pahalı	Basit	155 Mbps	Çoklu Nokta	Sabit	1000-36000 km
Mikro Dalga	Pahalı	Zor	155 Mbps	Çoklu Nokta	Sabit	5 km
LMDS	Pahalı	Zor	155 Mbps	Çoklu Nokta	Ayarlı	4 km
MMDS	Pahalı	Zor	10 Mbps	Çoklu Nokta	Sabit	100 km
FSO	Pahalı	Zor	2.5 Gbps	Çoklu Nokta	Sabit	4 km
Wi-Fi	Ucuz	Basit	11/54Mbps	Çoklu Nokta	Hareketli	100 km
3G ve 4G	Pahalı	Kolay	1-10 Mbps	Çoklu Nokta	Hareketli	Hareket alanı ile sınırlı
PLC	Ucuz	Kolay	200 Mbps	Çoklu Nokta	Sabit	Gerilime göre çeşitli

Farklı haberleşme teknolojilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği Tablo 1'de, HPLC'nin maliyet, kapsama alanı, veri iletim oranı ve uygulama kolaylığı açısından sahip olduğu teknik üstünlükler açıkça görülmektedir. Uydu, mikrodalga, LMDS, Wi-Fi ve 3G/4G gibi sistemlerle kıyaslandığında, HPLC'nin düşük kurulum maliyeti, mevcut altyapının kullanılabilmesi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunduğu dikkat çekmektedir (Yigit vd., 2014).

Bu avantajlar Tablo 2'de daha ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Mevcut elektrik altyapısının yeniden kullanımı, yaygın kapsama alanı ve düşük güç tüketimi gibi parametreler, özellikle geniş alanlı, düşük yoğunluklu yerleşimlerde haberleşme ihtiyaçlarını ekonomik biçimde karşılamak açısından HPLC'yi cazip hale getirmektedir. Ayrıca, düşük enerji tüketimi ve uzun menzilli iletişim özellikleri sayesinde, HPLC sistemleri yalnızca enerji şirketleri için değil, akıllı şehir uygulamaları için de uygun bir altyapı çözümü sunmaktadır.

Bununla birlikte, HPLC teknolojisinin bazı sınırlamaları da mevcuttur. Tablo 3'te detaylandırıldığı üzere, empedans uyumsuzluğu, elektromanyetik gürültüye karşı duyarlılık, sınırlı bant genişliği ve veri güvenliği gibi teknik zorluklar, sistemin kurulum ve işletme aşamalarında dikkate alınması gereken faktörler arasında yer almaktadır. Örneğin, enerji iletim hatları haberleşme için tasarlanmadığından, zaman içinde değişen empedans değerleri sinyal bütünlüğünü bozabilir (Abrahamsen vd., 2021). Ayrıca, enerji hattının açık erişimli olması nedeniyle veri güvenliği açısından özel önlemlerin alınması gereklidir (He et al., 2017; Cui et al., 2020)

Tablo 2. Enerji hattı üzerinden haberleşmenin avantajları

Table 2. Advantages of power line communication

Enerji hattı üzerinden haberleşmenin avantajları	Açıklama
Mevcut Altyapının Kullanımı	Enerji iletim hattı üzerinden haberleşmede, var olan elektrik hatlarının kullanılmasından dolayı ayrı bir iletim (haberleşme) altyapısı gerektirmez.
Yaygın Kullanım	Elektrik hatları neredeyse her yerde mevcuttur. Genellikle şehirlerde ve kırsal bölgelerde kullanılır. Bu nedenle enerji hattı üzerinden haberleşme geniş bir alana yayılabilen yaygın bir haberleşme ağı sağlar.
Düşük Maliyet	Enerji hattı üzerinden haberleşme, ayrı bir iletişim altyapısı kurma maliyetinden dolayı önemli tasarruf sağlar.
Güvenli Enerji	Enerji iletim hattı üzerinden haberleşmesi doğal afetlerden etkilemeyen yeraltı gibi güvenilir hatlar üzerinden gerçekleştirilebilir.
Düşük Güç Tüketimi	Enerji iletim hattı üzerinden yapılan haberleşme, düşük güç tüketiminden dolayı pil ömrünü uzatır.
Uzun Menzilli Haberleşme	Enerji hattı üzerinden yapılan haberleşme, genellikle uzun mesafeler boyunca gerçekleştirilebilir ve bu nedenle uzun menzilli iletişim sağlar.

Tablo 3. Enerji hattı üzerinden haberleşmenin dezavantajları**Table 3.** Disadvantages of power line communication

Enerji hattı üzerinden haberleşmenin dezavantajları	Açıklama
Empedans Uyumsuzluğu	Enerji iletim hatları, haberleşme sistemlerinde gereken sabit empedansı sağlamak için tasarlanmamıştır. Bu nedenle hat empedansı farklı yükler ve bölgelere göre zamanla değişebilir bu da empedans uyumsuzluğuna neden olur ve sinyal bozulmasına yol açabilir.
Gürültü	Enerji hattı üzerinden iletilen sinyallerde, güç dalgalanmaları ve elektromanyetik gürültü gibi faktörlerden kaynaklanan gürültü oluşabilir. Bu da sinyallerin güçlü ve net bir şekilde alınmasını zorlaştırabilir.
Güvenlik	Enerji iletim hatlarına, fiziksel olarak birçok kişi tarafından erişilebilir olması güvenlik açısından sorun oluşturabilir. Bu iletim hatlarından taşınan sinyallerin yasadışı olarak ele geçirilmesi veya manipüle edilmesi önemli bir güvenlik sorunudur.
Kapasitesi Sınırlıdır	Enerji iletim hatları, yüksek bant genişliğine sahip olmayan hatlardır. Bu nedenle büyük veri transferleri veya yüksek hızlı internet gibi yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalar için uygun değildir.
Etkileşim	Enerji iletim hattı üzerinden iletilen sinyaller, aynı frekans kullanan diğer sistemlerle etkileşime girerek sinyal bozukluğuna neden olabilir. Bu nedenle enerji iletim hattı üzerinden haberleşme diğer haberleşme sistemlerinden ayrı bir frekans bandında çalışma gerekebilir.

HPLC sistemlerinin uyumlu çalışabilmesi ve sürdürülebilirliği açısından uluslararası standartların uygulanması büyük önem taşımaktadır. Tablo 4'te yer alan standartlar arasında yer alan IEEE P1901, ITU G.9903 (G.hn) ve HomePlug AV gibi protokoller, HPLC sistemlerinin performansını artıran ve birlikte çalışabilirliğini sağlayan temel yapı taşlarıdır. Bu standartlar, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) temelli yapı sunarak, veri aktarımında kararlılığı ve parazit bağımsızlığını artırmakta, sistemlerin farklı üreticiler arasında da uyumlu şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır (Yigit vd., 2014).

Tablo 4. Enerji hattı üzerinden haberleşme standartları**Table 4.** Standards of power line communication technologies

Standart tipi	Açıklama
ITU G.9903 (G.hn)	Bu standart, ev ağı enerji yönetimi ve akıllı şebeke uygulamaları için tasarlanmıştır. Gigabit Home Network (G.hn) standardı, yüksek hızlı veri iletimi için Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) teknolojisini kullanır.
IEEE P1901	Bu standart, ev ağı enerji yönetimi ve akıllı şebeke uygulamaları için tasarlanmıştır. P1901 standardı, OFDM teknolojisini kullanarak yüksek hızlı veri iletimi sağlar.
HomePlug AV	Bu standart, ev ağı uygulamaları için tasarlanmıştır. OFDM teknolojisi kullanarak yüksek hızlı veri iletimi sağlar.
IEEE P1901.2	Bu standart, akıllı şebeke uygulamaları için tasarlanmış olup P1901.2 OFDM teknolojisi kullanarak yüksek hızlı veri iletimi sağlar.
CENELEC EN 50065	Bu standart, Avrupa'da güç şebekesi üzerinden iletişim teknolojilerinin kullanımı için tanımlanmıştır.
ANSI/CEA-709.3	Bu standart, akıllı bina otomasyon sistemleri için tasarlanmıştır.

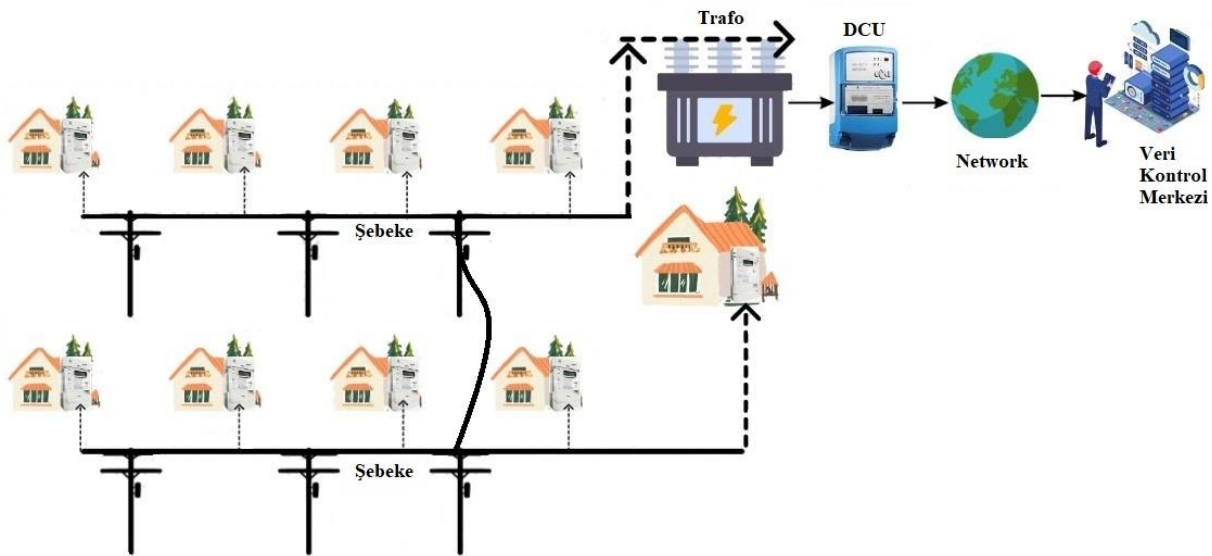
Tüm bu bilgiler doğrultusunda, HPLC teknolojisinin mevcut haberleşme sistemlerine göre sahip olduğu teknik avantajlar kadar, altyapıya bağımlı performans sınırlamaları da bulunmaktadır. Bu nedenle HPLC sistemleri tasarlanırken, bölgesel trafo yapısı, hat uzunluğu, elektromanyetik ortam koşulları ve sinyal zayıflama profili gibi mühendislik değişkenlerinin detaylı şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan HPLC altyapısı da bu tür etkenler göz önünde bulundurularak pilot bölgeye uygun şekilde yapılandırılmıştır.

2.3. HPLC'nin akıllı şebekelerdeki işlevi ve önemi

2.3. The role and importance of HPLC in smart grids

HPLC tabanlı haberleşme altyapıları, yalnızca sayaç verilerinin iletimini sağlamakla sınırlı kalmayıp, akıllı şebekelerin temel bileşenlerinden biri olarak enerji yönetimi süreçlerine entegre olmaktadır. Bu sistemler, uzaktan sayaç okuma, yük kontrolü, açma-kapama işlemleri, kesinti takibi ve faturalama gibi operasyonların merkezi olarak yürütülmesine imkân tanımaktadır. Böylece hem kullanıcı hem de dağıtım şirketi tarafında daha verimli, izlenebilir ve müdahale edilebilir bir yapı kurulmaktadır (Abrahamsen vd., 2021).

Şekil 2'de, akıllı şebeke altyapısında HPLC teknolojisinin nasıl konumlandığı ve veri iletim sisteminin nasıl işlediği şematik olarak sunulmuştur. Bu yapıda, sayaçlardan elde edilen veriler, dağıtım trafolarına bağlı veri toplama ünitesi (Data Concentrator Unit - DCU) aracılığıyla toplanmakta ve merkezi yönetim yazılımına (Head-End System - HES) iletilmektedir. DCU, yalnızca bir modem görevi görmeyip, sayaçlarla çift yönlü haberleşmeyi sağlayan ve işletim sistemi barındıran bir haberleşme kontrol cihazı olarak işlev görmektedir (Aktif Elektroteknik, t.y.).

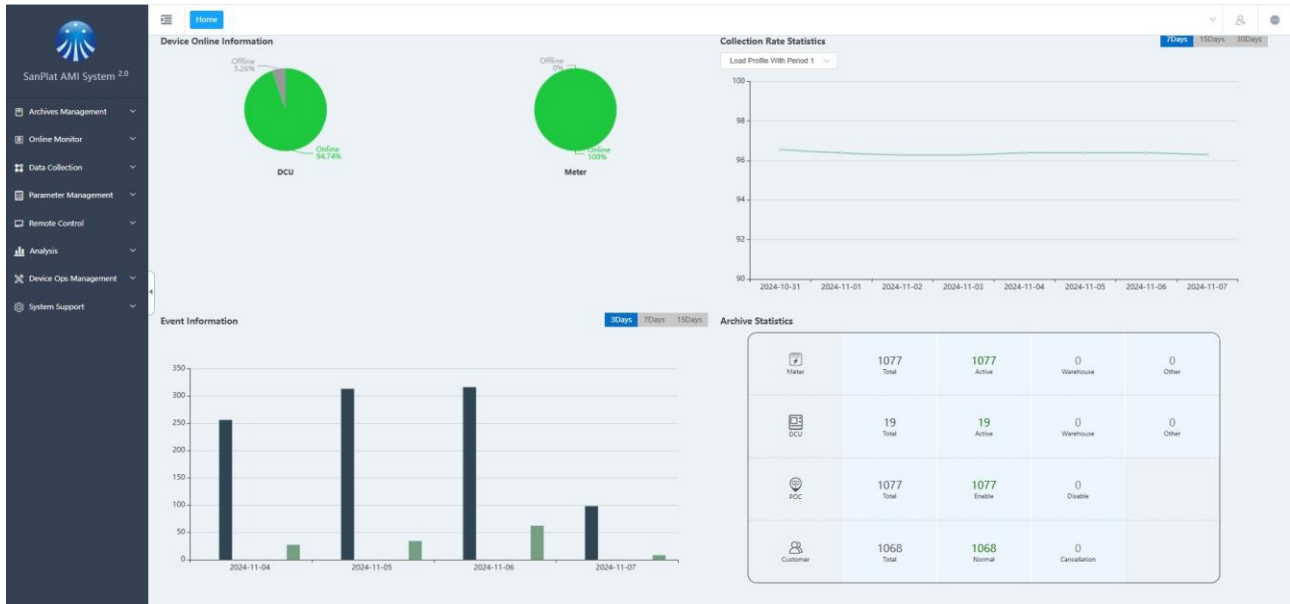


Şekil 2. Akıllı şebeke altyapısı ve uzaktan sayaç okuma sistemi

Figure 2. Smart grid infrastructure and remote meter reading system

Merkezi sistemden gelen uzaktan komutlar (örneğin açma-kapama, anlık okuma, yük sınırı ayarlama vb.), HES'ten DCU'ya iletilmekte ve ardından ilgili sayaçlara yönlendirilmektedir. Bu yapı, kullanıcı tüketim davranışlarını izleme, arıza tespiti, kayıp-kaçak tespiti ve operasyonel karar alma süreçlerinde enerji şirketlerine anlık veri temin ederek stratejik fayda sağlamaktadır. Özellikle düşük gecikmeli haberleşme yeteneği, arıza müdahalesi ve uzaktan kontrol için kritik öneme sahiptir (Yigit vd., 2014).

Şekil 2, sistemin fiziksel-topolojik bileşenlerini ve veri akış yapısını şematik olarak sunarken; Şekil 3, HPLC tabanlı gelişmiş sayaç yönetim sistemine ait örnek bir kullanıcı arayüzünü göstermektedir. Bu arayüz, sistem operatörlerine sayaç tanımlama, veri çekme, arıza analizi, açma-kapama işlemleri, tüketim profili yönetimi ve detaylı raporlama gibi çok sayıda işlevi bütünleşmiş bir şekilde sunmaktadır. Özellikle çevrim içi izleme özelliği sayesinde, dağıtım şirketi personeli, belirli trafolarla veya bireysel kullanıcılarda anlık kontroller gerçekleştirebilmekte ve gerektiğinde uzaktan müdahalelerde bulunabilmektedir. Bu yapı, hem izleme süreçlerinde operasyonel hız kazandırmakta hem de kullanıcı davranışlarına dayalı karar alma süreçlerini daha etkin hale getirmektedir. Şekil 3'te sunulan arayüz, HPLC teknolojisinin sadece veri iletiminde değil, aynı zamanda yönetim ve analiz süreçlerinde de etkin biçimde nasıl kullanıldığını göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 3. Gelişmiş sayaç yönetimi için kullanılan arayüz: uygulama örneği

Figure 3. User interface for advanced metering management: application example

Tablo 5. HPLC ve diğer PLC modüllerinin karşılaştırmalı performansı

Table 5. Performance comparison of HPLC and selected PLC communication modules

	S-FSK	G3	PRIME	HPLC
Modülasyon	FSK	OFDM	OFDM	OFDM
Taşıyıcı Sayısı	-	36	97	181
Haberleşme Hızı (kbps)	41,67	20,36/34,16	21/42/64/84/128	633,75
Günlük Profil Okuma Oranı	<%95	95%	95%	99%

Bu sistem altyapısının teknik performansını sayısal verilerle karşılaştırmak amacıyla yapılan test sonuçları Tablo 5’te sunulmaktadır. HPLC modülü, 181 taşıyıcı ile %99 günlük profil okuma başarısı yakalayarak G3 ve PRIME gibi yaygın kullanılan PLC sistemlerinden daha üstün bir performans sergilemiştir. Ayrıca, 633,75 kbps’lık haberleşme hızı, bu teknolojinin yoğun veri trafiği gerektiren uygulamalarda daha uygun olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, özellikle sayaçların anlık izlenmesi ve kayıp-kaçak tespiti gibi uygulamalarda HPLC’nin tercih edilmesini teknik olarak gerekçelendirmektedir (Yigit vd., 2014).

Türkiye gibi geniş coğrafi alanlara sahip, özellikle kırsal bölgelerinde GSM veya RF sinyal gücünün yetersiz olduğu alanlarda, HPLC altyapısı önemli bir alternatif çözüm olarak öne çıkmaktadır. Mevcut enerji iletim hatlarının kullanılması sayesinde sinyal aktarımı, en uzak yerleşim yerlerine dahi ek altyapı ihtiyacı olmadan iletebilmekte, bu da maliyet ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Kocaman, 2018).

Sonuç olarak, HPLC teknolojisinin akıllı şebeke yapısı içindeki yeri, yalnızca veri aktarımıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda sistem izlenebilirliğini, güvenilirliğini ve operasyonel esnekliğini artırarak modern enerji yönetiminin temel araçlarından biri haline gelmektedir.

2.4. Teknik olmayan kayıpların tespitinde kullanılan alternatif yöntemler

2.4. Alternative methods for detecting non-technical electricity losses

Teknik olmayan elektrik kayıplarının (TEK) tespitine yönelik literatürde farklı yöntemler geliştirilmiştir. En geleneksel yaklaşımlar, saha denetimleri ve istatistiksel karşılaştırmalar yoluyla tüketim verilerinin analizine dayanırken; yüksek maliyet, zaman gereksinimi ve sınırlı ölçeklenebilirlikleri nedeniyle kısıtlı kalmaktadır (Viegas et al., 2017; Messinis & Hatziargyriou, 2018; Savian et al., 2021). Bu kısıtlar da veri-temelli yaklaşımlara olan ilgiyi artırmaktadır.

Güncel literatür, makine öğrenmesi/yapay zekâ (ML/AI) temelli modellerin (anomali tespiti, düzensiz yük davranışlarının belirlenmesi, kaçak kullanım olasılığı tahmini) hızla yayıldığını göstermektedir. Literatürdeki yayınlar ve uygulama çalışmaları yüksek doğruluk potansiyeline işaret etmekle birlikte, model başarımının yüksek kaliteli ve sürekliliği güvence altına alınmış ölçüm verilerine (AMI/akıllı sayaç) güçlü biçimde bağımlı olduğunu vurgulamaktadır (Jokar et al., 2016; Buzau et al., 2019; Razavi et al., 2019; Pazderin et al., 2023). Dolayısıyla, yalnızca algoritmik üstünlük değil, veri ekosisteminin bütünlüğü de belirleyici bir faktör olmaktadır.

İletişim/ölçüm katmanını esas alan mimariler, haberleşme ve ölçüm altyapıları üzerinden gerçek zamana yakın izlemeyi hedefler. GSM/LTE, LoRaWAN (LP-WAN) ve uydu tabanlı çözümler geniş alan kapsamı sağlasa da özellikle kırsal bölgelerde kapsama boşlukları, girişim/parazit ve lisans/maliyet unsurları performansı sınırlandırabilmektedir (El-Afifi et al., 2024). Bu nedenle, kablolu alternatiflerin saha koşullarındaki performansı önem kazanmaktadır.

Buna karşılık PLC/HPLC çözümleri, mevcut enerji hatlarını iletişim kanalı olarak kullandıkları için ek altyapı ihtiyacını azaltmakta, uygun hat koşullarında yüksek okuma başarımları sağlamaktadırlar. Bu avantajlar, geniş ölçekli saha uygulamalarında da ölçümsel olarak doğrulanmıştır. Örneğin, Fransa'daki Linky dağıtımında G3-PLC ile günlük okuma oranlarının %98'in üzerinde olduğu rapor edilmiştir (Lavenue et al., 2021).

Literatürdeki çalışmalar, her yöntemin belirli koşullarda katkı sağladığını; ancak uygulama maliyetleri, erişim imkânları ve güvenilirlik açısından önemli kısıtlar barındırdığını göstermektedir. Bu noktada, mevcut şebeke altyapısını kullanan, düşük maliyetli ve kırsal alanlarda dahi güçlü performans gösterebilen HPLC tabanlı sistemler öne çıkmaktadır. Çalışmamızın odaklandığı HPLC yaklaşımı da bu gerekçelerle tercih edilmiş olup, sonraki bölümlerde literatürdeki uygulama başarıları ve yöntemsel özgünlük bağlamında detaylandırılacaktır.

2.5. Literatürde HPLC kullanımıyla elde edilen başarılar

2.5. Reported achievements of HPLC applications in the existing literature

HPLC tabanlı haberleşme sistemlerinin enerji dağıtım şebekelerinde kullanımı, dünya genelinde çeşitli saha uygulamalarıyla desteklenmiştir. Özellikle teknik olmayan kayıpların yüksek olduğu bölgelerde, HPLC sistemlerinin veri güvenilirliğini ve sayaç okuma oranlarını artırması bakımından önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Kocaman (2018), Türkiye'nin doğu bölgelerinde gerçekleştirilen bir uygulamada, HPLC destekli sayaç sistemleriyle teknik olmayan kayıp oranlarının %60 seviyesinden %15'in altına çekildiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Yigit vd. (2014), PLC sistemlerinin sayaç okuma başarı oranlarını değerlendirdiği çalışmada, doğru haberleşme protokolü tercihinin sistem performansı üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamış ve HPLC'nin düşük gecikme, yüksek güvenilirlik gibi avantajları sayesinde akıllı sayaç altyapılarına daha uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Uluslararası literatürde de benzer bulgular mevcuttur. Örneğin, Hindistan'da Maharashtra Eyaleti'nde gerçekleştirilen geniş çaplı bir HPLC uygulamasında, kırsal bölgelerdeki %45 düzeyindeki teknik olmayan kayıp oranları, uygulama sonrası %12 seviyesine gerilemiştir (MSEDCL, 2021). Latin Amerika'da ise Brezilya'nın São Paulo eyaletinde faaliyet gösteren Eletropaulo şirketi tarafından hayata geçirilen HPLC tabanlı akıllı sayaç uygulaması ile teknik olmayan kayıplarda üç yıl içinde %31'lik bir azalma sağlandığı raporlanmıştır (Mori vd., 2014).

Bu çalışmalar, HPLC sistemlerinin yalnızca ölçüm süreçlerini dijitalleştirmekle kalmadığını, aynı zamanda enerji yönetimi açısından stratejik değer taşıyan veri güvenliği, sistem izlenebilirliği ve sahaya müdahale hızı gibi birçok parametrede önemli kazanımlar sunduğunu göstermektedir. Ancak, mevcut literatürdeki bu çalışmaların büyük çoğunluğu ya teknolojiye dair genel sistem tanımlarıyla sınırlı kalmakta ya da kısa dönemli tekil uygulama sonuçlarına dayanmaktadır.

Bu bağlamda, bu çalışma, HPLC sistemlerinin kurulum öncesi ve sonrası teknik olmayan kayıp oranlarını çok yıllık ve çok trafolu saha verileriyle analiz eden nadir örneklerden biri olarak, literatürdeki yöntemlere dayalı boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Yalnızca teknolojinin avantajlarını değil, gerçek saha verileriyle

desteklenmiş çok trafolu analiz yaklaşımıyla, literatürde az temsil edilen karşılaştırmalı uygulama örneklerine katkı sağlamaktadır.

2.6. Çalışmanın yöntemsel konumlandırması

2.6. Methodological positioning of the study

Literatürde HPLC teknolojisinin enerji dağıtım altyapılarında kullanımına yönelik çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmaların önemli bir bölümü ya teorik düzeyde kalmakta ya da sınırlı sayıda saha verisine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir (Kocaman, 2018; Yiğit vd., 2014). Ayrıca çoğu araştırma, yalnızca sistem tanıtımına ya da haberleşme performansına odaklanmakta; HPLC'nin doğrudan teknik olmayan kayıplar üzerindeki kantitatif etkisini ele alan uygulamalı çalışmalara ise oldukça sınırlı şekilde rastlanmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla Niğde kırsalında MEDAŞ tarafından gerçekleştirilen ve 16 farklı dağıtım trafosunu kapsayan bir pilot uygulama üzerinden, HPLC teknolojisinin öncesi-sonrası karşılaştırmalı performansını analiz etmektedir. Çalışmada kullanılan veri seti, üç yıl boyunca aynı dönemlerde toplanmış gerçek saha verilerine dayanmaktadır. Böylece yalnızca zamansal karşılaştırma değil, aynı zamanda trafo bazlı yatay analiz de mümkün kılınmıştır.

Çalışmanın yönetime dayalı özgünlüğü, teknik olmayan kayıpların tespitinde genellikle öznel değerlendirmelere dayalı yaklaşımlar yerine, sistematik ve sayısal bir kıyaslama çerçevesi sunmasıdır. Kayıp-kaçak oranlarının HPLC kurulumu öncesi ve sonrası dönemlerdeki değişimi hem toplam hem de trafo düzeyinde ayrı ayrı hesaplanmış; bu değişimler doğrudan sayısal değerlerle ifade edilmiştir. Ayrıca analiz edilen veriler, yalnızca genel sistem başarımı değil, her bir trafo için performans trendlerini de ortaya koyarak mikro düzeyde izleme ve değerlendirme imkânı sunmuştur.

Bu yönüyle çalışma, hem uygulamalı saha verilerine dayalı olması, hem de karşılaştırmalı analiz metodolojisini benimsemesi sayesinde literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmakta ve enerji kayıplarının azaltılmasında HPLC teknolojisinin etkinliğini somut biçimde ortaya koymaktadır.

3. Yöntemsel yaklaşım ve pilot uygulama tasarımı

3. Methodological approach and design of the pilot implementation

3.1. Pilot uygulama alanı ve örneklem seçimi

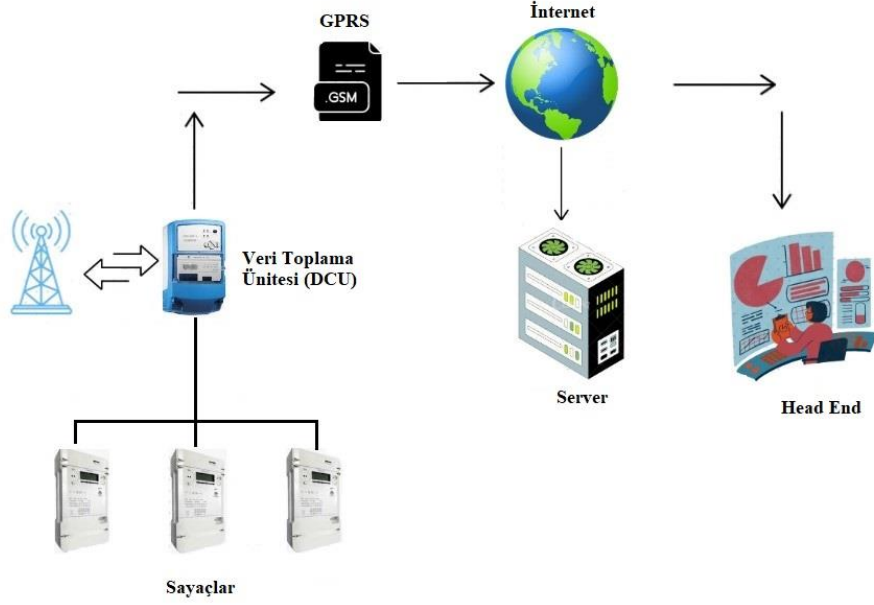
3.1. Site of pilot implementation and sampling strategy

Bu çalışmada, HPLC teknolojisinin teknik olmayan elektrik kayıplarının azaltılmasına olan etkisini değerlendirmek amacıyla, MEDAŞ sorumluluğundaki Niğde iline bağlı kırsal bölgelerde bir pilot uygulama gerçekleştirilmiştir. Pilot uygulama sahası olarak, 2022 yılı sonu itibarıyla teknik olmayan kayıp oranı %20'nin üzerinde olan 16 dağıtım trafosu belirlenmiştir. Bu seçim, MEDAŞ'ın saha denetimleri ve yıllık enerji tüketimi-tahakkuk analizleri doğrultusunda yapılmıştır. Trafoların belirlenmesinde geçmiş dönem kayıp oranları, abone profili, bölgesel dağıtım özellikleri ve trafo tipi gibi çeşitli değişkenler dikkate alınmıştır.

3.2. Veri toplama süreci ve hesaplama yöntemi

3.2. Data collection process and calculation method

Analiz için kullanılan veriler, HPLC sistemlerinin kurulumundan önce ve sonra olmak üzere üç ayrı dönemde toplanmıştır: Haziran 2022 (öncesi), Ocak 2023 (geçiş dönemi), ve Ocak-Haziran 2024 (sonrası). Bu dönemlerin seçilmesinde, enerji tüketiminde mevsimsel dalgalanmaların etkisini azaltmak, yılın aynı aylarına ait verilerle tutarlı karşılaştırmalar yapabilmek ve uygulamanın performansını uzun vadeli değerlendirebilmek amaçlanmıştır. Böylece, pilot bölgedeki trafoların HPLC uygulaması öncesi ve sonrası teknik olmayan kayıp düzeyleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4. Uzaktan sayaç okuma ve veri iletim sistemi
Figure 4. Remote meter reading and data transmission system

Veri iletim sürecine ilişkin genel akış yapısı Şekil 4’te şematik olarak gösterilmiştir. Trafolardan toplanan enerji tüketimi verileri, DCU aracılığıyla HES üzerinden sunucuya aktarılmakta ve burada arşivlenerek analiz edilmektedir. HPLC altyapısı sayesinde bu veri iletimi yüksek güvenilirlik ve düşük gecikme ile sağlanmaktadır.

Teknik olmayan kayıp oranı hesaplamasında, trafo tüketimi ve aboneye tahakkuk ettirilen tüketim değerleri temel alınmıştır. Her bir trafo için dönemsel kayıp oranı Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır:

$$\text{Kayıp Oranı (\%)} = \left(\frac{\text{Trafo Tüketimi} - \text{Abone Tüketimi}}{\text{Trafo Tüketimi}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Örneğin, 2023 yılı ocak ayında Trafo 01 için trafo tüketimi 44.662 kWh ve abone tahakkuku 20.797 kWh olarak gerçekleşmiştir. Bu değerlere Eşitlik 1 uygulanarak, söz konusu dönem için kayıp oranı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\left(\frac{44.662 - 20.797}{44.662} \right) \times 100 = \%53.4$$

Ayrıca, HPLC uygulamasının etkisini değerlendirebilmek amacıyla her trafo için iyileşme oranı da hesaplanmıştır. Bu oran, HPLC kurulumundan önceki kayıp oranı ile sonraki kayıp oranı arasındaki farkın, önceki döneme oranlanmasıyla elde edilmiştir (Eşitlik 2):

$$\text{İyileştirme Oranı (\%)} = \left(\frac{\text{Önceki Kayıp Oranı} - \text{Sonraki Kayıp Oranı}}{\text{Önceki Kayıp Oranı}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Örneğin, 2023 yılında %71,6 kayıp oranına sahip olan Trafo 05’in, 2024 yılında %4,5 kayıp oranına düşmesi durumunda, Eşitlik 2 kullanılarak iyileşme oranı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\left(\frac{71,6 - 4,5}{71,6} \right) \times 100 = \%93,71$$

Bu hesaplamalar, 2022, 2023 ve 2024 yıllarına ait gerçek saha verilerinden elde edilen tüketim ve tahakkuk bilgileriyle yapılmış olup, detaylı karşılaştırmalı bulgular Tablo 6 ila Tablo 10 arasında sunulmaktadır.

Tablo 6. 2022 yılı haziran ayı trafo tüketimi, tahakkuk değerleri ve kayıp-kaçak oranları**Table 6.** June 2022 transformer load, billed energy, and non-technical loss rates

Trafo adı	2022 yılı haziran ayı trafo tüketim (kWh)	2022 yılı haziran ayı tahakkuk (kWh)	2022 yılı haziran ayı kayıp (kWh)	2022 yılı haziran ayı kayıp-kaçak oranı (%)
Trafo 01	40.763	26.964	13.799	33,9
Trafo 02	36.163	19.042	17.121	47,3
Trafo 03	26.541	19.085	7.456	28,1
Trafo 04	25.173	15.671	9.502	37,7
Trafo 05	30.540	23.059	7.481	24,5
Trafo 06	38.269	19.516	18.753	49,0
Trafo 07	31.119	23.220	7.899	25,4
Trafo 08	39.348	25.775	13.573	34,5
Trafo 09	28.327	21.468	6.859	24,2
Trafo 10	64.000	44.434	19.566	30,6
Trafo 11	50.660	32.381	18.279	36,1
Trafo 12	25.852	14.988	10.864	42,0
Trafo 13	36.768	25.174	11.594	31,5
Trafo 14	23.605	14.438	9.167	38,8
Trafo 15	62.090	15.532	46.558	75,0
Trafo 16	28.248	19.588	8.660	30,7
G. Toplam	587.466	360.335	227.131	38,7

Tablo 7. 2023 yılı ocak ayı trafo tüketimi, tahakkuk değerleri ve kayıp-kaçak oranları**Table 7.** January 2023 transformer load, billed energy, and non-technical loss rates

Trafo adı	2023 yılı ocak ayı trafo tüketim (kWh)	2023 yılı ocak ayı tahakkuk (kWh)	2023 yılı ocak ayı kayıp (kWh)	2023 yılı ocak ayı kayıp-kaçak oranı (%)
Trafo 01	44.662	20.797	23.865	53,4
Trafo 02	42.634	17.441	25.193	59,1
Trafo 03	26.834	14.351	12.483	46,5
Trafo 04	13.352	6.284	7.068	52,9
Trafo 05	16.765	4.760	12.005	71,6
Trafo 06	4.309	3.143	1.166	27,1
Trafo 07	28.128	16.998	11.130	39,6
Trafo 08	20.278	9.849	10.429	51,4
Trafo 09	42.742	15.012	27.730	64,9
Trafo 10	77.748	23.593	54.155	69,7
Trafo 11	14.731	11.544	3.187	21,6
Trafo 12	2.968	2.262	706	23,8
Trafo 13	52.524	24.859	27.665	52,7
Trafo 14	18.196	5.096	13.100	72,0
Trafo 15	19.728	13.191	6.537	33,1
Trafo 16	18.082	14.722	3.360	18,6
G. Toplam	443.681	203.902	239.779	54,0

Tablo 8. 2023 yılı haziran ayı trafo tüketimi, tahakkuk değerleri ve kayıp-kaçak oranları**Table 8.** June 2023 transformer load, billed energy, and non-technical loss rates

Trafo adı	2023 yılı haziran ayı trafo tüketim (kWh)	2023 yılı haziran ayı tahakkuk (kWh)	2023 yılı haziran ayı kayıp (kWh)	2023 yılı haziran ayı kayıp-kaçak oranı (%)
Trafo 01	34.301	26.340	7.961	23,2
Trafo 02	40.858	17.626	23.232	56,9
Trafo 03	25.307	19.803	5.504	21,7
Trafo 04	13.930	13.158	772	5,5
Trafo 05	20.200	14.080	6.120	30,3
Trafo 06	16.759	11.218	5.541	33,1
Trafo 07	29.804	24.738	5.066	17,0
Trafo 08	24.997	15.897	9.100	36,4
Trafo 09	25.866	17.822	8.044	31,1
Trafo 10	38.757	27.108	11.649	30,1
Trafo 11	27.011	26.781	230	0,9
Trafo 12	8.593	8.188	405	4,7
Trafo 13	28.423	22.902	5.521	19,4
Trafo 14	13.086	10.232	2.854	21,8
Trafo 15	17.630	16.881	749	4,2
Trafo 16	18.329	17.681	648	3,5
G. Toplam	383.851	290.455	93.396	24,3

Tablo 9. 2024 yılı ocak ayı trafo tüketimi, tahakkuk değerleri ve kayıp-kaçak oranları**Table 9.** January 2024 transformer load, billed energy, and non-technical loss rates

Trafo adı	2024 yılı ocak ayı trafo tüketim (kWh)	2024 yılı ocak ayı tahakkuk (kWh)	2024 yılı ocak ayı kayıp (kWh)	2024 yılı ocak ayı kayıp-kaçak oranı (%)
Trafo 01	26.608	26.006	602	2,3
Trafo 02	24.552	24.258	293	1,2
Trafo 03	20.358	19.979	379	1,9
Trafo 04	9.274	9.144	130	1,4
Trafo 05	10.313	9.853	460	4,5
Trafo 06	10.153	10.101	51	0,5
Trafo 07	31.679	30.693	986	3,1
Trafo 08	20.554	19.990	564	2,7
Trafo 09	19.879	19.439	440	2,2
Trafo 10	43.248	41.303	1.945	4,5
Trafo 11	14.695	14.325	370	2,5
Trafo 12	2.761	2.725	36	1,3
Trafo 13	30.611	29.740	871	2,8
Trafo 14	6.450	6.384	66	1,0
Trafo 15	16.765	16.496	269	1,6
Trafo 16	16.768	16.320	447	2,7
G. Toplam	304.667	296.758	7.909	2,6

Tablo 10. 2024 yılı haziran ayı trafo tüketimi, tahakkuk değerleri ve kayıp-kaçak oranları
Table 10. June 2024 transformer load, billed energy, and non-technical loss rates

Trafo Adı	2024 yılı haziran ayı trafo tüketim (kWh)	2024 yılı haziran ayı tahakkuk (kWh)	2024 yılı haziran ayı kayıp (kWh)	2024 yılı haziran ayı kayıp-kaçak oranı (%)
Trafo 01	66.697	62.642	4.055	6,1
Trafo 02	28.813	28.078	735	2,6
Trafo 03	43.987	41.891	2.096	4,8
Trafo 04	45.661	42.804	2.856	6,3
Trafo 05	52.935	46.455	6.481	12,2
Trafo 06	60.413	53.933	6.480	10,7
Trafo 07	66.053	60.793	5.261	8,0
Trafo 08	49.992	46.446	3.546	7,1
Trafo 09	39.558	38.042	1.516	3,8
Trafo 10	70.632	65.390	5.243	7,4
Trafo 11	80.073	74.186	5.886	7,4
Trafo 12	57.985	53.862	4.123	7,1
Trafo 13	48.150	44.904	3.246	6,7
Trafo 14	44.883	42.885	1.998	4,5
Trafo 15	22.030	21.251	779	3,5
Trafo 16	36.825	34.368	2.457	6,7
G. Toplam	814.688	757.930	56.758	7,0

3.3. HPLC uygulama etki indeksi (UEİ)

3.3. HPLC implementation impact index (HIII)

HPLC sisteminin her bir trafo üzerindeki etkisini yalnızca kayıp oranı değişimiyle değil, aynı zamanda sistem öncesindeki kayıp düzeyini de dikkate alarak değerlendirebilmek amacıyla UEİ geliştirilmiştir. Bu indeks, trafo bazlı değerlendirme yapmayı kolaylaştıran, sayısal ve sınıflandırmaya açık bir skorlandırma yaklaşımı sunmaktadır.

UEİ, iki temel bileşene dayanır:

- **Kayıp Oranı Azalma Yüzdesi :** HPLC uygulaması sonrası kayıp oranında sağlanan yüzdesel azalma.
- **Başlangıç Risk Katsayısı :** HPLC öncesi dönemdeki kayıp oranının ağırlıklandırılmış katkısı.

Bu bileşenler Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanır:

$$KAY_i = \left(\frac{Kayıp_{önce} - Kayıp_{sonra}}{Kayıp_{önce}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$BRK_i = \begin{cases} 1,0 & \text{eğer } Kayıp_{önce} \geq \%70 \\ 0,75 & \text{eğer } \%50 \leq Kayıp_{önce} < \%70 \\ 0,5 & \text{eğer } \%30 \leq Kayıp_{önce} < \%50 \\ 0,25 & \text{eğer } Kayıp_{önce} < \%30 \end{cases} \quad (4)$$

Toplam indeks Eşitlik 5 ile elde edilir.

$$UEİ_i = KAY_i \times BRK_i \quad (5)$$

Bu indeks 0 ile 100 arasında değer alır. Yüksek UEİ skorları, HPLC sisteminin ilgili trafo üzerindeki etkisinin yüksek olduğunu gösterirken, düşük skorlar ya etkisizliği ya da başlangıçta zaten düşük kayıp oranı olduğunu yansıtmaktadır.

Örnek olarak, Trafo 02'nin 2023 yılı ocak ayında kayıp oranı %59,1 iken, 2024 Ocak itibarıyla bu oran %1,2 seviyesine düşmüştür. Bu durumda kayıp oranındaki azalma $KAY=97,97$ olarak hesaplanırken, başlangıç kaybının %50'nin üzerinde olması nedeniyle BRK katsayısı 0,75 olarak alınmış ve bu durumda UEİ skoru 73,48 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistemin söz konusu trafoda yüksek bir etki sağladığını, ancak maksimum skora ulaşamamasının nedeninin başlangıç risk katsayısının 1 yine 0,75 olmasından kaynaklandığını göstermektedir.

Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca genel sistem performansı değil, her bir trafonun uygulamaya verdiği yanıt da nesnel biçimde değerlendirilebilmekte; aynı zamanda bu skorların ileride karar destek sistemlerine entegre edilmesi de mümkün hale gelmektedir.

4. HPLC uygulamasının kayıp-kaçak üzerine etkisi: sayısal bulgular

4. Impact of HPLC implementation on non-technical losses: quantitative findings

4.1. HPLC öncesi teknik olmayan kayıp düzeyi

4.1. Pre-HPLC level of non-technical losses

Pilot uygulama kapsamındaki 16 trafoya ait teknik olmayan kayıp oranları, HPLC kurulumu öncesinde önemli seviyelerde seyretmiştir. Özellikle 2022 haziran ve 2023 ocak aylarına ait veriler üzerinden yapılan analizlerde, birçok trafoda kayıp oranlarının %30'un üzerinde olduğu, bazı trafolarda ise %70'i aşan seviyelere ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 6, 2022 yılı haziran ayına ait trafo tüketimi, aboneye tahakkuk ettirilen enerji miktarı ve bu değerlere göre hesaplanan kayıp-kaçak oranlarını göstermektedir. Bu dönemde en yüksek kayıp oranı %75,00 ile Trafo 15'te, en düşük kayıp oranı ise %24,20 ile Trafo 09'da gözlemlenmiştir. Toplam sistem üzerinden hesaplanan ortalama kayıp oranı ise %38,7 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, toplam trafo tüketimi ve toplam kayıp miktarına göre hesaplanmıştır; aritmetik ortalama yerine sistem bazlı değerlendirme yapılmıştır. Haziran dönemine ait toplam tüketim değerlerinin yüksekliği, bölgenin kırsal yapısı ve bu dönemde yoğun olarak gerçekleştirilen tarımsal sulama faaliyetlerinden kaynaklanan artan enerji ihtiyacıyla ilişkilendirilebilir. Tarım sezonunun en yoğun dönemine denk gelen haziran ayında trafo yüklerinin artması, sayaç okuma hatalarını ve kaçak tüketim riskini de beraberinde getirmiş olabilir. Tablo 7 ise, 2023 yılı ocak ayına ait verilere dayanmaktadır. Bu dönemde genel kayıp eğiliminde bir artış gözlemlenmiş; bazı trafolarda kayıp oranları kritik seviyelere yükselmiştir. En yüksek kayıp oranı %72,00 ile Trafo 14'te, en düşük oran ise %18,60 ile Trafo 16'de ölçülmüştür. Döneme ait ortalama kayıp oranı %54 olarak hesaplanmıştır. Bu artışın, kış aylarında sayaç okuma faaliyetlerinin kısıtlı koşullarda yapılmasından ve izleme altyapısının yetersizliğinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Elde edilen bu veriler, HPLC kurulumu öncesinde teknik olmayan kayıpların yalnızca yüksek düzeyde olmadığını, aynı zamanda trafolar arasında büyük farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle kırsal bölgelerdeki denetim eksikliği, manuel sayaç okuma süreçleri ve sezonluk tüketim dalgalanmaları bu farklılıkları derinleştirmektedir. Bu bağlamda, HPLC sistemlerinin saha uygulamalarıyla bu değişkenliği azaltması ve sistematik kontrol sağlaması önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

4.2. HPLC sonrası gözlenen değişimler

4.2. Post-HPLC observed changes

HPLC sisteminin kurulumu ve devreye alınmasının ardından elde edilen veriler, teknik olmayan kayıplarda önemli düzeyde bir azalma sağlandığını açıkça göstermektedir. 2024 yılı ocak ve haziran aylarına ait sayısal bulgular, bu etkinin yalnızca kısa vadeli değil, aynı zamanda dönemsel olarak da sürdürülebilir nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 9, 2024 yılı ocak ayına ait trafo tüketimi, tahakkuk değerleri ve kayıp-kaçak oranlarını sunmaktadır. Bu dönemde birçok trafoda kayıp oranlarının %5'in altına gerilediği; bazı trafolarda ise %1'in dahi altında kaldığı görülmektedir. Örneğin, Trafo 05'te kayıp oranı %71,6'dan %4,5'e, Trafo 14'te %72,0'den %1,0'a, Trafo 01'de ise %53,4'ten %2,3'e düşmüştür. Ocak 2024 dönemi için ortalama sistem kayıp oranı %2,6 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistemdeki kaçakların büyük ölçüde ortadan kalktığını ve sayaç okuma doğruluğunun yüksek seviyelere ulaştığını göstermektedir.

Tablo 10, 2024 yılı haziran ayı verilerine yer vermektedir. Tarımsal sulamanın yoğunlaştığı bu dönemde, geçmişte kayıp-kaçak oranlarının en yüksek seyrettiği dönemlerden biri olan haziran ayına kıyasla dikkate değer bir iyileşme gözlemlenmiştir. Örneğin, Trafo 15'in 2022 haziran döneminde %75,0 olan kayıp oranı, 2024 Haziran'da %3,5'e gerilemiştir. Benzer şekilde, Trafo 14'ün kayıp oranı %38,8'den %4,5'e düşmüştür. Bu dönem için hesaplanan ortalama sistem kayıp oranı %7,0 olup, 2022 Haziran'da ölçülen %38,7'lik oranla kıyaslandığında kayıplarda yaklaşık %81,9 oranında bir azalma gerçekleştiği söylenebilir.

Genel tablo değerlendirildiğinde, HPLC sisteminin farklı dönemlerde ve değişen tüketim profillerine rağmen tutarlı biçimde kayıp oranlarını düşürdüğü görülmektedir. Özellikle geçmişte yüksek riskli olarak sınıflandırılan trafolarla dramatik düşüşler elde edilmiş, böylece sistem yalnızca izleme ve veri toplama değil, aynı zamanda önleyici bir kontrol aracı olarak da etkili olduğunu kanıtlamıştır.

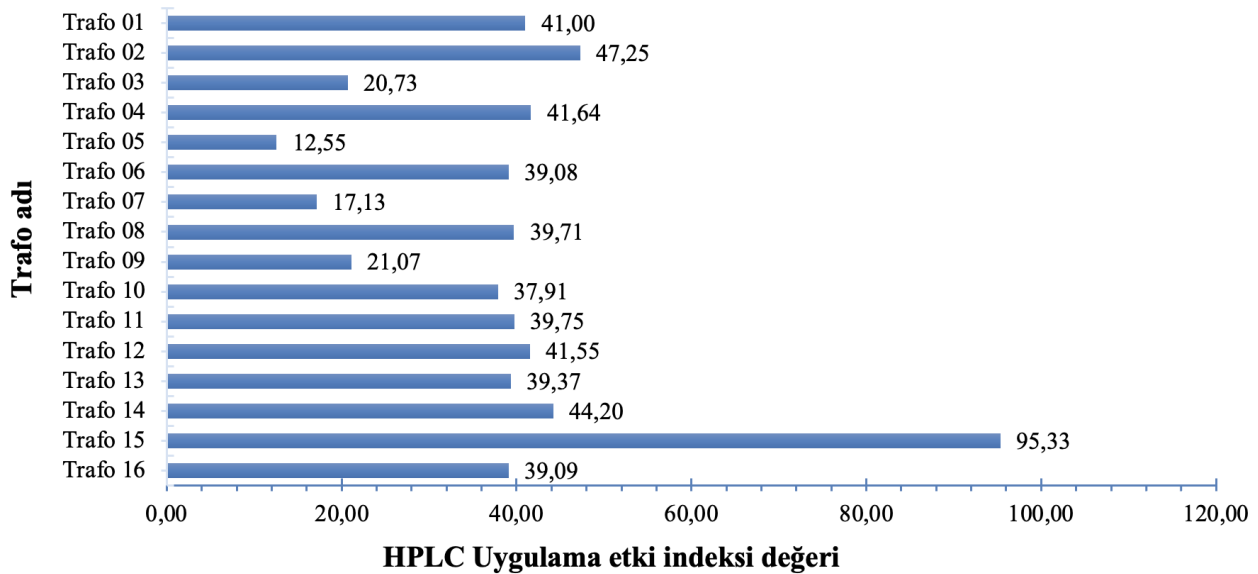
4.3. UEİ skorlarının değerlendirilmesi

4.3. Evaluation of implementation impact index scores

HPLC sisteminin trafo bazlı etkisini daha sistematik bir biçimde analiz edebilmek amacıyla geliştirilen UEİ, her bir trafonun kayıp-kaçak oranlarındaki iyileşme düzeyini ve başlangıçtaki kayıp riskini birlikte değerlendirerek tek bir skorla ifade etmektedir. Bu skor hem müdahale önceliğini hem de sistem etkinliğini sayısal olarak ortaya koymaktadır (Şekil 5).

Yapılan çalışmalarda, UEİ hesaplamaları 2022 Haziran verileri başlangıç kaybı olarak, 2024 Haziran verileri ise uygulama sonrası kayıp oranı olarak alınmıştır. Bu şekilde, sezonluk etkilerin minimize edildiği, iki yıl arayla yapılan karşılaştırmalarla daha uzun vadeli sistem etkisi değerlendirilmiştir (Pazderin et al., 2023).

Yapılan hesaplamalar sonucunda UEİ skorları %10 ile %95 arasında değişen bir dağılım göstermiştir. En yüksek UEİ değeri Trafo 15'te %95,33 ile hesaplanmış, bu trafonun HPLC öncesinde %75 olan kayıp oranı %3,5'e düşmüştür. İlk üç içerisinde yer alan diğer trafolardan Trafo 02'de %47,25 ve Trafo 14'te %44,20'lik UEİ değerleri elde edilmiştir. Her iki trafoda da başlangıçta sırasıyla %47,3 ve %38,8 olan kayıp oranları HPLC sonrasında %2,6 ve %4,5'e düşmüş, bu da %88'in üzerinde bir azalma (KAY) sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde, Trafo 04 (%37,7 → %6,3) ve Trafo 01 (%33,9 → %6,1) gibi trafolar da UEİ skorları %40'ın üzerinde gerçekleşmiştir. Buna karşılık, başlangıç kaybı düşük olan trafolar da (örneğin Trafo 03, Trafo 05 ve Trafo 07), UEİ skorları görece daha sınırlı kalmıştır (Tablo 11).



Şekil 5. HPLC uygulama etki indeksi (UEİ) skorları – trafo bazında dağılım

Figure 5. HPLC implementation impact index (HIII) scores – distribution by transformer

Tablo 11. HPLC uygulama etki indeksi (UEİ)
Table 11. HPLC implementation impact index (HIII)

Trafo Adı	Önceki kayıp oranı (%)	Sonraki kayıp oranı (%)	KAY (%)	BRK	UEİ
Trafo 01	33,9	6,1	82,0	0,5	41,00
Trafo 02	47,3	2,6	94,5	0,5	47,25
Trafo 03	28,1	4,8	82,9	0,25	20,73
Trafo 04	37,7	6,3	83,3	0,5	41,64
Trafo 05	24,5	12,2	50,2	0,25	12,55
Trafo 06	49	10,7	78,2	0,5	39,08
Trafo 07	25,4	8	68,5	0,25	17,13
Trafo 08	34,5	7,1	79,4	0,5	39,71
Trafo 09	24,2	3,8	84,3	0,25	21,07
Trafo 10	30,6	7,4	75,8	0,5	37,91
Trafo 11	36,1	7,4	79,5	0,5	39,75
Trafo 12	42	7,1	83,1	0,5	41,55
Trafo 13	31,5	6,7	78,7	0,5	39,37
Trafo 14	38,8	4,5	88,4	0,5	44,20
Trafo 15	75	3,5	95,3	1	95,33
Trafo 16	30,7	6,7	78,2	0,5	39,09

Tablo 11, her bir trafonun başlangıç ve sonuç kayıp oranları, KAY, BRK ve nihai UEİ skorlarını detaylı şekilde sunmaktadır. Tablo 11’de, her bir trafo için HPLC öncesi (2022 Haziran) ve sonrası (2024 Haziran) kayıp oranları ile bu oranlar arasındaki farktan elde edilen KAY, BRK ve nihai UEİ skorları yer almaktadır. HPLC sisteminin farklı başlangıç koşullarına sahip trafolarla ne ölçüde iyileşme sağladığı sayısal olarak ortaya konuşmuş olup özellikle başlangıç kaybı yüksek olan trafolarla UEİ değerlerinin daha yüksek çıkması, sistemin riskli bölgelerde daha etkin çalıştığını göstermektedir.

4.4. Trafo bazlı öncesi-sonrası kayıp değişiminin istatistiksel değerlendirmesi

4.4. Statistical evaluation of transformer-based pre- and post-HPLC loss variations

HPLC sisteminin kurulumu öncesi ve sonrası teknik olmayan kayıp oranlarında gözlenen değişimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla, eşleştirilmiş örneklem için t-testi (paired samples t-test) uygulanmıştır. Analizde, her bir trafoya ait 2022 Haziran (HPLC öncesi) ve 2024 Haziran (HPLC sonrası) dönemlerine ait kayıp oranları esas alınmıştır (Tablo 12). Bu yöntem, sistem genelindeki toplam tüketim ve toplam kayıp üzerinden elde edilen ortalamalardan ziyade, trafo düzeyinde hesaplanmış aritmetik ortalamaları ve her bir trafonun değişimini dikkate alması açısından daha anlamlı bir karşılaştırma sunmaktadır.

Tablo 12. HPLC öncesi ve sonrası kayıp oranı karşılaştırması (t-testi sonuçları)
Table 12. Comparison of loss rates before and after HPLC implementation (t-test results)

Değer	Sonuç
HPLC öncesi ortalama	%36,83
HPLC sonrası ortalama	%6,56
Ortalama fark	%30,28
t-istatistiği	8,89
p-değeri	0,00000023

Elde edilen sonuçlar, HPLC uygulamasının trafo bazında teknik olmayan kayıplar üzerinde istatistiksel olarak son derece anlamlı bir azalma sağladığını ($p < 0,001$) ortaya koymaktadır. Bu durum, sistemin yalnızca operasyonel düzeyde değil, aynı zamanda bilimsel açıdan da etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Özellikle başlangıç kaybı yüksek olan trafolarla gözlenen belirgin iyileşmeler, HPLC teknolojisinin veriye dayalı müdahale stratejileri kapsamında değerlendirilmesini desteklemektedir.

5. Tartışma, politika önerileri ve sonuçlar

5. Discussion, policy recommendations, and conclusions

Bu çalışma, HPLC tabanlı uzaktan sayaç okuma sistemlerinin teknik olmayan elektrik kayıplarını azaltmadaki etkinliğini, çok yıllık ve çok trafolu saha verileriyle değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin yalnızca genel kayıpları azaltmakla kalmayıp, her bir trafoda farklılaşan etki düzeylerini de başarıyla ortaya koyduğunu göstermektedir. Özellikle başlangıç kaybı yüksek olan trafolarla elde edilen dramatik iyileşmeler (%90'ı aşan azalma oranları), HPLC teknolojisinin hedefli müdahale ve veriye dayalı enerji yönetimi açısından büyük bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

Geliştirilen UEİ sayesinde, sistemin her bir trafo üzerindeki etkisi kantitatif olarak derecelendirilmiş; böylece dağıtım şirketlerinin müdahale önceliklerini belirleyebilmesine imkân sağlayacak sayısal bir araç geliştirilmiştir. Ayrıca, UEİ'nin yanı sıra yapılan istatistiksel analizlerde de ($p < 0,001$) HPLC sisteminin etkisi son derece anlamlı bulunmuştur. Bu sonuçlar, sistemin yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda bilimsel olarak kanıtlanabilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Bu çerçevede, enerji dağıtım sektörüne yönelik bazı politika önerileri aşağıda sunulmaktadır:

- HPLC sistemleri, yalnızca kırsal alanlarda değil, risk düzeyi yüksek kentsel bölgelerde de yaygınlaştırılmalıdır.
- UEİ benzeri etki skorları, dağıtım şirketlerinin yıllık bakım ve yatırım planlarına entegre edilerek önceliklendirme süreci sayısallaştırılmalıdır.
- HPLC sistemleriyle bütünleşmiş çalışan akıllı denetim yazılımları (örneğin otomatik alarm sistemleri) ile anlık kayıp-kaçak izleme yapılmalı ve veriler merkezi olarak analiz edilmelidir.
- Sayaçların uzaktan yönetilebilir olması, yalnızca tüketim izleme değil; aynı zamanda kayıp analiz, yük dengeleme ve arıza tespiti gibi süreçlerin de hızlanmasını sağlamaktadır. Bu entegrasyon, şirketlerin operasyonel verimliliğini artıracaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca HPLC sisteminin teknik performansını değil; aynı zamanda bölgesel uygulama sonuçlarını içeren saha verileriyle desteklenmiş nadir analizlerden biri olma özelliği taşımaktadır.

Geliştirilen UEİ yaklaşımı ve istatistiksel değerlendirme çerçevesi, literatürdeki boşluğu doldurmakta ve uygulayıcı kurumlara karar destek mekanizmaları geliştirme yönünde somut katkılar sunmaktadır. Enerji kayıplarının azaltılması yönünde veri temelli, yerelleştirilmiş ve sistematik çözümlere duyulan ihtiyaç düşünüldüğünde, HPLC altyapılarının Türkiye genelinde daha yaygın hale getirilmesi hem ekonomik hem de sürdürülebilirlik açısından büyük faydalar sağlayacaktır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışmada, elektrik kayıp-kaçak miktarlarının hesaplanmasında kullanılan veriler Meram Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi'nden temin edilmiştir. Sağladıkları veri desteği için ilgili kuruma teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazar, bu projenin saha çalışmalarında sayaçların ve veri toplama merkezlerinin montaj kontrollerinin gerçekleştirilmesi, sayaçların uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesi ile toplanan verilerin analiz edilmesi süreçlerine aktif katkı sunmuştur.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Abrahamsen, F. E., Ai, Y., & Cheffena, M. (2021). Communication technologies for smart grid: a comprehensive survey. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(23), 8087.
- Aktif Elektronik, (2022, 01 March). <https://aktif.net/en/innovative-communication-for-power-lines/>
- Buzau, M.-M., Tejedor-Aguilera, J., Cruz-Romero, P., & Gómez-Expósito, A. (2019). Detection of non-technical losses using smart meter data and supervised learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), 2661–2670.
- Brown, P. A. (1990). *Telecommunications networks for remote electricity supply metering and load control*. PhD thesis The Open University
- Cui L, Qu Y, Gao L, Xie G, Yu S. Detecting false data attacks using machine learning techniques in smart grid: a survey. *J Netw Comput Appl* 2020;170.
- Düzgün, B. (2018). Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 621-632.
- El-Afifi, M. I., Sedhom, B. E., Padmanaban, S., & Eladl, A. A. (2024). A review of IoT-enabled smart energy hub systems: Rising, applications, challenges, and future prospects. *Renewable Energy Focus*, 51, 100634.
- Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği (Elder). (2023). *Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği Sektör Raporu 2023*. <https://www.elder.org.tr/Content/files/df7e73fd-07f2-4e84-b386-c846ecb499fa.pdf>
- He Y, Mendis GJ, Wei J. Real-time detection of false data injection attacks in smart grid: a deep learning-based intelligent mechanism. *IEEE Trans Smart Grid* 2017; 8:2505–16.
- Jokar, P., Arianpoo, N., & Leung, V. C. M. (2016). Electricity theft detection in AMI using customers' consumption patterns. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 216–226.
- Katherine, T. (2013, July 02). Pot growers costing Canada \$500 million in power theft. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/pot-growers-costing-canada-500-million-in-power-theft>
- Kocaman, B. (2018). Teknik olmayan enerji kayıplarının azaltılmasında PLC sayaçlarının önemi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 220-230.
- Lavenu, C., Chauvenet, C., Treffiletti, P., Varesio, M., & Hueske, K. (2021). Standardization Challenges, Opportunities and Recent Evolutions for the G3-PLC Technology. *Energies*, 14(7), 1937.
- Macit, Y. (2014). Kaçak elektrik olgusu: dini, ekonomik ve psiko-sosyal açıdan yaklaşım. *Süleyman Demirel Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi*, (32), 107-132.
- Maharashtra State Electricity Distribution Company Limited (MSEDCL). (2021). *Annual Report 2020 -2021*. https://www.mahadiscom.in/wp-content/uploads/2023/01/ANNEXURE-3-ANNUAL-ACCOUNTS-FOR-FY-2020-21_compressed.pdf

- Messinis, G. M., & Hatziaargyriou, N. D. (2018). Review of non-technical loss detection methods. *Electric Power Systems Research*, 158, 250–266.
- Pazderin, A., Kamalov, F., Gubin, P. Y., Safaraliev, M., Samoylenko, V., Mukhlynin, N., Odinaev, I., & Zicmane, I. (2023). Data-Driven Machine Learning Methods for Nontechnical Losses of Electrical Energy Detection: A State-of-the-Art Review. *Energies*, 16(21), 7460.
- Razavi, R., Gharipour, A., Fleury, M., & Akpan, I. J. (2019). A practical feature-engineering framework for electricity theft detection in smart grids. *Applied Energy*, 238, 481–494.
- Savian, F. de S., Siluk, J. C. M., Garlet, T. B., do Nascimento, F. M., Pinheiro, J. R., & Vale, Z. (2021). Non-technical losses: A systematic contemporary article review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111205.
- Viegas, J. L., Esteves, P. R., Melício, R., Mendes, V. M. F., & Vieira, S. M. (2017). Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1256–1268.
- Yıldız, E., & Çetinkaya, N. (2022). Elektrik güç sistemlerindeki kaçak kullanımların tahmini. *Journal of Investigations on Engineering and Technology*, 5(1), 1-10.
- Yigit, M., Gungor, V. C., Tuna, G., Rangoussi, M., & Fadel, E. (2014). Power line communication technologies for smart grid applications: a review of advances and challenges. *Computer Networks*, 70, 366-383.