



ENERJİ STRATEJİLERİ KONFERANSI

BİLDİRİ E-KİTABI



ELEKTRİK ENERJİSİ
STRATEJİLERİNDE
YENİ YAKLAŞIMLAR

02-03 EKİM 2024,
ANKARA, TÜRKİYE



TÜRKİYE ELEKTRİK SANAYİ BİRLİĞİ

Mustafa Kemal Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı 7.Km

No: 166

Çankaya-Ankara/TÜRKİYE

Yayıncı Sertifika No: 53255

www.tesab.org.tr tesab@tesab.org.tr

ENERJİ STRATEJİLERİ KONFERANSI BİLDİRİ E-KİTABI

ISBN: 978-625-94054-3-8

Bu yayının tüm hakları saklıdır.

Aralık 2024 TESAB

“Enerji Stratejileri Konferansı e-Bildiri” kitabında 2-3 Ekim 2024 tarihlerinde Ankara'da düzenlenen Enerji Stratejileri Konferansı'nda sözlü ve poster sunum olarak sunulan bildirilerin tam metni yayınlanmıştır. Bildirilerin güncelliği, doğruluğu, güvenilirliği ve tamlığı konusunda tüm titiz çalışmalara rağmen, olabilecek hatalardan Türkiye Elektrik Sanayi Birliği (TESAB) hiçbir taahhüt altına girmez ve sorumluluk kabul etmez. Kitaptaki bilgilerin yanlış kullanımı/yorumlanması sonucunda veya teknik nedenlerle siteye (www.tesab.org.tr) ulaşamamasından ötürü doğrudan veya dolaylı bir zarar doğması halinde, TESAB'a hiçbir borç, sorumluluk veya mükellefiyet yüklenemez. Kitapta yer alan görüş ve yorumlar yazarların kendisine ait olup ilgili olduğu/çalıştığı kurumların düşüncelerini yansıtmamaktadır. Telif hakkı ve diğer her türlü hakları TESAB'e aittir. Kitap içerisindeki bilgiler, kaynak bildirmek kaydıyla, kullanılabilir.

YÜRÜTME KOMİTESİ

| | |
|--|--|
| Zafer Benli | TESAB Yönetim Kurulu Başkanı |
| Orhan Kaldırım | TESAB Yönetim Kurulu Başkan Vekili |
| Ömer Ali Aydınar | TESAB Yönetim Kurulu Sayman Üye |
| Ömer Sami Yapıcı | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| Y. Hüseyin Yücebaş | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| Batuhan Özdemir | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| Muhammed Ali Oflaz | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| İhsan Erbil Bayçöl | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| Memet Atalay | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| Mustafa Taşdemir | TESAB Yönetim Kurulu Üyesi |
| Yücel Kartal | EURELECTRIC Türkiye Koordinasyon Komitesi Başkanı |
| Tolga Aktoprak Mutu Bektaş | Bataryalar Çalışma Grubu |
| Hilal Özek Sadıkoğlu Halil Korutürk Özcan | 2024 Çevre Koruma Çalışma Grubu |
| Ensar Kılıç | E-Mobilite Çalışma Grubu |
| Ünal Küçükcan | Elektrifikasyon ve Enerji Verimliliği Çalışma Grubu |
| Muzaffer Başaran | Elektrifikasyon ve Sürdürülebilirlik Komitesi |
| Mustafa Taşar | Enerji ve Gaz Etkileşimleri Çalışma Grubu |
| Erkan Alan | Enerjide İletişim Çalışma Grubu |
| Emine Bulut Begüm Babalı | Finansal Düzenlemeler ve Piyasa Entegrasyonu Çalışma Grubu |
| Furkan Yardımcı Hüseyin Aydın | Hidro Çalışma Grubu |
| Atacan Gülbay | İklim Değişikliği ve Karbonsuzlaştırma Çalışma Grubu |
| Mete Emin Atmaca Derya Uyanık | İnovasyon ve Dijitalleşme Çalışma Grubu |
| Ali Hakan Everekli | Müşteriler ve Yeni Hizmetler Çalışma Grubu |



Burçin Çavuş
Ali Dursun

Perakende Piyasa Tasarımı Çalışma Grubu

Abdi Körpınar

Piyasa Entegrasyonu ve Şebeke Kodları

Selma Ülker
İlknur Atan

Sosyal Sürdürülebilirlik Çalışma Grubu

Seyide Sevim Deniz
Gülşen Bülbül

Taksonomi Alt Çalışma Grubu

Kemal Kafalı
Dilara Ersan

Teknoloji Çalışma Grubu

Gülcan Koca
İlkim Saniye Karapınar

Termik ve Nükleer Çalışma Grubu

Fırat Öncin
Özgür Gökçalp

Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Depolama Çalışma Grubu

Dr. İsmail Ergün

Yeşil Mutabakat Çalışma Grubu

ORGANİZASYON KOMİTESİ

2024

Prof. Dr. Levent Aydın

Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi
Enerji Ekonomisi ve Yönetimi Ana Bilim Dalı Başkanı

Doç.Dr. İzzet Arı

Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi
Enerji Ekonomisi ve Yönetimi Anabilim Dalı

Ayten Sümer

TESAB Genel Sekreteri

Erkan Alan

TESAB Koordinatör Yardımcısı

Selma Ülker

EÜAŞ – Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı Müdür Yardımcısı
Eurelectric Türkiye Sosyal Sürdürülebilirlik Çalışma Grubu Başkanı

Mutlu Bektaş

Niltek Yazılım Teknolojileri A.Ş. İş Geliştirme Yöneticisi
AIPA İklim Değişikliği Komisyon Üyesi
Eurelectric Türkiye Bataryalar Çalışma Grubu Başkan Yardımcısı

Emine Bulut

EÜAŞ Mali İşler ve Finans Yönetimi Daire Başkanlığı Müdür Yardımcısı
Eurelectric Türkiye Finansal Düzenlemeler Çalışma Grubu Başkanı

BİLİM KURULU

Prof. Dr. Levent Aydın – Başkan

Prof. Dr. Gülen Güllü

Prof. Dr. Serhat Akın

Prof. Dr. Ela Babalık

Prof. Dr. Reşat Ceylan

Prof. Dr. Bülent Yeşilata

Prof. Dr. Erol Kahveci

Prof. Dr. Yasemin Çiftçi

Prof. Dr. Aslı Akay

Prof. Dr. Sezgin Aydın

Prof. Dr. Bora Alboyacı

Prof. Dr. Fatih Cemil Özbuğday

Doç. Dr. İzzet Arı

Doç. Dr. Önder Özgür

Doç. Dr. Ahmet Yiğit Arabul

Doç. Dr. Murat Göl

Doç. Dr. Evren Can Özcan

Doç. Dr. Muhsin Mazman

Doç. Dr. Göktuğ Şahin

Dr. İsmail Emrah Karayel

Dr. Fatma Didem Tunçez

Dr. Kürşat Tosun

Dr. Ertan Taşkıran

Dr. Mete Emin Atmaca

Dr. Gaye Başbilen

Dr. Ezgi Avcı

Dr. İsmail Ergün

Dr. Onur Çağdaş Artantaş

Dr. Okan Yardımcı

Dr. Hüseyin Aydın

Dr. Benan Başoğlu

Dr. Müge Uğur Özçelik

Dr. Mikail Pürlü

Dr. Melih Güneri

Dr. Murat Furat

Dr. Enis Pezek

Dr. Cihat Terzioğlu

Dr. İrem Öner Alp



Değerli Paydaşlarımız,

Elektrik enerjisi sektörünü sosyal bilimlerle buluşturan Enerji Stratejileri Konferansı, “Elektrik Enerji Stratejilerinde Yeni Yaklaşımlar” mottosuyla, akademik birikimi ve sektörel tecrübeyi bir araya getirerek büyük bir başarıya imza atmıştır. Toplamda 31 bildiri sunumu, 6 konu başlığı ve 46 alt başlık ile zenginleştirilen bu etkinlik, enerji sektörü için kritik bir platform oluşturmuştur.

Konferansta ele alınan “Elektrik Enerjisi Arz Güvenliği,” “Yenilikçi Yaklaşımlar,” “Elektrifikasyon ve Enerji Verimliliği,” “Küresel Strateji ve Politika Yaklaşımları,” ve “Elektrik Enerjisi Ekonomisi ve Hukuku” gibi başlıklar, enerji sektörünün geleceğine yön verecek bilimsel ve sektörel katkılar sağlamıştır.

38 farklı üniversiteden uzman akademisyenlerin ve sektörden profesyonellerin yoğun katılımıyla değerlendirilip kabul edilen bildirimler, enerji alanındaki çok disiplinli yaklaşımların gücünü bir kez daha göstermiştir. Ayrıca poster sunumlar, 3 panel oturumu ve geniş bir tartışma ortamı ile bu konferans, sektörde yenilikçi fikirlerin paylaşılması için güçlü bir zemin hazırlamıştır.

Konferansta sunulan bildirimlerin yer aldığı e-bildiri kitabı sayesinde bu birikimin kalıcı hale gelmesi sağlanmıştır. Akademi, kamu ve özel sektör iş birliğinin en güzel örneklerinden biri olan bu etkinliğe katılım sağlayan tüm paydaşlarımıza teşekkürlerimizi sunuyoruz.

Saygılarımızla,

Prof. Dr. Levent Aydın
Enerji Stratejileri Konferansı
Bilim Kurulu Başkanı

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|---------------|
| Konferans Programı..... | 8-12 |
| Tam Metin Sözel Bildiriler | 13-386 |
| 91- Tahkim Yargılaması ve Çevresel Sürdürülebilirlik | 13-25 |
| <i>Ekin Deniz İlhan</i> | |
| 95- Elektrik Dağıtım Şebekesinde Rüzgâr Kuvveti ve Buz Yükünün Fazla Olduğu Spesifik Bölgelerdeki Fazlar Arası Aralayıcı Tasarımı, Üretimi ve Pilot Uygulaması Projesi | 26-46 |
| <i>Sümeyye İleri, Harun Köroğlu, İhsan Önder</i> | |
| 100- Çevreye Duyarlı Bir Teknoloji Olarak Doğal Estere Dayalı Düşük Hacimli Transformatör Geliştirilmesi | 47-56 |
| <i>İrem Hazar, Ramazan Altay, Mahmut Aksoy, Nihan Segah Çakar, Umur Deveci, Seyit Cem Yılmaz</i> | |
| 109- Yüksek Gerilim Trafo Merkezi Topraklama Sistemlerinde Bilgisayar Tabanlı Analiz: Gerçek Bir Uygulama Örneği..... | 57-81 |
| <i>Emir Kaan Tutuş, Celal Fadıl Kumru, Yavuz Ateş, Ertuğrul Partal, Nevzat Onat</i> | |
| 110- Güneş Enerjisi Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Devlet Teşvikleri: Çin Uygulamaları Bağlamında Türkiye Değerlendirmesi ve Politika Önerileri | 82-103 |
| <i>Elif Gözde Doyuran</i> | |
| 113 - Kullanıcı Kaynaklı Gelişmiş Enerji Kalitesi Problemlerinin Makine Öğrenmesi Metotlarıyla Tespit Edilmesi | 104-117 |
| <i>Onur Enginar, Rabia Şeyma Güneş, Tugay Eren Güzelyol, Berkay Emekli, Erman Terciyanlı, Yiğit Ahmet Arıkök</i> | |
| 116 - Atıklardan Hidrojen Üretimi | 118-128 |
| <i>Ergin Özkök</i> | |
| 117- Türkiye Kalkınma Planlarında Enerji Sektörüne Yaklaşım ve Gerçekleşmelere Bakış | 129-156 |
| <i>Mehmet Bulut, İbrahim Öz</i> | |
| 121- Mikro Şebeke Tasarımı ile Şebeke Esnekliği Analizi Pilot Çalışması | 157-176 |
| <i>Ece Aksoy, Kardelen Kemişli, Özge Avcı, Mertkan Dilişen, Tugay Eren Güzelyol</i> | |
| 123- Akıllı Şebekelere Yönelik Saldırı Tespit Sistemi | 177-186 |
| <i>Hamdullah Karamollaoğlu, Mustafa Taşar, Yusuf Ziya Arıcan</i> | |
| 125- Güç Sistemlerinde Beş Fazlı İletim Hattı Modeli Tasarımı ve Entegrasyonu | 187-198 |
| <i>Doğa Keskin, Ergin Kayar, Hamza Feza Carlak</i> | |
| 127- Hidroelektrik Santrallerindeki Esnekliği Artırmak İçin Stratejiler | 199-209 |
| <i>Elif Erin</i> | |
| 129- Makine Öğrenmesi ile Piyasa Takas Fiyatının Tahmin Edilmesi: Türkiye Örneği | 210-234 |
| <i>Mustafa Çağrı Peker, Sinan Sodan, Fuat Oğuz</i> | |
| 131- Entegre Raporlamanın Enerji Sektöründeki Şirketlere Sağlayacağı Faydalar Üzerine Bir Araştırma | 235-243 |
| <i>Emine Bulut</i> | |
| 135- Karbon Fiyatlaması Yöntemleri ve Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Sektörü Açısından Önemi | 244-257 |
| <i>Seyide Sevim Deniz</i> | |
| 138- Türkiye’de Elektrikli Araçların Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Etkisinin Değerlendirilmesi | 258-278 |
| <i>Seyit Cem Yılmaz, Aynur Eray</i> | |

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|----------------|
| 141-Adil Geçiş Kapsamında Güney Afrika Cumhuriyeti Örneği..... | 279-293 |
| <i>Selma Ülker</i> | |
| 142- Elektrik Enerjisi Ve Elektrik Enerjisi Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynaklarının İthalatının Döviz Kuru (ABD \$) Üzerindeki Etkisi: Hatemi-J Asimetrik Nedensellik Analizi | 294-303 |
| <i>Nizamettin Başaran, Hüseyin Serdar Yalçinkaya, Tuncay Belen</i> | |
| 144- Elektrik Yüklerinin Makine Öğrenmesi ile Sınıflandırılması | 304-318 |
| <i>Necip Gözüaçık, Hasan Basri Çetinkaya, Can Murat Gül, Mehmet Cin</i> | |
| 148- Antik Yapılarda Hidrojen Depolama ve Enerji Üretiminin Sürdürülebilir Enerji Çözümleriyle Entegrasyonu..... | 308-318 |
| <i>Hüsnügül Tekin, Elifnur Bayraktar Güneş, Mustafa Çelikpençe, Heybet Kılıç</i> | |
| 149- Yenilenebilir Enerji Olarak Fotovoltaik Panellerden Elektrikli Araç Şarjı ve Gelecek Projeksiyonları | 319-329 |
| <i>İbrahim Öz, Mehmet Bulut</i> | |
| 156- Elektriksel Yayların Dağıtım Şebekesinde Kullanımına Yönelik Analizi | 330-343 |
| <i>Mustafa Emre Eren, Sezai Taşkın, Yavuz Ateş, Ali Rifat Boynueğri</i> | |
| 159 - Rüzgâr Enerjisi Santralleri (RES) Elektrik Üretim Tahmini için Ensemble Yöntemler..... | 344-351 |
| <i>Caner Kahraman, Ali Güleç, Cem İyigün</i> | |
| 161- Belirli Fiyatlı Varlıkların Enerji Ticareti için Optimize Varlık Yönetimi Platformu Geliştirilmesi | 352-363 |
| <i>Ertuğrul Özer, Canan Şişman Korkmaz, Erman Terciyanlı, Rabia Şeyma Güneş, Onur Enginar</i> | |
| 163- Düşük Karbonlu Enerjiye Geçişin Doğu Akdeniz'in Enerji Jeopolitiğine Yansımaları | 364-386 |
| <i>Meltem Üzel</i> | |
| Tam Metin Poster Bildiriler | 387-454 |
| 85 - Enerji Sektöründe Yapay Zeka ve Dijital Dönüşüm: Bilimetric Bir İnceleme | 387-400 |
| <i>İbrahim Etem Kaya, Sevgi Kaya</i> | |
| 133- Elektrik Güç Sistemleri Uygulamalarında Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi: Mevcut Durum ve Perspektifler | 401-421 |
| <i>Fatma Avli Fırış</i> | |
| 145 - MASTERPIECE Projesinden Edinilen Bilgilerle Dijitalleştirme Yoluyla Güneş Enerjisi Entegre Edilmiş Enerji Topluluklarını Güçlendirmek..... | 422-426 |
| <i>Samed Pekdemir, Mehmet Koç, Çağatay Koçak, Barış Görkem Aslan</i> | |
| 146 - DC Yüksek Hızlı Şarj İstasyonlarının Gerilim Harmonik Bozulması Bakımından İncelenmesi..... | 427-437 |
| <i>Sait Taşkeser, Sezai Taşkın, Ertuğrul Partal, Macit Tozak, İbrahim Şengör</i> | |
| 154- Bir Avrupa Ağından Çıkarılan Sonuçlar ile Sürdürülebilir Hidroelektrik Enerjinin Dijitalleşme ve İnovasyon Yoluyla Geliştirilmesi | 438-449 |
| <i>Doğan Gezer, Erkan Koç</i> | |
| 172 - Yenilenebilir Enerji Yatırımlarının Finansmanı | 450-454 |
| <i>Serhat Aydın, Aslı Başçoban</i> | |

Not: Sıralama bildiri numarasına göre küçükten büyüğe yapılmıştır.

KONFERANS PROGRAMI

02 EKİM 2024, ÇARŞAMBA PROGRAM AKIŞI

09.00-10.00

KAYIT: Fuaye Alanı, Giriş Kat

10.00-10.30

**Konferans Salonu
Giriş Kat****AÇILIŞ****Zafer BENLİ**

EÜAŞ - Genel Müdür, TESAB Yönetim Kurulu Başkanı

Prof. Dr. Musa Kazım ARICAN

Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi - Rektör

Mustafa YILMAZ

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu - Başkan

Dr. Alparslan BAYRAKTAR

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı (TBC)

10.30-11.00 Kahve Arası

11.00-11.15

**Konferans Salonu
Giriş Kat****Kristian RUBY**

Eurelectric Genel Sekreteri

Enerji Dönüşümünde Şebeke Yatırımları

11.15-12.30

**Konferans Salonu
Giriş Kat****Panel: Elektrik Enerjisi Stratejilerinde
Yeni Yaklaşımlar****Prof. Dr. Levent AYDIN**

Moderatör

Ahmet ÖZKAYA

ETKB - Enerji İşleri Genel Müdürü

Deniz COŞKUN

TEİAŞ - Genel Müdür Yardımcısı

Dr. Kubilay KAVAK

ESCARUS - Genel Müdür

Dr. Kahraman COBAN

EnerjiSA Üretim A.Ş.

Atacan GÜLBAY

ELDER Koordinatör

12.30-13.30 Öğle Yemeği

02 EKİM 2024, ÇARŞAMBA PROGRAM AKIŞI

13.30-15.00 / OTURUM 1
ELEKTRİK ENERJİSİNDE KÜRESEL
STRATEJİ VE POLİTİKA YAKLAŞIMLARI
Toplantı Salonu, Giriş Kat

Oturum Başkanı : Doç. Dr. İzzet ARI

Sunum 1 : 141- Adil Geçiş Kapsamında Güney Afrika
Cumhuriyeti Örneği
*Selma ÜlkerSunum 2 : 161- Belirli Fiyatlı Varlıkların Enerji Ticareti
İçin Optimize Varlık Yönetimi Platformu Geliştirilmesi
*Ertuğrul Özer, Canan Şişman Korkmaz, Erman
Terciyanlı, Rabia Şeyma Güneş, Onur EnginarSunum 3 : 163- Düşük Karbonlu Enerjiye Geçişin Doğu
Akdeniz'in Enerji Jeopolitiğine Yansımaları
* Meltem ÜzelSunum 4 : 127- Hidroelektrik Santrallerindeki
Esnekliği Artırmak İçin Stratejiler
* Elif ErinSunum 5 : 117- Türkiye Kalkınma Planlarında Enerji
Sektörüne Yaklaşım ve Gerçekleşmelere Bakış
* Mehmet Bulut, İbrahim Öz13.30-15.00 / OTURUM 2
YAPAY ZEKA VE VERİ ANALİTİĞİ
Toplantı Salonu, 1. katOturum Başkanı : Prof. Dr. Fatih Cemil
ÖZBUĞDAYSunum 1 : 113 - Kullanıcı Kaynaklı Gelişmiş Enerji Kalitesi
Problemlerinin Makine Öğrenmesi Metotlarıyla Tespit
Edilmesi
* Onur Enginar, Rabia Şeyma Güneş, Tugay Eren
Güzelyol, Berkay Emekli, Erman Terciyanlı, Yiğit Ahmet
ArıkökSunum 2 : 144- Elektrik Yüklerinin Makine Öğrenmesi ile
Sınıflandırılması
*Necip Gözüaçek, Hasan Basri Çetinkaya, Can Murat Gül,
Mehmet CinSunum 3 : 159 - Rüzgâr Enerjisi Santralleri (RES) Elektrik
Üretim Tahmini için Ensemble Yöntemler -
*Caner Kahraman, Ali Güleç, Cem İyigünSunum 4 : 129- Makine Öğrenmesi ile Piyasa Takas
Fiyatının Tahmin Edilmesi: Türkiye Örneği
* Mustafa Çağrı Peker, Sinan Södan, Fuat ÖgüzSunum 5 : 156- Elektriksel Yayların Dağıtım Şebekesinde
Kullanımına Yönelik Analizi
* Mustafa Emre Eren, Sezai Taşkın, Yavuz Ateş, Ali Rifat
Boynueğri

15.00 -15.15 Kahve Arası

ASELSAN ÖZEL OTURUMU
Enerji Depolama Sistemleri ve YerlilikSerdar BAYAR
Moderatör
ASELSAN - Enerji Sistemleri DirektörüProf. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR
ASPLSAN - Genel MüdürDr. Ramazan USTA
ETKB - Enerji İşleri Genel Müdür YardımcısıOsman Şahin KÖSKER
Kontrolmatik - Genel Müdürİbrahim YILDIRIM
Aksa Jeneratör - Yeni Enerji Teknolojileri DirektörüDr. Alper BAYKUT
YEO Enerji - Reap Batarya Genel Müdür

15.15-17.00

Konferans Salonu
Giriş Kat

02 EKİM 2024, ÇARŞAMBA PROGRAM AKIŞI

POSTER SUNUMLAR

13.30-14.30

Fuaye Alanı
Giriş Kat

Sunum 1: 133- Elektrik Güç Sistemleri Uygulamalarında Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi: Mevcut Durum ve Perspektifler

* **Fatma Avli Fırıf**

Sunum 2: 85 - Enerji Sektöründe Yapay Zeka ve Dijital Dönüşüm: Bilimetric Bir İnceleme

* **İbrahim Etem Kaya, Sevgi Kaya**

Sunum 3: 145 - MASTERPIECE Projesinden Edinilen Bilgilerle Dijitalleştirme Yoluyla Güneş Enerjisi Entegre Edilmiş Enerji Topluluklarını Güçlendirmek

* **Samed Pekdemir, Mehmet Koç, Çağatay Koçak, Barış Görkem Aslan**



14.30-15.30

Fuaye Alanı
Giriş Kat

Sunum 1: 154- Bir Avrupa Ağından Çıkarılan Sonuçlar ile Sürdürülebilir Hidroelektrik Enerjinin Dijitalleşme ve İnovasyon Yoluyla Geliştirilmesi

* **Doğan Gezer, Erkan Koç**

Sunum 2: 172 - Yenilenebilir Enerji Yatırımlarının Finansmanı

* **Serhat Aydın, Ash Başçoban**

Sunum 3: 146 - DC Yüksek Hızlı Şarj İstasyonlarının Gerilim Harmonik Bozulması Bakımından İncelenmesi

* **Sait Taşkeser, Sezai Taşkın, Ertuğrul Partal, Macit Tozak, İbrahim Şengör**

03 EKİM 2024, PERŞEMBE PROGRAM AKIŞI

10.00-11.30 / OTURUM 3
ELEKTRİK ENERJİ EKONOMİSİ VE HUKUKU

Toplantı Salonu, Giriş Kat

Oturum Başkanı : **Dr. Tamer EMRE**

Sunum 1 : **142-** Elektrik Enerjisi Ve Elektrik Enerjisi Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynaklarının İthalatının Döviz Kuru (ABD \$) Üzerindeki Etkisi: Hatemi-J Asimetrik Nedensellik Analizi
* **Nizamettin Başaran, Hüseyin Serdar Yalçınkaya, Tuncay Belen**

Sunum 2 : **110-** Güneş Enerjisi Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Devlet Teşvikleri: Çin Uygulamaları Bağlamında Türkiye Değerlendirmesi ve Politika Önerileri
* **Elif Gözde Doyuran**

Sunum 3 : **91-** Tahkim Yargılaması ve Çevresel Sürdürülebilirlik
* **Ekin Deniz İlhan**

Sunum 4 : **131-** Entegre Raporlamanın Enerji Sektöründeki Şirketlere Sağlayacağı Faydalar Üzerine Bir Araştırma
* **Emine Bulut**

10.00-11.30 / OTURUM 4
İLETİM VE DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
YENİLİKLER

Toplantı Salonu, 1. kat

Oturum Başkanı : **Dr. Ertan TAŞKIRAN**

Sunum 1 : **95-** Elektrik Dağıtım Şebekesinde Rüzgâr Kuvveti ve Buz Yükünün Fazla Olduğu Spesifik Bölgelerdeki Fazlar Arası Aralayıcı Tasarımı, Üretimi ve Pilot Uygulaması Projesi
* **Sümeyye İleri, Harun Koroğlu, İhsan Önder**

Sunum 2 : **123-** Akıllı Şebekelere Yönelik Saldırı Tespit Sistemi
* **Hamdullah Karamollaoglu, Mustafa Taşar, Yusuf Ziya Arıcan**

Sunum 3 : **109-** Yüksek Gerilim Trafo Merkezi Topraklama Sistemlerinde Bilgisayar Tabanlı Analiz: Gerçek Bir Uygulama Örneği
* **Emir Kaan Tutuş, Celal Fadil Kumru, Yavuz Ateş, Ertuğrul Partal, Nevzat Onat**

Sunum 4 : **125-** Güç Sistemlerinde Beş Fazlı İletim Hattı Modeli Tasarımı ve Entegrasyonu
* **Doğa Keskin, Ergin Kayar, Hamza Feza Carlak**

11.30 -11.45 Kahve Arası

11.45-13.00 / OTURUM 5
ÇEVRE VE ELEKTRİK ENERJİSİ

Toplantı Salonu, Giriş Kat

Oturum Başkanı : **Prof. Dr. Gülen GÜLLÜ**

Sunum 1 : **100-** Çevreye Duyarlı Bir Teknoloji Olarak Doğal Estere Dayalı Düşük Hacimli Transformatör Geliştirilmesi
* **İrem Hazar, Ramazan Altay, Mahmut Aksoy, Nihan Segah Çakar, Umur Deveci, Seyit Cem Yılmaz**

Sunum 2 : **135-** Karbon Fiyatlaması Yöntemleri ve Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Sektörü Açısından Önemi
* **Seyide Sevim Deniz**

Sunum 3 : **116-** Atıklardan Hidrojen Üretimi
* **Ergin Özkök**

11.45-13.00 / OTURUM 6
HİDROJEN VE ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Toplantı Salonu, 1. kat

Oturum Başkanı : **Prof. Dr. Bülent YEŞİLATA**

Sunum 1 : **138-** Türkiye'de Elektrikli Araçların Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Etkisinin Değerlendirilmesi
* **Seyit Cem Yılmaz, Aynur Eray**

Sunum 2 : **149-** Yenilenebilir Enerji Olarak Fotovoltaik Panellerden Elektrikli Araç Şarjı ve Gelecek Projeksiyonları
* **İbrahim Öz, Mehmet Bulut**

Sunum 3 : **121-** Mikro Şebeke Tasarımı ile Şebeke Esnekliği Analizi Pilot Çalışması
* **Ece Aksoy, Kardelen Kamaşlı, Özge Avcı, Mertkan Dilışen, Tugay Eren Güzelyol**

Sunum 4 : **148-** Antik Yapılarda Hidrojen Depolama ve Enerji Üretiminin Sürdürülebilir Enerji Çözümleriyle Entegrasyonu
* **Hüsnügül Tekin, Elifnur Bayraktar Güneş, Mustafa Çelikpençe, Heybet Kılıç**

03 EKİM 2024, PERŞEMBE PROGRAM AKIŞI

13.00-14.00 Öğle Yemeği

TÜBİTAK ÖZEL OTURUMU
SolarHub: Güneş Enerjisi ve Yeşil İnovasyon**Açılış****Dr. Hande ERYILMAZ**
ODTU GUNAM - Uzman Araştırmacı**Tayfun HIZ**
ODTU GUNAM - Uzman Araştırmacı**Panel****Cağrı YILDIRIM**
Moderatör
TUBİTAK - Ufuk Avrupa Programı Ulusal Koordinatörü**Prof. Dr. Rasit TURAN**
ODTU GUNAM - Yönetim Kurulu Başkanı**Mehmet İBİS**
İstanbul Gedik Üniversitesi - Öğretim Görevlisi**Erdem SEZER**
Kalkınma Yatırım Bankası - Sektörel Araştırmalar Direktörü**Dr. Yelda ERDEN TOPAL**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

14.00-15.30

Konferans Salonu
Giriş Kat**KAPANIŞ: Konferans Salonu, Giriş Kat****Ayten SÜMER**
TESAB Genel Sekreteri

15.30-15.45

Destekleyen Kamu Kuruluşları**İş Birliği****Ana Sponsor****Altın Sponsor****Gümüş Sponsor****Bronz Sponsor****Bronz Sponsor****Çalıştay Sponsoru****Destekleyen Sivil Toplum Kuruluşları**

91: Tahkim Yargılaması ve Çevresel Sürdürülebilirlik

Dr. Ekin Deniz İlhan

Özyeğin Üniversitesi Doktor Öğretim Üyesi, Milletlerarası Özel Hukuk Anabilim Dalı

ÖZET

Çevrenin korunmasının milletlerarası yatırım hukukunda yer bulması, yatırımcının yatırım üzerindeki menfaatleri ile evsahibi devletin çevrenin korunmasındaki menfaatlerinin çakışması sonucunda ortaya çıkmıştır. Ancak ev sahibi devletlerin düzenleyici yetkisine dayanarak kamu yararı ve ekonomik sürdürülebilirlik finansmanının sağlanması amacı ile kültürel mirasın korunması yönünde uygulayacağı tedbirlerin, yatırımcının yatırımdan doğan haklarına etki etmesi durumunda nasıl bir yol izlenmesi gerektiğine dair milletlerarası yatırım hukukunda temel ve bağlayıcı bir düzenleme mevcut değildir. Kaldı ki milletlerarası yatırım hukukunun temel amacı, yabancı yatırımın ev sahibi devlette korunmasıdır; yoksa yatırım hukukunun varlık sebepleri arasında, ev sahibi devlette yer alan kültürel mirasın korunması amacı yer almamaktadır. Yatırım tahkimi içerisinde, ev sahibi devletlerin giderek artan sayıda, kültürel mirasın korunması amacıyla düzenleyici yetkilerini kullanarak yatırıma etki eden tasarrufları sonucunda, milletlerarası yatırım hukukunda uyumsuzluklar bakımından çevrenin korunmasına dair düzenlemelere yer verilip verilmediği ve yer verme gerekliliğinin incelenmesi lüzumu doğmuştur. Bu kapsamda günümüzde, yabancı yatırımcıların yeşil düzene uyum sağlamak için ve yatırımlar açısından fon sağlayıcı enstrümanlara fon sağlanabilmesi için çevreyi koruma ödevi tartışılmaya başlanmıştır. Çalışmanın amacı uluslararası anlaşmazlıkların çözümü ve tahkim yargılamasında iklim değişikliği konusunda Türkiye için yürürlükteki mevzuat bakımından bir yol haritası çıkarmaktır. Yöntem, iklim değişikliği ve emisyon hedeflerini konu alan uluslararası uyumsuzlukları irdeleyerek, bu konudaki yatırım ve tahkim hukuku bakımından revizyon çalışmalarına katkı sağlamaktır. Ticari tahkim uygulaması bakımından ise, yatırım tahkimine göre çevre ve sürdürülebilirlik konuları, şirketlerin ve yöneticilerin (E)SG sorumluluğunu doğuran eylemlerden kaçınması ile söz konusu olabilecektir. ICC komisyonun raporu (*ICC Arbitration and ADR Commission*

Report on Resolving Climate Change Related Disputes through Arbitration) uyarınca iklim uyuşmazlıklarının tahkim yolu ile çözülmesi konusu gündeme gelmiştir. Bu konuyu üç kategoride incelemek mümkündür. İlk olarak Paris Anlaşması çerçevesinde, Paris Anlaşması taahhütlerine uygun olarak enerji veya diğer sistemlerin geçişi, hafifletme ve uyumlanmasına ilişkin sözleşmeler, buradaki kasıt devletlerin diğer devletlerle yapılan anlaşmalardır, enerji, arazi, kentsel ve altyapının inşaat sözleşmeleri, sanayi sistemleri sözleşmeleri bakımından da bu durum gündeme gelecektir. İkinci olarak, mevcut mevzuat bakımından 15.05.2021 tarihinde “Kamuda Enerji Performans Sözleşmelerinin Uygulanmasına İlişkin Tebliğ” yayınlanmıştır.

Bu tebliğ sayesinde kamu binalarında, enerji verimliliği ile alakalı projelerde enerji performans sözleşmeleri bakımından tahkim yoluna başvurulabilecektir. Türkiye'nin Paris anlaşması taahhütleri çerçevesinde yeni yatırımlardaki riskler ile tahkim yargılamasında mahremiyete önem verilmesi, hakemlerin ve avukatların konuyla alakalı birincil bilirkişiliği dikkat çekicidir. Bu kapsamda daha şeffaf ve adil hukuki enstrümanların doğacağı, bunun da tahkim yargılamasını şüphesiz derinden etkileyeceği açıktır. Sonuç olarak ilgili tebliğde, iklim değişikliği, enerji, arazi kullanımı, ulaşım ve vergilendirme politikalarının, emisyon hedeflerinin, çevre ve özen yükümlülüğünün yatırım ve ticari tahkime etkisi, mevcut uluslararası tahkim uyuşmazlıklarından örnekle değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Tahkim Yargılamasında İklim Değişikliği, Çevresel Sorumluluklar ve Tahkim, Doğrudan Yabancı Yatırımlar Hukuku ve Sürdürülebilir Kalkınma, Enerji Şartı Anlaşması'nın Modernizasyonu

ABSTRACT

The inclusion of environmental protection in international investment law emerged since the conflict between the interests of the investor on the investment and the interests of the host state in protecting the environment. However, there is no fundamental and binding regulation in international investment law regarding the measures to be taken by the host states to protect cultural heritage to ensure public interest and economic sustainability financing based on their regulatory authority. Moreover, the main purpose of international investment law is to protect foreign investment. Within the scope of investment arbitration, as a result of the increasing number of host states' decisions affecting investments by using their regulatory powers for the protection of cultural heritage, it has become essential to examine whether regulations regarding the protection of the environment are included in terms of disputes in international investment law. In this context, the duty of foreign investors to protect the environment in order to adapt the green deal and to provide funds for investment funding instruments has begun to be discussed. The aim of the study is to create a road map for Turkey and predict a legislation

regarding climate change in international dispute resolution and arbitration proceedings. The method is to contribute investment by examining international disputes regarding climate change and emission targets. In terms of commercial arbitration practice, compared to investment arbitration, environmental and sustainability issues may be discussed in the consideration of (E)SG liability. According to the ICC commission report (*ICC Arbitration and ADR Commission Report on Resolving Climate Change Related Disputes through Arbitration*), the issue of resolving climate disputes through arbitration has been brought to the agenda. It is possible to summarize this issue in three categories. First of all, within the framework of the Paris Agreement, contracts regarding the transition, mitigation and adaptation of energy or other systems in accordance with the Paris Agreement commitments, by the meaning of states with other states, energy, land, urban and infrastructure construction contracts, industrial systems contracts. Secondly, in terms of the current legislation, the "*Regulation on the Implementation of Energy Performance Contracts in the Public Sector*" was published on 15.05.2021. This regulation is predicted even the arbitration proceeding will be possible in terms of energy performance contracts in public buildings and energy efficiency-related projects. The risks in new investments within the framework of Turkey's Paris agreement commitments, the importance given to confidentiality in arbitration proceedings, and the primary expertise of arbitrators and lawyers on the subject are noteworthy. As a result, in the relevant notification, the effects of climate change, energy, land use, transportation and taxation policies, emission targets, environment and duty of care on investment and commercial arbitration will be evaluated with examples from existing international arbitration disputes.

Keywords: Climate Change on Arbitration Proceedings, environmental liabilities and arbitration, Foreign Direct Investment Law and Sustainable Development, Modernization of Energy Charter Treaty.

GİRİŞ

Uluslararası yatırım tahkiminde devletlerin bazı durumlarda tazminat ödemekle yükümlü oldukları görülmektedir. Devletlerin egemenlik haklarını kullanarak yasal düzenleme yapma konusunda irade muhtariyeti olmasının yanı sıra, bir diğer açıdan da yükümlülükleri söz konusudur. Örnek olarak devletlerin kendi tâbiyetinde olmayan vatandaşlara, kendi ülke sınırları içerisinde tam koruma ve güvenlik ilkesini sağlama zorunluluğu bu yükümlülüklerden birini oluşturmaktadır. Bu koruma sağlanmadığı takdirde, bir devlet diğer devlete karşı diplomatik koruma hakkını kullanabilmektedir.¹ Yabancı yatırımların korunması da devletlerin diğer devletlere karşı uymak zorunda olduğu yükümlülükler arasında yer almaktadır. Bu yükümlülüklerin sağlanması ise milletler arası sözleşmeler, genel hukuk ilkeleri, teamüller vasıtası ile olmaktadır. Günümüzde uluslararası yatırım uyuşmazlıklarının en temel kaynağı ikili yatırım anlaşmalarıdır. Dünyada toplam olarak 2200 civarında ikili yatırım anlaşması mevcuttur.² Bu anlaşmalarda yatırım, yatırımcı gibi bazı kavramlardan ne anlaşılması gerektiği, yatırımların nasıl korunacağı, yapılacak muamelenin ölçüsünün ne olacağı gibi konular düzenlenmektedir.³ Bu yükümlülüklerin keştiği konular bakımından, ikili ve çok taraflı yatırım anlaşmalarının tekrar kaleme alınması gündeme gelmektedir. Çalışmada iklim ve çevrenin korunması bakımından, ev sahibi devletlerin ve yabancı yatırımcıların bu kavramlardan nasıl etkileneceği ve bu durumun uluslararası hakem kararları ile nasıl cisimleştirileceği üzerinde durulacaktır.

2 YÖNTEM

Çalışmanın yöntemi mevzuat ve literatür incelemesi vasıtası ile olacaktır. Çalışma; Enerji Şartı Anlaşması bakımından yatırımların korunmasına hizmet eden ilkelerin ve enerji yatırımlarının hukuken güvence altına alınmasını sağlayacak olan hükümlerin amacını ve bu ilkeleri karşılaştırmalı hukuk bakış açısı ile incelemeyi amaçlamaktadır. Yöntem, iklim değişikliği ve emisyon hedeflerini konu alan uluslararası uyuşmazlıkları irdeleyerek, bu konudaki yatırım ve tahkim hukuku bakımından revizyon çalışmalarına katkı sağlamaktır. Araştırma, sosyal bilim araştırmalarında sıkça başvurulan nitel ve doktrinsel yöntemleri birleştiren karma bir yaklaşım benimseyecektir. Araştırma esnasında ve

¹Devletler, kural olarak başka ülkelerde yer alan yatırımların korunması için diplomatik koruma tanıma hakkına sahiptirler. Bkz. *Barcelona Traction, Light and Power Co. Ltd (Belgium v Spain)*, Judgment, 5 February 1970, ICJ Reports (1970); *Case Concerning the Elettronica Sicula SpA (ELSI) (US v Italy)*, Judgment, 20 July 1989, ICJ Reports (1989) yatırımların korunması amacıyla Uluslararası Adalet Divanı (UAD) önüne getirilen bu husus açıklığa kavuşturulmuş, bunun dışında diplomatik koruma birçok kez iki devlet arasında tahkim yargılamasına da konu olmuştur. Belirtmek gerekir ki, Devletler ve Diğer Devletlerin Vatandaşları Arasındaki Yatırım Uyuşmazlıklarının Çözümlemesi Hakkında Konvansiyon'un 27. maddesinin 1. fıkrası uyarınca; yatırım tahkimine rıza konusunda, taraf devletler vatandaşlarına diplomatik koruma tanımaktan imtina edemezler ve bu konuda uluslararası bir talep ileri süremezler.

²International Investment Agreements < <https://investmentpolicy.unctad.org/international-investment-agreements> > Erişim Tarihi: 26.07.24.

³Dolzer, Rudolf/Schreuer, Christopher: Principles of International Investment Law, 2018, s.13.

sonrasında bilimsel etik ilkeler gözetilecek; kamusal, ticari ve kişisel verilerin korunması öncelikli olacaktır. Raporların ve yönetici özetlerinin içerikleri ve yayım yöntemleri ana paydaş kamu otoritesi ile beraber detaylı bir şekilde planlanacaktır. Sürdürülebilir kalkınmayla ilgili Türkiye’de ve dünya çapında yayımlanan bilimsel makalelerin, raporların, hukuki metinlerin, yargı kararlarının ve politika belgelerinin kapsamlı bir incelemesinin gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Ayrıca sürdürülebilir kalkınma ile ilgili uluslararası ve Türk hukuk yargılamasında yer alan değerlendirmelerin ve politikalarının geniş bir analiz yapılacaktır. Türkiye için gelişim olanakları ve potansiyel çözümleri saptayabilmek için dört araştırma konusuyla ilgili diğer devletlerden vaka çalışmalarının ve iyi uygulamaların analiz edilecektir. İkili ve çok taraflı yatırım anlaşmalarındaki hükümler ve literatür karşılaştırmalı hukuk bakış açısı ile incelenecektir. Bu anlaşmalarda ayrıca yabancı yatırımcıya yapılacak muamelenin kapsamı belirlenmektedir. Örnek olarak, Türkiye ve Zambiya arasında akdedilen ikili yatırım anlaşmasında, çevre ve iklim, meşru kamu yararı bakımından devletlerin önlem alma imkânı üzerinde durulmuştur. Çok taraflı yatırım anlaşmaları bakımından ise, çevre ve iklim ile ilgili meseleler korumanın kapsamını tümüyle değiştirebilmektedir. Antlaşmanın içerdiği koruma standartları arasında yatırım uyuşmazlıklarının çözümü amacı ile başvuru yapılan yatırım tahkimi, yabancı yatırımcı ile ev sahibi devlet arasındaki uyuşmazlıkların çözümü sistemi olarak yer almaktadır. Ne var ki, mevcut yatırım tahkimi sistemi ve uyuşmazlıkların tahkim yoluyla çözümünde gerek devletlerin gerek yatırımcıların eleştirileri zamanla artış göstermiş ve Antlaşma metninin çağın gereklerine ayak uyduramaması bu eleştirilerin ana odağı olmuştur. Âkit taraflar arasında, özellikle Avrupa Birliği üyesi devletlerin kendi aralarında görülen yatırım uyuşmazlıklarında ciddi bir artışın yaşanması, Enerji Şartı Anlaşması’nın başlangıçtaki gelişmekte veya az gelişmiş ülkelerdeki yatırımları koruma felsefesini tam tersine çevirmiş ve daha çok gelişmiş ekonomilere sahip ülkelerde Antlaşmayı başvuru yapılan bir araç haline getirmiştir.

BULGULAR VE YORUMLAR

Çalışmaların bulguları bakımından uluslararası kuruluşların bu konuya yönelik çalışma raporları ışığında vaka analizi yapılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, uluslararası ikili ve çok taraflı yatırım anlaşma hükümleri ışığında uluslararası tahkim uyuşmazlıkları incelenerek vaka analizi yapılacaktır. İkili ve çok taraflı yatırım anlaşmalarının amacını aşacak şekilde kullanılması ve hedefinden sapması da Antlaşmanın yeniden kaleme alınması ihtiyacını doğurmuştur. Küresel iklim krizi bakımından mevcut olan çekinceler ve kamu yararını korumaya çalışan hükümetlere karşı kullanılan bir mekanizmaya dönüştürülen Enerji Şartı Anlaşması’nın, doktrinde hali hazırdaki fosil yakıt projelerine yönelik yasaklara, enerji santrallerine yönelik çevresel kısıtlamalara ve kömürün aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmasına yönelik argümanların dayanağı olarak gösterilmeye başlanmıştır⁴. Avrupa Birliği üye devletleri, müzakerelerin yürütülmesi görevini Avrupa Komisyonu’na devretmiş ve Komisyon, 2

⁴Flues, F./ Eberhardt, P./ Olivet C.: “Busting the myths around the Energy Charter Treaty. A guide for concerned citizens, activists, journalist and policymakers”, Berlin, Brüksel, Amsterdam, (ed. Paula Dobbyn) Aralık 2020, s. 36.

Temmuz 2019 tarihinde Enerji Şartı Anlaşması için daha yüksek koruma içeren çevre ve iklim hedefleri de dahil olmak üzere dört alana yayılan amaçlar tespit etmiştir⁵. Buna göre modernizasyona ilişkin hedefler arasında; sözleşme tarafları arasında enerji sektörüne sürdürülebilir bir şekilde yatırım yapılmasını kolaylaştırmak, Antlaşma kapsamında yatırım koruması ve anlaşmazlıkların çözümüne ilişkin hükümleri güncellemek, AB'nin, iç pazarda faaliyet gösteren üçüncü ülkelerden gelen piyasa katılımcılarının, çevre ve güvenlik politikasına ilişkin olanlar da dahil olmak üzere, yürürlükteki AB ve Üye Devletlerin yasalarına uymalarını talep edebileceğini açıklığa kavuşturmak, iklim değişikliği ve temiz enerjiye geçiş hedeflerine yer verilmesi ve Paris Anlaşması'ndaki hedeflere ulaşılmasına katkıda bulunulması üzerinde durulmaktadır⁶. Bu kapsamda yapılan tüm değişikliklere rağmen, Âkit devletler ve sivil toplum örgütleri, Enerji Şartı Anlaşması'nın temiz enerjiye geçiş sürecine zarar verdiği ve hükümetlerin pek çok devletin iklim sorunları ile karşı karşıyayken ellerinin bağlı olamayacağı gerekçesi ile anlaşmadan çekileceklerini deklere etmeye başladılar⁷. Modernizasyona duyulan ihtiyacın en önemli sebeplerinin başında iklim değişikliği ve yenilenebilir enerjiye yatırım ihtiyacı doğmuştur. Buna ek olarak, Antlaşmanın imzalanmasından önce bile, enerjinin bir ham madde olarak parçalara ayrılması veya segmentasyonu konusunda, üreten ve tüketen ülkeler arasında algı ve ihtiyaç farklılıkları her zaman mevcut olmuş ve bu nedenle anlaşmanın değişimi zaruri olmuştur.⁸ Artan siyasi endişelerle birlikte, son yıllarda Enerji Şartı Anlaşması'nın yatırım rejimi, yatırım uyumsuzluklarının çözümünden uzaklaşma politikasının bir parçası olarak önce Rusya, ardından İtalya ve devamında Avustralya'nın Antlaşmadan çekilmesiyle başlayan geri çekilme sürecinde⁹ farklı çevrelerin baskısına maruz kalmıştır. Daha önce belirtilen Rusya ve İtalya örneğinde Antlaşmadan çekilme kararı, yüz milyonlarca dolar değerindeki iddialar nedeniyle Enerji Şartı Anlaşması kapsamında dava açıldıktan sonra alınmıştır¹⁰. Ayrıca, *Achmea* davasında AB Adalet Divanının, AB anlaşmalarını, AB yatırımcıları ile AB Üye Devletleri arasındaki yatırım uyumsuzluklarının çözümünü engelleyecek şekilde yorumlaması ve AB ile Üye Devletlerinin bu kararı uluslararası düzeyde uygulamasını zorunlu kılması AB'nin Enerji Şartı Anlaşması hakkındaki görüşlerini yansıtan bir karar olarak ortaya çıkmıştır.

⁵<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2019/07/15/council-adopts-negotiation-directives-for-modernisation-of-energy-charter-treaty/> > Erişim Tarihi: 28.07.24.

⁶ Temmuz 2019 tarihli Enerji Şartı Anlaşmasının Modernizasyonuna İlişkin Direktiflerin Müzakere Edilmesi başlıklı Avrupa Komisyonu kararı için bkz. < <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10745-2019-ADD-1/en/pdf> > Erişim Tarihi: 28.07.24.

⁷End Fossil Protection, 'Open Letter from Climate Leaders and Scientists to Signatories of the Energy Charter Treaty (ECT)', 2020 için bkz. < <https://endfossilprotection.org/> > Erişim Tarihi: 28.07.2024 ve Friends of the Earth Europe and Climate Action Network, 'Civil Society Organization Statement Against the Energy Charter Treaty, 2021 için bkz. < <https://s2bnetwork.org/wp-content/uploads/2021/07/CSO-Statement-pdf> > Erişim Tarihi: 28.07.24.

⁸Theofanopoulos, T: "Modernization of the Energy Charter Treaty: Evolution and Challenges", Piraeus, University of Piraeus, 2022, s. 4.

⁹Rusya, 18 Ekim 2009 tarihinden itibaren; İtalya, 1 Ocak 2016 tarihinden itibaren; Avustralya, 13 Aralık 2021 tarihinden itibaren geçerli olmak üzere Enerji Şartı Anlaşması'ndan çekilmiştir.

¹⁰Rusya'ya üç dava açılmıştır: bkz. *Yukos v Russian Federation*, PCA Case No AA 227, *Hulley Enterprises v Rusya*, PCA Case No AA 226 ve *Veteran Petroleum v Rusya*, PCA Case No AA 228, 18 Temmuz 2014; Üç davacıdan her biri 114 milyar dolar talep etmiştir. *Blusun v İtalya*, ICSID Case No ARB/14/3, 27 Aralık 2016 davası ise İtalya'ya, geri çekildiğini bildirmeden önce açılmış ve davacılar 188 milyon Euro talep etmişlerdir.

Enerji Şartı Anlaşmasının içeriğindeki hükümlerin, Paris Anlaşması¹¹ ile uyumlu olmayan, Avrupa Yeşil Mutabakatı¹² hükümlerinde yer alan standartlara ulaşma çabası göstermeyen bir versiyon olarak değerlendirilmesi Antlaşmadan çekilme kararını kuvvetlendirmiştir. Son olarak, Enerji Şartı Anlaşması'nın yatırım rejimi, sözleşme taraflarının Paris Anlaşması kapsamındaki taahhütlerine aykırı olarak, potansiyel tazminat talepleri nedeniyle iklim değişikliği önlemlerini benimsemenin maliyetini radikal bir şekilde arttırdığı için iklim değişikliği mücadelesinde büyük bir engel olarak görülmeye başlanmıştır. Bir diğer kaynak, Paris Anlaşmasıdır. Bu anlaşma, devletler arasında bağlayıcı olan küresel iklim anlaşmasıdır¹³. Anlaşma, uluslara iklim değişikliği tehdidi konusunda bilinç kazandırmayı ve buna karşı tepkiyi güçlendirmeyi amaçlamaktadır¹⁴. Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris'te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Taraflar Konferansı'nın¹⁵ (UNFCCC) yirmi birinci oturumunda 12 Aralık 2015 tarihinde kabul edilmiştir. Anlaşmanın 20. maddesi uyarınca, Birleşmiş Milletler Genel Merkezinde, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine Taraf olan Devletlerin ve bölgesel ekonomik entegrasyon kuruluşlarının imzasına açık hale getirilmiş ve nihayetinde ilgili Sözleşme taraf Devletler bakımından 22 Nisan 2016'da imzalanmış, ardından 5 Ekim 2016'da Avrupa Birliği tarafından onaylanmıştır. Şu an itibariyle uluslararası düzeyde iş birliğine olanak tanıyan Paris Anlaşması, 198 ülke tarafından imzalanmış, 195 ülke tarafından onaylanmıştır¹⁶. Paris Anlaşmasının 2. maddesinde ifade edildiği üzere¹⁷, Anlaşma ile, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılması çabaları bağlamında hareket ederek, küresel ortalama

¹¹Paris Anlaşması veya Paris İklim Anlaşması, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında, iklim değişikliğine adaptasyon ve bu değişikliğin azaltılmasına yönelik faaliyetlerin finansmanı konularına içeren, 12 Aralık 2015 tarihinde imzalanan ve 4 Kasım 2016 tarihi itibariyle yürürlüğe giren anlaşmadır. < https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf > Erişim Tarihi: 22.06.2024.

¹²Avrupa Yeşil Mutabakatı, AB tarafından hazırlanan, 1 Ekim 2023 tarihi itibariyle yürürlüğe giren ve iklim değişikliği nedeniyle özellikle elektrik, demir-çelik, çimento, alüminyum, gübre gibi ürünlerin üretim süreçlerine müdahaleler içeren bir düzenlemedir. Söz konusu düzenlemenin tamamı için bkz. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN> > Erişim Tarihi: 22.06.2024.

¹³Rajamani, L./Werksman, J.: "The legal character and operational relevance of the Paris Agreement's temperature goal", Philosophical Transactions of the Royal Society, 2 Nisan 2018.

¹⁴UNFCCC. 2016 Decision 1/CP.21, "Adoption of the Paris Agreement", FCCC/CP/2015/10 Add.1, para. 20.

¹⁵Paris İklim Konferansı, resmi olarak Almanya'nın Bonn kentinde bulunan ve iklimden sorumlu Birleşmiş Milletler organı olan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) 21. Taraflar Konferansı olarak bilinmektedir. İlgili Sözleşmenin uygulanmasını ilerletmek ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik kararlar almak üzere her yıl Taraflar Konferansı toplanmaktadır. Ayrıca bkz. <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop> < Erişim Tarihi: 26.01.2024 > Erişim: 30.07.24.

¹⁶Paris Anlaşmasına ilişkin detaylı bilgi için bkz. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsq_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=en < Erişim Tarihi: 26.01.2024 > Erişim: 30.07.24.

¹⁷ Paris Anlaşması m.2: "Hedefi dahil olmak üzere Sözleşme'nin uygulanmasını geliştirmek amacıyla bu Anlaşma, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılması çabaları bağlamında iklim değişikliği tehdidinde yönelik küresel müdahaleyi aşağıda belirtilenler aracılığıyla güçlendirmeyi amaçlamaktadır:

(a) İklim değişikliği risk ve etkilerini önemli ölçüde azaltacağı bilinciyle, küresel ortalama sıcaklıktaki artışı sanayileşme öncesindeki seviyeye göre 2°C'nin oldukça altında tutmak ve sıcaklık artışını sanayileşme öncesi dönemdeki seviyelerin 1,5°C üzeri ile sınırlandırmak için çaba göstermek;

(b) Gıda üretimini tehdit etmeyecek şekilde, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine uyum sağlayabilme kabiliyetini artırmak, iklim değişikliğine direnci geliştirmek ve düşük emisyonlu kalkınmayı teşvik etmek;

(c) Finans akışlarını, düşük sera gazı emisyonları ve iklim değişikliğine dirençli kalkınmaya yönelik eğilimle tutarlı hale getirmek.

Bu Anlaşma, farklı ulusal koşullar ışığında, hakkaniyet, ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ilkesi ve tarafların görece kabiliyetlerini yansıtacak şekilde uygulanacaktır."

sıcaklıktaki artışı sanayileşme öncesindeki seviyeye göre 2°C'nin oldukça altında tutmak ve sıcaklık artışını sanayileşme öncesi dönemdeki seviyelerin 1,5°C üzeri ile sınırlandırmak hedeflenmektedir. Diğer milletlerarası sözleşmeler bakımından, ICSID Sözleşmesi¹⁸, Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi, Viyana Sözleşmesi¹⁹ gibi pek çok milletlerarası sözleşme, uluslararası yatırım tahkim. yargılamasına kaynaklık etmektedir. Aynı şekilde, Paris İklim Anlaşması²⁰ ve Glasgow İklim Paktı²¹ da devletlerin çevre ve iklim konularıyla ilgili uluslararası yükümlülüklerini düzenlemesi bakımından önem taşıyan kaynaklardan olmuştur. Yine, Uluslararası Adalet Divanı Statüsü'nün 38/1-c maddesinde yer alan "uygar uluslarca kabul edilen genel hukuk ilkeler." ifadesinden kaynaklanan, hukukun genel ilkelerinin uygulanması yatırım tahkimi yargılamaları bakımından önemini artırmıştır²². Aynı şekilde, uluslararası yatırımlar bakımından kabul edilen genel hukuk ilkesi; "*nemo auditur propria m iurpitudinem allegans*"dir. Bu ilke, kimsenin kendi kusurundan faydalanamayacağı olarak bilinmektedir. Uluslararası yatırım hukuku ilkelerinin mevcudiyet. açısından, yabancıların mal varlığının kamulaştırılması üzerine tam tazminat ödenmesi, sebepsiz zenginleşme ve kazanılmış haklar ile ilgili argümanlar da bizatihi hukukun genel ilkeler. kapsamında değerlendirilmektedir²³. Bir diğer kaynak olarak, Avrupa Yeşil Mutabakatı mevcuttur. AB Konseyi, 2019-2024 yıllarını kapsayan, AB gündemi üzerinde Avrupa Konseyi'nin çalışmalarına yön verecek ve diğer AB kurumlarının çalışma programlarına rehberlik edecek öncelikli alanları belirleyen bir stratejik ajanda yayınlamıştır²⁴. Stratejik gündem dört ana önceliğe odaklanılmıştır; vatandaşların ve özgürlüklerin korunması, güçlü ve canlı bir ekonomik temel geliştirilmesi, zararsız bir iklim içeren, yeşil, adil ve sosyal bir Avrupa inşa edilmesi ve Avrupa'nın çıkarlarını ve değerlerini küresel sahnede desteklenmesidir²⁵. Yönetmelikler ve normların revize edilmesi sonucu ortaya çıkan yeni düzenlemeler sonucunda Mutabakat bağlayıcı hale getirilmiş²⁶, böylece Avrupa Yeşil Mutabakatı, Paris Anlaşması'ndan içerdiği yaptırımlar noktasında ayrılmıştır. Çünkü Anlaşma, devletlerin gaz emisyonunun azaltılmasına katkıda bulunmaması durumunda bir yaptırım sistemi içermemekte iken Mutabakat, 2050 yılına kadar Avrupa'da iklim nötrlüğüne ulaşma vaadini gerçekleştirmek için, 4 Mart 2020'de önerilen ve 30 Haziran 2021 tarihinde Avrupa Parlamentosu tarafından kabul edilen bir

¹⁸Devletler ve Diğer Devletlerin Vatandaşları Arasındaki Yatırım Anlaşmazlıklarının Çözümü Hakkında Sözleşme, 1987 < https://icsid.worldbank.org/sites/default/files/ICSID_Convention_EN.pdf > Erişim: 30.07.24.

¹⁹Viyana Andlaşmalar Hukuku Sözleşmesi, 1969.

²⁰Paris Sözleşmesi, 2015.

²¹Glasgow İklim Paktı, 2021 (COP26).

²²Dolzer/ Schreuer, Investment Law, s.18.

²³Tiryakioğlu, Bilgin: Doğrudan Yatırımların Uluslararası Hukukta Korunması, Ankara 2022, s. 59.

²⁴AB Konseyi'nin yayınladığı 2019-2024 dönemini kapsayan Stratejik Ajanda hakkında bkz. < <https://www.consilium.europa.eu/media/39914/a-new-strategic-agenda-2019-2024.pdf> > Erişim Tarihi: 22.02.2024.

²⁵Avrupa Konseyi'nin 20-21 Haziran 2019 tarihli oturuma ilişkin bilgi notu için bkz. < <https://www.consilium.europa.eu/en/meetings/european-council/2019/06/20-21/> > Erişim Tarihi: 22.02.2024.

²⁶Avrupa'nın iklim-nötr düzene geçişine yönelik siyasi taahhüdün hukuki açıdan bağlayıcı bir yükümlülüğe dönüştürülmesi amacıyla, 30 Haziran 2021 tarihinde Avrupa İklim Yasası kabul edilmiştir. Yasa kapsamında ayrıca, Avrupa Yeşil Mutabakatında da yer alan AB'nin 2030 yılına yönelik öngördüğü sera gazı emisyonlarında 1990'a kıyasla %40 azaltım sağlanması hedefi de "1990'a kıyasla en az %55 azaltım" olarak güncellenerek bağlayıcı hale getirilmiştir. Daha fazla bilgi için bkz. Türkiye Cumhuriyeti Avrupa Birliği Başkanlığı 27. Fasıl: Çevre ve İklim Değişikliği < <https://www.ab.gov.tr/p.php?e=92> > Erişim Tarihi: 22.02.2024.

“Avrupa İklim Yasası²⁷” niteliğindedir. Tüm bu gelişmelere istinaden, Enerji Şartı Anlaşması’da modernize edilmiştir. İlk olarak 1. maddenin 1. fıkrasında yer alan “Şart” tanımı ile ilgili olarak, 20 Mayıs 2015 tarihinde Lahey’de imzalanan Uluslararası Enerji Şartına atıf yapılmasına karar verilmiştir²⁸. “Enerji Sektöründe Ekonomik Faaliyetin Tanımı” başlığı ise, enerji sistemlerini karbondan arındırmak amacıyla karbondioksitin yakalanmasını, kullanılmasını ve depolanmasını kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu başlık altında gözden geçirilen hükümler artık, âkit tarafların temiz enerji hedefleri çerçevesinde, farklı enerji kaynaklarına yapılan yatırımlarının Enerji Şartı Anlaşması kapsamında nasıl korunacağını öngörmektedir²⁹.

Sonuç olarak, Enerji Şartı Sekreterliği tarafından açıklandığı üzere önerilen tüm değişiklikler³ arasından en çok dikkat çeken UNFCCC, Paris Anlaşması ve ILO temel sözleşmeleri gibi çok taraflı çevre ve iş hukukuna ilişkin anlaşmalar kapsamında âkit tarafların ilgili hak ve yükümlülüklerini yeniden teyit eden hükümlerin Antlaşmaya dâhil edilmesi olmuştur. Âkit taraflar, bu uyumlaştırma sürecini başlatarak iklim değişikliğiyle etkili bir şekilde mücadele etmenin acil gerekliliğini kabul edip sürdürülebilir kalkınma ve sorumlu iş uygulamaları hedeflerine katkıda bulunacak şekilde enerji sektöründe uluslararası ticareti ve yatırımı teşvik etme konusundaki kararlılıklarını ifade etmişler ve nihayetinde Antlaşmaya sürdürülebilir kalkınma, iklim değişikliği ve temiz enerjiye geçiş konularında yeni hükümler getirilmiştir³¹. Âkit taraflar, bu düzenlemelerle, temiz enerjiye geçiş, enerji ticareti ve yatırımında düşük karbonlu teknolojilerin teşvik edilmesi ve uygun olduğu durumlarda iklim değişikliği ile ilgili politikaların uygulanmasında iş birliği yapılmasını kabul etmişlerdir³².

TARTIŞMA

Tüm sera gazı salınımının üçte ikisinden sorumlu olan enerji sektörünün tartışmalarda en öne çıkan alan olacağı muhakkaktır. Birçok ülke, salınım hedeflerini tutturabilmek için sahip oldukları enerji karışımını

²⁷İklim nötrlüğü sağlamak için çerçeveyi belirleyen 30 Haziran 2021 tarihli 2021/1119 sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Tüzüğü ile kabul edilen Avrupa İklim Yasası için bkz. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119> > Erişim Tarihi: 02.02.2024. İlgili düzenleme, tüm AB politikalarının iklim nötrlüğüne ulaşmak adına emisyonları azaltmak, yeşil teknolojilere yatırım yapmak, AB ülkeleri için net sıfır sera gazı emisyonuna ulaşmak gibi hedeflere katkıda bulunmasını ve ekonominin ve toplumun tüm sektörlerinin üzerlerine düşen rolü oynamasını sağlamayı amaçlamaktadır.

²⁸Değişiklik sonrasında EŞA m.1/1: “Şart (Charter)”, 17 Aralık 1991 tarihinde Lahey’de imzalanan Avrupa Enerji Şartı’na ilişkin Lahey Konferansı’nın Sonuç Bildirgesinde kabul edilen Avrupa Enerji Şartını ifade etmektedir; Söz konusu Sonuç Bildirgesinin ve 20 Mayıs 2015 tarihinde Lahey’de imzalanan Uluslararası Enerji Şartına ilişkin Lahey II Konferansı Sonuç Belgesinde kabul edilen Uluslararası Enerji Şartı; Sonuç Belgesinin imzası Şartın imzası olarak kabul edilir.” şeklinde kaleme alınmıştır.

²⁹ Değişiklik sonrasında EŞA m.1/5: “Enerji Sektöründe Ekonomik Aktivite (Economic Activity in the Energy Sector)”, Annex N’da yer alanlar dışındaki Enerji Maddeleri ve Ürünlerinin arama, çıkarma, rafinaj, üretim, depolama, kara taşımacılığı, iletim, dağıtım, ticaret, pazarlama, veya satışına ya da enerji sistemini karbondan arındırmak amacıyla karbondioksitin yakalanması, kullanılması ve depolanmasına ya da çok katlı konut alanlarına ısı dağıtımına ilişkin ekonomik aktiviteleri ifade etmektedir.” şeklinde kaleme alınmıştır.

³⁰Prensip olarak Antlaşma’da yer alan ana değişiklikleri açıklayan Kamu Bildirimi için bkz. < <https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/CCDECS/2022/CCDEC202210.pdf> > Erişim Tarihi: 10.11.2023.

³¹Enerji Şartı Sekreterliği’nin 22 Haziran 2022 tarihinde yayımlanmış olduğu Enerji Şartı Konferansı Kararı, s.6.

³²Bu iş birliğine örnek olarak, değişiklik sonrasında EŞA m. 19/4: “Âkit Taraflar, kendi çevre ve çalışma yasalarını, Âkit Taraflar arasındaki enerji ticaretine veya yatırımına gizli bir kısıtlama oluşturacak veya diğer Âkit Taraflara karşı haksız veya keyfi bir ayrımcılık oluşturacak şekilde uygulamayacaktır.” şeklinde kaleme alınmıştır.

değiştirmek zorunda kalacak ve fosil yakıtların çıkarılmasını, taşınmasını ve yakılmasını sınırlayacaklardır. Glasgow İklim Paketi fosil yakıtlarının “kademeli olarak azaltılmasını” açıkça öngörmektedir. Bu azaltım şüphesiz buna dayanan yatırımlarının zaman içinde yok olmasını öngörmüş oluyor. Bu konuda yatırımların ömür süresini tamamlamalarına izin verilmediği için meşru beklentilerin zedelenmiş olmasına dayanan tazminat talepleri ortaya çıkmaktadır³³. Bu davalarda iklim hedefleriyle yatırımcının hakları arasında bir orantılılık bulunmadığı iddiaları sıklıkla ileri sürülmektedir. Çok yakın zamanda olan başka bazı gelişmeler de çevre ve iklim konularında, tahkim yargılamalarını etkileyebilme kapasitesine sahiptir. 29.03.2023 tarihinde Birleşmiş Milletler Genel Kurulu, Uluslararası Adalet Divanı’ndan devletlerin iklim yükümlülüklerine ilişkin bir tavsiye görüşü yayınlamasını talep etti³⁴. Adalet Divanı’nın görüşü, devletlerin yükümlülükleri bakımından uluslararası hakem kararlarını etkileyebilme potansiyeline sahiptir. Enerji Şartı Antlaşması bakımından, anlaşmanın modernize edilmiş versiyonunun kabul edilmesi halinde, Türkiye’nin ev sahibi ülke olduğu veya kaynak devlet olduğu bir senaryoda, yukarıda bahsedilen tanımlama farklılıkları hariç olmak üzere, yatırım uyuşmazlıklarının çözümü sisteminde büyük bir değişiklik olmayacaktır. Çünkü modernizasyonun uyuşmazlıkların çözümüne ilişkin getirmiş olduğu değişiklik, AB içi yatırımlar için tahkimi hariç tutan REIO maddesi ile yalnızca AB içi tahkimi kapsamaktadır. Türkiye’nin ev sahibi devlet veya kaynak devlet olduğu yatırım uyuşmazlıkları bakımından, böyle bir durum söz konusu değildir. Ayrıca, modernizasyon gerçekleşse bile yeni EŞA içerisinde, eski tip yatırım uyuşmazlıklarının çözümü halen devam etmektedir. Modernizasyon öncesindeki prosedür, Türkiye’nin ev sahibi devlet olduğu veya kaynak devlet olduğu yatırım uyuşmazlıkları için uygulanmaya devam edecektir. Antlaşmanın yeni versiyonu, geniş bir yatırım tanımı ve geniş maddi koruma hükümleri ile birlikte değerlendirildiğinde, bu durum devletleri iklim eylemleri için olağanüstü mali yükümlülüklerle maruz bırakmaktadır. Bu durumda, modernize edilmiş EŞA bağlamında, Türkiye’nin tarafı olacağı muhtemel yatırım uyuşmazlıklarında karşılaşacağı mali yük artabilecektir. Daha detaylı bir anlaşma dilinin kullanılması ya da yeni istisnaların ve düzenleme hakkı hükümlerinin yeni EŞA’ya dâhil edilmesinin, yatırım uyuşmazlıklarının çözümü sisteminin söz konusu mali riskini azaltmak bakımından yeterli olup olmayacağı doktrinde tartışmalıdır³⁵. Sürdürülebilir kalkınma, çevreyi koruma ödevi ve iklim değişikliği yatırım tahkimi yargılamasında gündeme geldiği kadar ticari tahkim yargılamasının da pek çok davada konusu olmuştur. Örneğin, *Islamic Republic of Pakistan v. Republic of India (Indus Waters Treaty)*³⁶ davasında Pakistan hükümeti, İndus nehri kıyısında kurulan hidroelektrik santraline ait projenin, anlaşma kapsamında yetkilendirildiği sınırdan daha fazla su tüketimi iddiası ile 2016 yılında Daimi Hakem Divanı Tahkim Kuralları

³³Detaylı bilgi için bkz. < <https://arbitrationblog.kluwerarbitration.com/2021/08/24/the-netherlands-coal-phase-out-and-the-resulting-rwe-and-uniper-icsid-arbitrations/> > Erişim tarihi: 20.03.2024.

³⁴< <https://sdg.uisd.org/news/unga-asks-icj-for-advisory-opinion-on-climate-obligations-of-states/> > erişim tarihi: 20.03.2024.

³⁵Client Earth: Arguments in favor of Energy Charter Treaty withdrawal, International Institute for Sustainable Development, Veblen Institute for Economic Reforms, 30 Eylül 2022, s. 2.

³⁶Proceedings under the Indus Waters Treaty (*Islamic Republic of Pakistan v. Republic of India*), PCA Case No. 2023-01: < <https://pca-cpa.org/en/cases/284/> > Erişim: 3.8.24.

(Permanent Court of Arbitration Rules) uyarınca tahkim yargılamasına başvurmuştur. Türkiye'ye karşı açılan güncel bir yatırım uyuşmazlığı olarak, *Alamos Gold Holdings Coöperatief U.A. and Alamos Gold Holdings B.V. v. Republic of Turkey*³⁷ davası mevcuttur. Bu davada saha aşımı nedeni ile çevreye verilen zarar uyuşmazlık konusu olmuştur. Dava adil ve hakkaniyete uygun muamele, minimum standartlar ilkelerine aykırılık nedeni ile açılmıştır. Bu açıdan açık ve örtülü devletleştirmeler bakımından çevresel, iklimsel zararlar ekonomik sürdürülebilirlik bakımından tartışılmaktadır. Ayrıca ekonomik sürdürülebilirlik incelenirken *Salini v. Morocco* davasının detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Yatırım hukukunda bu dava, *Salini* Kriterleri olarak bilinmektedir ve ekonomik sürdürülebilirliğin incelendiği ilk dava niteliğini taşımaktadır. Söz konusu kriterler yatırımın varlığı için dört unsurun bir araya gelmesini aramaktadır. Bunlar, yatırımın süreklilik arz etmesi, parasal katılım ve risk unsurlarının mevcut olması, yatırımcının önemli bir taahhüt altına girmesi, yatırımın ev sahibi devletin gelişimine katkı sağlamasıdır. Milletlerarası yatırım hukukunda da yatırım tahkimi yargılamasındaki tüm aktörleri için yabancı yatırımcı ile ev sahibi devletin hangi davranışının hukuka uygun, hangisinin hukuka aykırı olacağını belirlemede tereddüt doğmaması gerekir. Ne var ki diğer hukuk dallarında olduğu gibi, milletlerarası yatırım hukukunda da bunu temin etmek her zaman mümkün değildir. Literatürde; hakem heyetlerinin, görünürde çevresel tedbirlerden kaynaklanan bir kamulaştırma iddiasını değerlendirirken incelemelerini; risk saptamasının altında yatan bilimselliğin, bilimsel sorgulamanın minimum özelliklerine sahip olup olmadığı, yani meşru bilimsel yöntem ve usuller sonucunda riskin varlığının kanıtlanıp kanıtlanmadığı ve olumsuz çevresel etkilere karşı koyabilme potansiyeli olup olmadığı ile sınırlaması önerilmiştir³⁸. Örneğin İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne ekli Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması'nda âkit devletler karbon dioksit salınımının sınırlandırılması yükümlülüğü üstlenmiştir. Benzer şekilde Kükürt Dioksit Salınımının Azaltılmasına dair Helsinki Protokolü ile âkitler devletler kükürt dioksit salınımını belirli oranda azaltma yükümlülüğü üstlenmiştir. Bu durumda söz konusu milletlerarası yükümlülüğün ifası için devletler karbon dioksitin ya da kükürt dioksitin salınımını yasaklamasalar bile, azaltacak tedbirler alırlar. Bu durumda salınımına sebebiyet veren yatırımcılar için söz konusu tedbirler yatırım tahkiminde davaya konu edilebilir. Yatırım tahkimi yargılamasında esasen çevrenin korunmasının tartışılması, 1983 tarihli *Bering* Boğazında denizdeki ekosistemin bozulması ve fok balıklarının korunması konusundaki bir uyuşmazlığa dayanmaktadır (*Bering Sea Arbitration Case*, 1893). Söz konusu davada ilk kez tahkim yargılamasında ekosistemin korunması ve çevreyi koruma ödevi tartışılmıştır. Tahkim divanı, *Bering* Denizi Tahkim Kuralları (*Bering Sea Arbitration Rules*) uyarınca ABD'nin Alaska bölgesinde *Bering* Denizi'ndeki üç mil mesafedeki karasuları dışında kalan adalar ve diğer deniz alanları üzerinde bir hakları bulunup bulunmadığını değerlendirmiştir. Tahkim divanı bu değerlendirmeyi yaparken, deniz ekosisteminin, fok balıklarının korunması konusundaki devletin çevreyi koruma ödevi üzerinde durmuştur. Görüldüğü

³⁷*Alamos Gold Holdings Coöperatief U.A. and Alamos Gold Holdings B.V. v. Republic of Türkiye*. ICSID Case No. ARB/21/33 < <https://www.italaw.com/cases/9757> > Erişim: 3.8.24.

³⁸Kriebaum, Ursula: *International Investment Law and Sustainable Development* (August 15, 2022) Siobhan McInerney-Langford/Robert Mc Corquodale: *The Role of International Law in Development* < SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4298374> > Erişim: 2.8.24, s. 3.

üzere, çevresel ödevler milletlerarası tahkim yargılamasının tarihi olarak çok geçmişinde bile davalara konu olmuştur.

Milletlerarası çevre hukukunun deniz kirliliğinin önlenmesine ilişkin belgelerinin de yatırım anlaşmaları ile ihtilâfa girebilecekler arasında olduğu görülür. Deniz kirliliğine sebebiyet veren faktörlerden birçoğu yatırımlar ile doğrudan bağlantılıdır. Deniz taşıtlarının ve bu taşıt kazalarının sebebiyet verdiği deniz kirliliği bu konuda akla gelebilecek ilk örneklerden olmakla birlikte, gerçekte deniz kirliliğinin büyük bir kısmı (bir tahmine göre %44'ü) kara kaynaklı atıkların denize çeşitli yollarla bırakılmasından oluşmaktadır³⁹. Denizlere bırakılan, kara kaynaklı atıkların nitelik ya da niceliğine ilişkin düzenlemeler yatırımdan kaynaklı atıkların da regüle edilmesi anlamına gelebileceğinden ve dolayısıyla yatırıma ek iktisadî yük yükleyebileceğinden, söz konusu düzenlemelerin yatırım anlaşmasını ihlâl ettiği iddia edilebilir. Bu halde, ev sahibi devletin bağlı olduğu yatırımın korunmasına yönelik normlar ile deniz kirliliğinin önlenmesine yönelik normlar arasında bir çatışma olduğu söylenebilecektir. Bu açıdan sürdürülebilir kalkınmanın rolü, çevre ve insan haklarının korunması bakımından tamamlayıcı nitelikte olduğu sonucuna varılmaktadır.

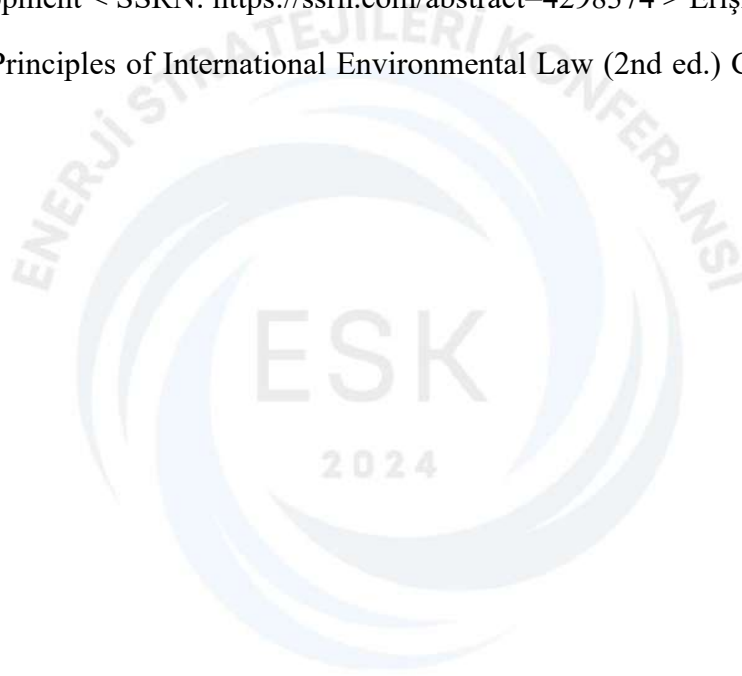
SONUÇ

Çalışma, yabancı yatırım uyumsuzluklarının tahkim yargılamasındaki incelemeler ve sürdürülebilirlik ile iklim değişikliği problemlerine karşı bir çözüm üretmeye yönelik reform olanaklarını tasarlamak, tahkim mekanizmalarının etkinliğini güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Devletler her ne kadar iklim ve çevre yükümlülükleri nedeniyle yasalar, yönetmelikler çıkarabilecek, idari uygulamalar yapabilecekse de bunlar yabancı yatırımcıların tazminat taleplerine konu olabilir. İyi niyetli bir regülasyonun, devletin egemenlik yetkisine dayanması nedeniyle bir yatırıma uğraması elbette kolay değildir. Ancak burada ayrımcılık gib. başka bir kuralın ihlal edilmesi durumu değiştirebilir. Örneğin başka bir yerli yatırımcının faydalanması için yapıldığı anlaşılan bir mevzuat değişikliğine, hakem heyetlerince pek iyi gözle bakılmayacaktır. Diğer yandan yasal çerçevenin değişmeyeceğine dair özel taahhütler verilmiş ve yatırım kararı bunun oluşturduğu güvene dayanılarak alınmış olabilir. Bu taahhüt spesifik bir yatırımcı özelinde gerçekleştirilmiş veya devlet yetkilileri tarafından yatırımcıları çekmek için sistematik olarak beyan edilmiş olabilir. Böyle spesifik taahhütlerin varlığı halinde, iyi niyetli mevzuat değişiklikleri nedeniyle de tazminat talepleri söz konusu olabilir. Yine iyi niyetli görünen bir değişiklik, orantısız bir şekilde uygulanmış ve bir yabancı yatırımcı özelinde çok ağır sonuçlar doğurmuş olabilir. Böyle bir durumda da devletler yasal çerçevenin değişmesinden sorumlu tutulabilir. İkili ve çok taraflı yatırım anlaşmalarının modernize edilmesi, insan hakları hukuku alanındaki gelişmeler ve yeni hakem heyeti kararları bu alanda daha farklı değişimlere yol açma potansiyeline sahiptir. Temiz, sağlıklı ve sürdürülebilir bir çevre hakkına verilen kıymet arttıkça bu konudaki pratiklerde de değişimler olması kaçınılmazdır.

³⁹Sands, P: Principles of International Environmental Law (2nd ed.) Cambridge University Press, s. 27.

KAYNAKLAR

- [1] Dolzer, Rudolf /Schreuer, Christopher; Principles of International Investment Law, 2018.
- [2] Rajamani, L./Werksman, J.: “The legal character and operational relevance of the Paris Agreement’s temperature goal”, Philosophical Transactions of the Royal Society, 2 Nisan 2018.
- [3] Tiryakioğlu, Bilgin: Doğrudan Yatırımların Uluslararası Hukukta Korunması, Ankara 2022.
- [4] Client Earth: Arguments in favor of Energy Charter Treaty withdrawal, International Institute for Sustainable Development, Veblen Institute for Economic Reforms, 30 Eylül 2022.
- [5] Kriebaum, Ursula: International Investment Law and Sustainable Development (August 15, 2022) Siobhan McInerney-Langford/Robert McCorquodale: The Role of International Law in Development < SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4298374> > Erişim: 2.8.24.
- [6] Sands, P: Principles of International Environmental Law (2nd ed.) Cambridge University Press.



95: Rüzgar Kuvveti ve Buz Yükünün Fazla Olduğu Spesifik Bölgelerde Fazlar Arası Aralayıcıların Pilot Uygulaması Ar- Ge Projesi

Sümeyye İleri

Meram Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi, Konya

Furkan Gültekin

Yonca Teknoloji Müh. ve Elek. Hiz. Ltd. Şti, Ankara

ÖZET

Bu bildiri ile Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) desteğiyle Temmuz 2020 Ar-Ge Proje başvuru döneminde, Meram Elektrik Dağıtım Şirketi tarafından başvurusunda bulunulan ve kabul edilen “Rüzgâr Kuvveti ve Buz Yükünün Fazla Olduğu Spesifik Bölgelerde Fazlar Arası Aralayıcıların Pilot Uygulaması” Ar-Ge projesi kapsamında geliştirilen, Fazlar Arası Aralayıcı çalışmalarının değerlendirilmesi anlatılmak istenmektedir.

Havai dağıtım hatları yalıtımsız açık iletken tasarımına sahip olmasından dolayı çevresel etkilere duyarlıdır. Rüzgâr kuvveti, fırtına, buz yükü veya herhangi bir mekanik etki nedeniyle yalıtımsız açık iletkenler, düzensiz bir şekilde hareket edebilmektedir. Bu hareketler sonucunda iletkenler birbirlerine temas eder ve faz-faz arızaları oluşur. Bu proje ile uzun zamanlı kesintilere sebep olan arızaların önüne geçilerek, ortalama kesinti süresinin iyileştirilmesini sağlamak amacıyla “Fazlar Arası Aralayıcı” geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr kuvveti, iletken teması, buz yükü, faz-faz kısa devre

ABSTRACT

This paper aims to describe the evaluation of the Interphase Spacers developed within the scope of the R&D project “Pilot Application of Interphase Spacers in Certain Regions with High Wind Force and Ice Load”, which was applied and accepted by Meram Electricity Distribution Company during the July 2020 R&D Project application period with the support of the Energy Market Regulatory Authority (EMRA).

Overhead distribution lines are susceptible to environmental impacts due to their uninsulated open conductor design. Due to wind force, storm, ice load or any mechanical effect, uninsulated open conductors can move erratically. As a result of these movements, conductors come into contact with each other and phase-to-phase faults occur. With this project, “Inter-Phase Spacer” has been developed to improve the average outage time by preventing faults that cause long-term outages.

Key words: Wind force, conductor contact, ice load, phase-phase short circuit

GİRİŞ

Enerji tedarik sürekliliğinde, geçmiş yıllara kıyasla belirli iyileşmeler gözlemlenmiş olsa da hala bazı olumsuzluklarla karşılaşabilmektedir. Elektrik dağıtım şirketleri, enerji tedarikinin sürekliliğini sağlamakta sorumlu olduğundan, tedarik süreçlerindeki olumsuzluklardan etkilenen kurumlardan biridir. Elektrik dağıtım şirketlerinin bu konuda karşılaştığı en önemli sorunlardan biri, iletken teması nedeniyle yaşanan faz-faz arızalardır. Havai hat iletkenleri; fırtına, rüzgâr kuvveti, buz yükü gibi mekanik etkilere maruz kalmasının yanı sıra özellikle kuşların göç güzergâhı üzerinde yer alan iletkenlerin üzerine konan kuş popülasyonu nedeniyle birbirine temas etmektedir. Bu mekanik etkiler iletken dolaşıklığı, salınım, zıplama ve kamçılama etkisi meydana getirerek faz-faz arızalarını oluşturmaktadır. Oluşan arızaların giderilmesi, arıza onarım bakım (AOB) ekiplerinin bölgeye ulaşması ve arızayı çözme sürecine bağlı olarak uzun süreleri bulabilmektedir.

EPDK, araştırma geliştirme faaliyetleri kapsamında enerji sektöründe teknolojik yenilikleri teşvik etmek, enerji verimliliğini artırmak, tedarik ve dağıtım süreçlerinde etkinliği artırmak amacıyla projeler desteklemektedir. Bu kapsamda Meram Elektrik Dağıtım Şirketi (Meram EDAŞ), 2020 yılında EPDK Ar-Ge komisyonuna sunduğu ve kabul aldığı “Rüzgâr Kuvveti ve Buz Yükünün Fazla Olduğu Bölgelerde Fazlar Arası Aralayıcıların Pilot Uygulaması” Ar-Ge projesi ile iletken teması nedeniyle oluşan faz-faz arızalarına çözüm getirme amacıyla başarılı çalışmalar yürütmüştür. Proje kapsamında geliştirilen fazlar arası aralayıcılar için pilot bölgeler belirlenerek montajı gerçekleştirilmiş ve gözlem sürecine tabi tutularak aralayıcıların hat üzerindeki davranışı ve arıza sayılarında yaşanan değişimlerin incelenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

YÖNTEM

2.1 Literatür Taraması

Yapılan çalışmalarda iletkenlerin maruz kaldığı mekanik etkilerin hesaplama yöntemleri, fazlar arası aralayıcıların sağlanması gereken ulusal ve uluslararası standartlar ve farklı ülkelerde kullanılan fazlar arası aralayıcılar incelenmiştir. Proje çalışmalarında kullanılan temel yönetmelik olarak 30.11.2000 tarihli 24246 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği” baz alınmıştır. Ulusal şartnameler incelendiğinde ise Türkiye’de elektrik iletim ve dağıtımından sorumlu yetkili kurumların (TEİAŞ ve TEDAŞ) fazlar arası aralayıcılar üzerine genel bir şartname yayınlamamış olduğu görülmüştür.

Enerji dağıtım havai hatları, ülkemiz genelinde farklı iklim şartları altında çalışmaktadır. Bu hatların projelendirilmesi sırasında elektriksel analizlerin yanı sıra, iklim şartlarının neden olduğu ek yüklerin de dikkate alınması gerekmektedir. İletkenlere gelen ek yükler aşağıdaki hesaplarda göz önüne alınır [1].

- Rüzgâr yükü
- Buz yükü
- Buz+ rüzgâr yükü

2.1.1 Rüzgâr Yükü

Rüzgâr, farklı basınçlarda bulunan iki ortam arasında havanın yer değiştirmesi olayıdır [2]. Genellikle tek yönlü, sabit hızlı ve tek biçimli olarak hesaplanırsa da gerçek hayatta çok yönlü, dinamik ve düzensiz rüzgârlar hayatımızı etkilemektedir [3]. Bu iki bakış açısı arasındaki farklılığı en güzel özetleyen örnek 1940 yılında yaşanan Tacoma Narrows Köprüsü olayıdır. Tacoma Narrows Köprüsü 1940 yılında ABD’de dünyanın en büyük üçüncü asma köprüsü olarak hizmete açılmış ve kullanıma açıldıktan dört ay sonra yıkılmıştır. Yıkılma sebebi bir mühendislik hatasıdır. Köprü inşa edilirken statik yani tek yönlü rüzgarlara maruz kalacağı düşünülerek hesaplamalar yapılmış ancak, dinamik rüzgarlar köprüyü rezonans frekansına sokmuş ve köprü yapımından kısa bir süre sonra yıkılmıştır.

Şekil 1. Tacoma Narrows Köprüsü



Kaynak: İTÜ Mühendisliğe Hazırlık Kulübü, 2020

Rüzgâr; tıpkı köprüler, kuleler ve yüksek binalar gibi havai hatları da titreşime sokarak salınım yapmasına neden olur. Bu salınımın boyutu ve etkileri doğru hesaplanıp gerekli önlemler alınmazsa hatların zarar görmesine hatta kopmasına neden olarak arızalara yol açabilmektedir. Ancak, rüzgâr kuvvetinin dinamik ve düzensiz oluşu bu kuvvetin etkilerinin hassas bir şekilde hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden, tasarım yapılırken uzun süreli geçmiş dönem meteorolojik verileri ışığında hazırlanan rüzgâr yükü haritalarından faydalanılması gerekir. Bu konuyla alakalı Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği’nde (EKAT) şartnamesi hesaplamaları kolaylaştırmak ve standardize etmek adına belli katsayılar belirleyerek bir formül çıkartmıştır.

Rüzgâr yükü EKAT yönetmeliğinde aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

Eşitlik 1. Rüzgâr yükü formülü

$$w = \frac{c * p * d}{1000} \text{ kg/m}$$

w : Rüzgâr yükü (kg/m)

c : Yönetmelikte tel çapına bağlı olarak tanımlanan dinamik rüzgâr basıncı katsayısı. “ c ” katsayısı Çizelge-1’e göre belirlenir.

p : Yönetmelikte arazi üzerindeki yüksekliğe göre tanımlanan teller için dinamik rüzgâr basıncı (kg/m²). İletkenlerin izolatör zincirlerine bağlı olduğu noktanın yerden yüksekliği 0 - 40m arasında olması halinde $p = 53$ kg/m² dinamik rüzgâr basıncı değeri kullanılacaktır.

d : Toplam tel çapı (mm)

Çizelge-1. Dinamik Rüzgâr Basıncı Katsayıları (c)

| No | Rüzgârın etkisinde bulunan öğeler | (c) katsayısı |
|----|--|---------------|
| 1 | Profil demirden yapılmış tek yüzlü kafesler | 1,6 |
| 2 | Profil demirden yapılmış kare/dikdörtgen direkler | 2,8 |
| 3 | Borudan yapılmış tek yüzlü kafesler | 1,2 |
| 4 | Borudan demirden yapılmış kare/dikdörtgen kesitli kafes direkler | 2,1 |
| 5 | Daire kesitli ağaç/çelik boru/betondan yapılmış direkler | 0,7 |
| 6 | Altıgen/sekizgen kesitli çelik boru ve beton direkler | 1,0 |
| 7 | Çapı 12,5mm’ye kadar olan iletkenler | 1,2 |
| 8 | Çapı 12,5 < d < 15,8mm olan iletkenlerde | 1,1 |
| 9 | Çapı 15,8mm’den büyük olan iletkenlerde | 1,0 |

Çizelge-2. Dinamik Rüzgâr Basıncı (p)

| Arazi üzerindeki yükseklik m | Dinamik rüzgâr basıncı kg/ m ² (Direkler, traversler ve izolatörler İletkenler) | |
|---------------------------------|--|-------|
| 0-15 | 55 | 44(*) |
| 15-40 | 70 | 53 |
| 40-100 | 90 | 68 |
| 100-150 | 115 | 86 |
| 150-200 | 125 | 95 |

(*) Uzun aralıklı hatlarda bu değer 53 kg/m² olarak alınacaktır.

2.1.2 Buz Yükü

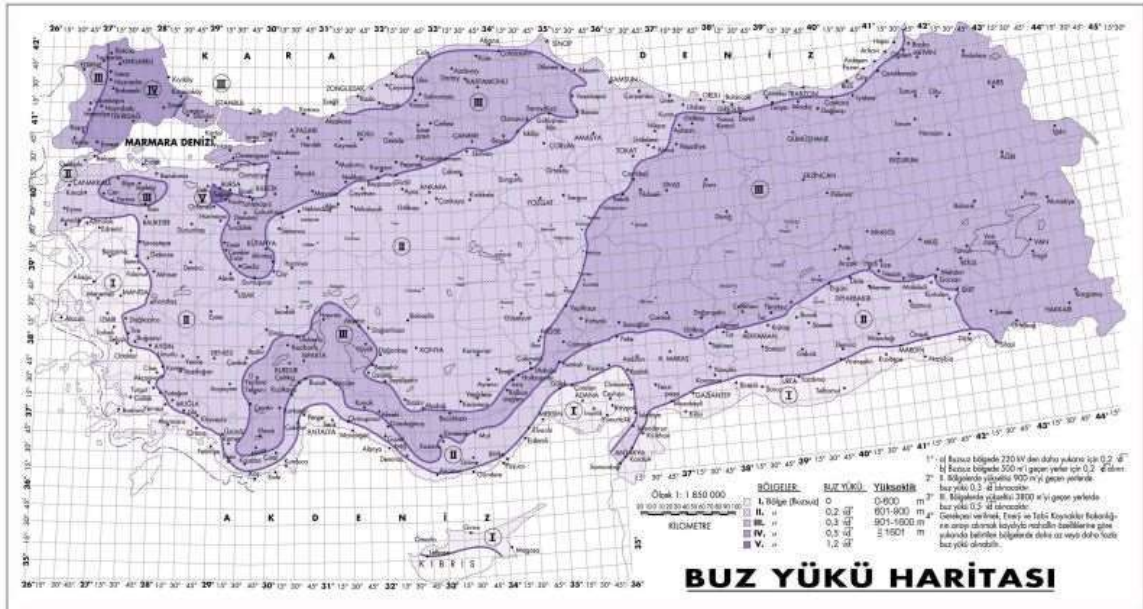
Mevsimsel şartlara bağlı olarak yağan kar, havai dağıtım hatları üzerine yapışarak bir yük oluşturmaktadır. Hava sıcaklığındaki değişimler, kırağı, kristal kırağı, don, kristal buz ve kar oluşumunu meydana getirmektedir. Bu doğa olayları iletkende kopma, korona oluşumu, eriyerek ayrılan buz kütlelerinin neden olduğu salınım olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğinin 46. Maddesi hava hatlarının mekanik hesaplarında göz önüne alınacak varsayımların kullanılacağı bölgeler ile bu bölgelere ilişkin buz yükleri ve en düşük, en yüksek ortam sıcaklıklarını Çizelge 3'teki gibi tanımlamıştır. Bu bölgeleri gösteren harita Şekil 2'de verilmiştir. Özel koşullar gereği, tabloda belirtilenlerden daha yüksek buz yükü olduğu bilinen veya beklenen yerlerde daha büyük katsayılar kullanılabilir. EKAT yönetmeliğinde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Eşitlik 2. EKAT Yönetmeliği'nde Yer Alan Buz Yükü q Formülü

$$q = k * \sqrt{d}$$

- q : Buz yükü (kg/m)
 d : Toplam tel çapı (mm)
 k : Yönetmelikte bölgelere göre tanımlanan katsayı

Şekil 2. TEDAŞ Buz Yükü Haritası



Çizelge-3. Buz yükü haritasına ve bölgelerin ortam sıcaklığına bağlı olarak buz yükü katsayıları (k)

| Bölge No. | Buz yükü katsayısı (k) | Buz yükü (kg/m) | Ortam sıcaklığı (°C) | |
|-----------|------------------------|-----------------|----------------------|-----------|
| | | | En düşük | En yüksek |
| 1 | 0 | 0 | -10 | 50 |
| 2 | 0,2 | 0,2Öd | -15 | 45 |
| 3 | 0,3 | 0,3Öd | -25 | 40 |
| 4 | 0,5 | 0,5Öd | -30 | 40 |
| 5 | 1,2 | 1,2Öd | -30 | 40 |

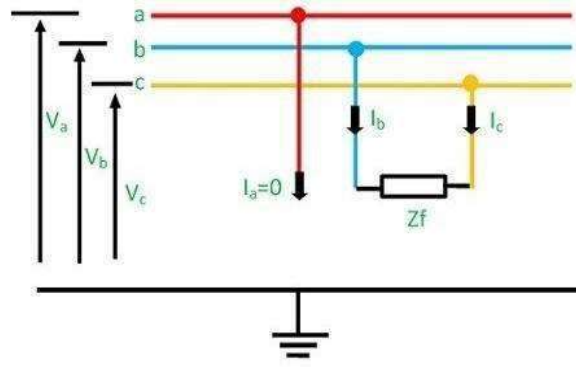
Hem buz hem de rüzgâr etkisinin beraber görüldüğü bölgelerde risk daha da artmaktadır. Kablonun kesit alanı daire şeklinde olduğundan rüzgârın salınım oluşturması için büyük bir kuvvet gerekir. Fakat üzerinde buz ya da kar olan kabloların şekilleri aerodinamik olarak rüzgâr kuvvetinin etkisinin artmasına neden olur.

Şekil 3. Buz ve Rüzgârın İletken Üzerine Bileşke Etkisi

2.1.3 Rüzgâr ve Buz Yükünden Kaynaklanan Faz-Faz Arızaları

Buz ya da rüzgâr yükünün olduğu durumlarda hat kablolarının yüksek salınımlara ulaşması sonucu fazlar birbirine temas edebilmektedir. Bu temas sonucunda, fazlardan en az birisi, üzerinden yüksek akım geçmesi sonucu aşırı ısınarak erir. Fazın kapasitesine bağlı olarak bu olay patlama ile de sonuçlanabilir.

Şekil 4. Faz-Faz Temasının Devre Gösterimi



2.1.4 Elektrik Atlaması

Rüzgâr veya buz yükü sonucu meydana gelen salınımlar fazları birbirlerine yaklaştırmaktadır. Bu yaklaşma temas haline gelmese dahi hattın gerilim değerine bağlı olarak atlamalar oluşabilir. Örneğin, havanın dielektrik direnci ortalama 30 kV/cm (hava şartlarına, şekle vb. parametrelere göre değişkenlik göstermektedir.) olarak alınırsa, 120 kV yük taşıyan iki fazın aralarındaki mesafe 4 cm'nin altına indiğinde elektrik atlaması sonucu arıza olacaktır.

Çizelge 4. Havanın ve Farklı Bileşimde Buzların Dielektrik Dayanımları

-12°C 'da dielektrik dayanımı -2°C 'da dielektrik dayanımı

| | -12°C 'da dielektrik dayanımı | -2°C 'da dielektrik dayanımı |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Hava | 130 kV/cm | 120 kV/cm |
| 30µS/cm sudan oluşan buz | 90 kV/cm | 70 kV/cm |
| 80µS/cm sudan oluşan buz | 80 kV/cm | 50 kV/cm |

Çizelge 4'de verilen deney sonuçlarına göre havanın dielektrik dayanımı buzdan daha yüksek olduğundan elektrik buz yüzeylerden daha kolay atlamakta ve fazlar arasında oluşabilecek atlama riskinin artırmaktadır. Buz yükü özellikle yüksek gerilim hatlarında uzun süreli ve masraflı tamirler gerektiren arızalara yol açmaktadır.

2.1.5 İletkenler Arası Mesafe

Malzeme, kesit, salgı ve anma gerilimleri aynı olan, aynı ya da farklı yatay yüzeylerde bulunan iletkenler arasındaki en küçük (D) uzaklığı aşağıdaki formüle göre hesaplanacaktır.

Eşitlik 3. İletkenler arasındaki en küçük (D) uzaklığı formülü

$$D = k \cdot (F_{max} + I)^{1/2} + (U/150)$$

Burada;

D: Direk üzerinde iletkenler arasındaki uzaklık (m)

k: Bir katsayı olup bu katsayı alçak gerilimde 0,35 yüksek gerilimde 0,50 alınacaktır.

Fmak: Hesaplanan direğin en büyük açıklığına ilişkin en büyük salgı (m)

I: Taşıyıcı zincir izolatörün uzunluğu (m) (Mesnet izolatöründe $l=0$ alınacaktır.)

U: Hattın fazlar arası anma gerilimi (kV)

2.1.6 Ulusal ve Uluslar Arası Standartlar ve Pazar Araştırması

Uluslararası dağıtım ve iletim hatlarında aralayıcılar faz içinde çok yaygın, fazlar arasında ise yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise daha çok faz içi uygulamalar görülmektedir. Uluslararası üreticilerin fazlar arası aralayıcılar için kullandığı standartlar, fiziki ve işlevi bakımından benzerlik göstermesinden ötürü askı izolatörler ile aynıdır.

Çizelge-5. Fazlar Arası Aralayıcılar İçin Kullanılan Ulusal ve Uluslararası Standartlar

| Ulusal /Uluslararası Standart Adı | Standart Başlığı |
|-----------------------------------|---|
| TS EN IEC 61854 | Overhead lines - Requirements and tests for spacers (Hava hatları - Aralayıcılar için özellikler ve deneyler) |
| TS EN 61109 | Insulators for overhead lines - Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria (İzolatörler - Havai hatlar için - Anma gerilimi 1000 v'tan büyük a.a. sistemler için kompozit askı ve gergi izolatörleri - Tarifler, deney metotları ve kabul kriterleri) |
| TS EN 62217 | Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use - General definitions, test methods and acceptance criteria (Bina içi ve bina dışında kullanılması amaçlanan polimer esaslı YG izolatörler – Genel tarifler, deney yöntemleri ve kabul kriterleri) |
| IEC 61854 | Overhead lines – Requirements and tests for spacers |

| | |
|-----------------------|--|
| IEC 61109:2008 | Insulators for overhead lines - Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria |
| ANSI/NEMA C29.13-2018 | American National Standard For Composite Insulators Distribution Deadend Type |
| ANSI/NEMA C29.12-2020 | American National Standard for Composite Insulators -- Transmission Suspension Type |
| CSA C411.5-16 | Dead-end/suspension composite insulators for overhead lines ≤ 75 kV |
| CSA C411.4-16 | Composite suspension insulators for overhead lines > 75 kV |

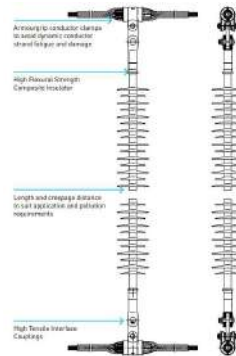
2.1.7 Dünya Çapında Kullanılan Fazlar Arası Aralayıcıların Özellikleri

Fazlar Arası Aralayıcıların Elektriksel Özellikleri

Uluslararası pazarda, elektriksel olarak 15kV ile 1200kV arası izolasyon sağlayan fazlar arası aralayıcılar mevcuttur. Bu değerler atlamaya karşı en yüksek izolasyon değerleridir. Bileşenleri arasında iletken malzemeler olsa da bu ürünlerin en önemli özelliği, elektriği uçtan uca iletmemeleridir. Faz-faz atlamalarını engellemek amacıyla boyutları değişmektedir. Bunun yanında, yüzeyden atlamaları engellemek için yüzeyleri boğumlu yapıdadır.

Dünya genelinde küresel ve yerel birçok fazlar arası aralayıcı üreticisi ve tedarikçisi mevcuttur. Yerel üreticiler buldukları ülkelerin altyapı durumu, mevzuat ve coğrafi koşullara uygun ürünler geliştirmektedir. Yurtdışında kullanılan fazlar arası aralayıcı tipleri araştırılarak bazı örnekler şu şekildedir.

Şekil 5. Avusturya menşeli firma tarafından üretilen fazlar arası aralayıcı



Şekil 6. ABD menşeli firma tarafından üretilen fazlar arası aralayıcı



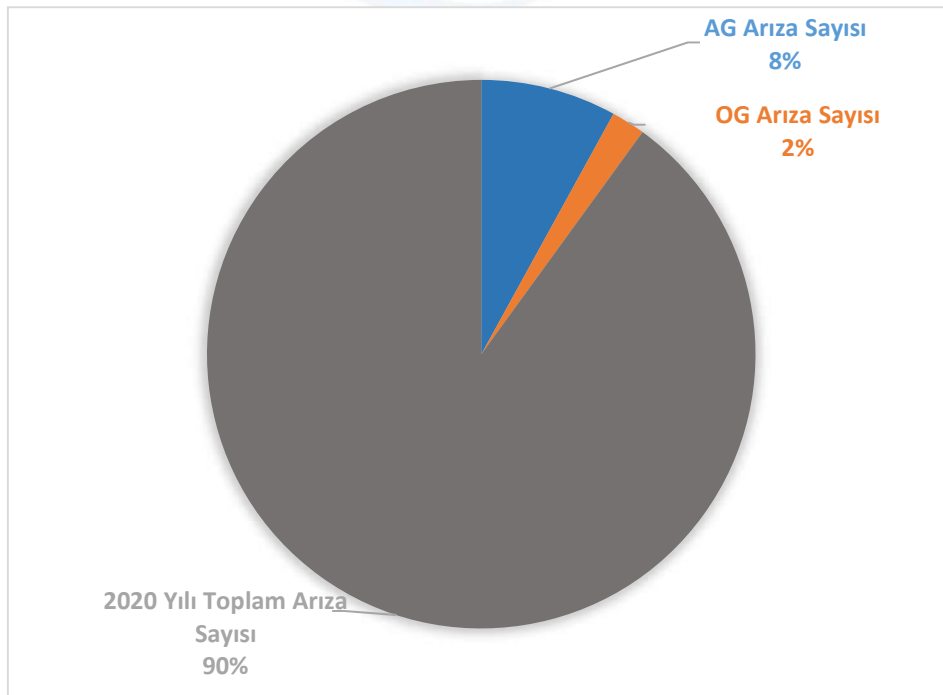
Şekil 7. Çin menşeli firma tarafından üretilen fazlar arası aralayıcı



2.2 Kriterlerin Belirlenmesi

Meram Elektrik Dağıtım A.Ş. verilerine göre 2020 yılı AG ve OG arızaları ve arıza nedenleri incelendiğinde toplam 53.943 arızanın 4.679 tanesi rüzgâr, buz yükü ve fırtına nedeniyle faz-faz arızaları olarak kaydedilmiştir. 2020 yılına ait toplam arıza oranları ve faz-faz arızaların oranları Grafik 1’de gösterilmektedir.

Grafik 1:2020 Yılına ait arıza oranları

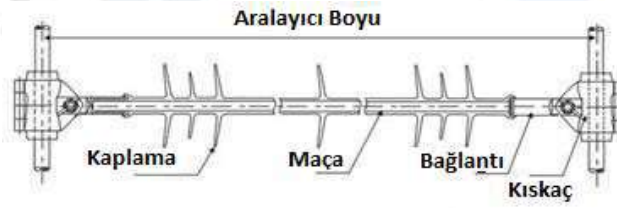


2.3 Fazlar Arası Aralayıcıların Tasarlanması

Aralayıcının yapması gereken iş temelde fazların birbirine yaklaşmasını önlemek olduğundan en basit hali iki faz arasında uzanan çubuk olarak görülmüştür. Fazların sayısı, değişikçe kol sayısı değişmektedir. Çevresel koşullara göre esnemeyen bir malzeme veya tamamen yaylı bir yapıya sahip olabilir. Aralayıcının en önemli özelliklerinden birisi bağlı olduğu fazlar arasında elektrik akımını iletmemesidir. Mekanik yüklere karşı dayanıklı ve de elektrik akımını iletmemesi özelliklerini yapıda, düşük maliyet ve yüksek performansla sağlayabilmek için iki farklı malzemenin bir arada kullanılması genel olarak kabul edilen üretim yöntemidir. Yani yalıtkanlığı plastik malzemelerden, mekanik dayanımı da metallere ya da kompozit malzemelerden sağlamak ürün performansını maksimum seviyeye çıkarmaktadır. Ürün farklı malzemelerden oluştuğu için kompozit olarak adlandırılır.

2.3.1 Fazlar Arası Aralayıcıların Tasarım ve Montaj Parametreleri

İstisnaları olsa da aralayıcıların yapısı genelde aşağıdaki gibidir:



Şekil 8. Fazlar arası aralayıcı yapısı

Maça çubuğu (core rod):

- Aralayıcının esnemesini engelleyen ve mekanik dayanımı sağlayan iskeletidir.
- Sert ve yalıtkan olması gerekir.
- Aralayıcı uzunluğunu belirleyen yapıdır.

Kısaç (clamps):

- Aralayıcıların fazlara bağlanmasını sağlayan yapıdır.
- Farklı yönlerden gelecek yüklere karşı fazı sıkıca tutmalıdır.

Bağlantı parçası (fittings) :

- Maça çubuğu ile kısaçların bağlantısını sağlayan yapıdır.
- Maça çubuğuyla kısaçlar arasında arayüz oluşturur.

Kaplama (housing):

- Elektrik atlamalarına karşı yüzey alanını arttırmak için oluşturulan esnek iletken olmayan dış yapıdır.

- Dışarıdan gelebilecek darbelerin sönümlenmesi ve aralayıcıya zarar vermesini önler

Örnek bir çalışmadan elde edilen sonuçlara göre;

- 220 kV gerilimli havai hatlar için; 3 fazlı (her iletken bir faz olarak ABC fazları olarak adlandırılmıştır) ve direkler arasındaki mesafe (L) $< 300\text{m}$ ise AB fazı arasına direkler arası mesafenin ortasına, B fazları arasına diğerine 5 metre mesafede (S) ikinci aralayıcı kullanıldığında risk oluşmamaktadır. Direkler arası mesafenin $300\text{m} < L < 387\text{m}$ olması durumunda riski ortadan kaldırmak için ($L/3$) konumlarında ve bunlara 5 metre mesafeli (S) birer tane olmak üzere toplam dört adet aralayıcı kullanılması gerekmektedir.
- Aralayıcılar yokken azami zıplama genliği 6 metre iken aralayıcılar kullanıldıktan sonra zıplamaların genliği büyük ölçüde azaltılmış, fazdan faza havadan atlama tamamen engellenmiştir.
- Kullanılan fazlar arası aralayıcının çapı 30mm boyu 6m ve kritik sıkıştırma yükü 600 N'un üzerindedir. Aralayıcılara uygulanan çekme kuvveti 8000N geçmemiştir [4].

2.3.2 Fazlar Arası Aralayıcı Üretiminde Kullanılan Malzemeler

- Maça çubuğunun, sert iletken olmayan malzemelerden oluşması gerektiği için yapımında epoksi reçine veya cam elyaf kullanılmaktadır.
- Kısaç, iletkeni sıkıca kavrayabilmesi için metal ya da sert plastik malzemelerden yapılır.
- Bağlantı parçasının asıl görevi arayüz oluşturmak olduğundan kolay işlenebilen, epoksi/metal bağlantısının sorunsuz yapılabileceği bir malzemelerden yapılmalıdır.
- Kaplama darbe sönümleyici olarak kullanılacağı için dış ortam şartlarına dayanıklı, yumuşak malzemeler tercih edilebilir. Malzeme olarak kolay dökülebilen silikon, LDPE (Low Density Polyethylene), TPE (termoplastik elastomer) gibi plastikler kullanılmaktadır.

2.3.3 Epoksi Reçine ya da Cam Elyaf

- Fazlar arası aralayıcıların omurgasını oluşturan maça çubuğu izolasyon ve mukavemet gereksinimlerini karşılayabilen, üretimi kolay ve dış ortam şartlarına dayanıklı epoksi reçine/cam elyaf gibi kompozit malzemelerden oluşturmaktadır. Bu katman aralayıcıların esnememesini ve uygulanacak çekme ya da sıkıştırma yüklerine karşı dayanımı sağlar [5]. Epoksi reçine genelde iki bileşenlidir. Bu bileşenler karıştırılıp tepkimeye sokularak istenilen özelliklere sahip son ürün elde edilir. Özelliklerini geliştirmek için içine farklı dolgu malzemeleri eklenebilir.

- Cam elyaf (fiberglas), eriyik haldeki camın küçük deliklerden akıtılıp katılaştırılmasıyla elde edilir. Kompozit yapıda dayanıklılığı cam elyaf sağlarken birbirine tutunmayı reçine sağlamaktadır.

Şekil 9. Reçine Dolgulu Cam Elyafın Fiziksel Görünümü



Çizelge-6. Cam Elyafın Mekanik ve Elektriksel Özellikleri

| | Değer | Birim |
|--------------------|-------------|-------|
| Çekme Direnci | 48-125 | MPa |
| Sıkıştırma Direnci | 185-282 | MPa |
| Yüzey Direnci | 2E+10-2E+13 | ohm |
| Dielektrik Direnci | 9-32 | kV/mm |

2.3.4 Metal\Sert Plastik Kıskaç ve Bağlantı Parçaları

İletkene tutunmayı sağlayan kıskaç ve bu bölüm ile maça çubuğu birbirine bağlayan bağlantı parçaları genelde metal/sert plastik malzemelerinden yapılmaktadır. Maça çubuğun elektrik iletkenliği olmadığından bu parçaların elektrik özelliklerine bakılmasına gerek yoktur. Bu parçalarda önemli olan kopmaların, çatlamların minimum düzeyde olmasıdır. Bu yüzden mukavemeti yüksek malzemeler kullanılır. Metal parçalar için az mukavemet gerektiren yerlerde bronz ve/veya yumuşak alüminyum serileri, yüksek mukavemet gerektiren durumlarda çelik çeşitleri kullanılabilir. Sert plastikler işlenmesi ve tedariki kolay olduğundan en çok HDPE (Yüksek yoğunluklu polietilen), poliamid ve delrin gibi malzemelerdir.

2.3.5 Sönümleyici Kaplama Malzemeleri

Özellikle kırılğan yapısı nedeniyle maçanın üzerine yumuşak bir malzemedan oluşan bir kaplama uygulanır. Bu kaplamanın amacı kırılğan olan maçaya gelebilecek darbelerin sönümlenmesidir. Malzemesi genellikle silikondur. Ancak, LDPE (düşük yoğunluklu polietilen) ve termoplastik kauçuklar da kullanılmaktadır. Bu malzemelerin fiyatları düşük olmakla birlikte enjeksiyon kalıplamayla şekillendirildiği için üretimleri kolaydır. Bu kaplama ayrıca yüzey atlamalarını minimize etmek amacıyla boğumlu şekilde tasarlanarak yüzey yolu uzatılmıştır.

2.4 Fazlar Arası Aralayıcı Kurulum Konfigürasyonları

2.4.1 Düşey Konfigürasyon

Fazlar arası mesafelerin kısa olduğu düşük iletken yüksekliklerine sahip hatlarda hat zıplamalarını kontrol etmek için düşey konfigürasyonda sert aralayıcılar monte edilir. Bu konfigürasyon özellikle, buz yükü nedeniyle düşey doğrultulu zıplamaları kontrol etmek için daha uygundur.

Şekil 10. Düşey Konfigürasyon



2.4.2 Yatay Konfigürasyon

Fazlar arası aralayıcıların yere paralel olarak monte edildiği konfigürasyondur. Rüzgâr yükü nedeniyle oluşan uyanık titreşimlere karşı etkilidir. Diğer konfigürasyonlara göre daha az sönümleme yapmasına karşın, genelde daha uzun ömürlüdür.

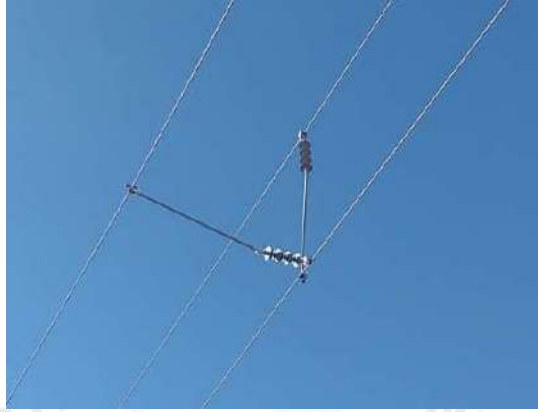
Şekil 11. Yatay Konfigürasyon



2.4.3 Yatay-Dikey Konfigürasyon

Yatay ve dikey konfigürasyonların birleşiminden oluşmaktadır. Her iki konfigürasyonun özelliklerini de taşımaktadır.

Şekil 12. Yatay-Düşey Konfigürasyon



2.4.4 Ofset (Çapraz) Konfigürasyon

Ofset konfigürasyon çapraz bağlama olarak da tanımlanabilir. Rakımı yüksek ve uzun açıklıkları bulunan hatlar için daha uygundur. Hem dikey hem de yatay doğrultuda dayanım sağladığı için aralayıcılar arasındaki boşluğun uzun tutulmasına imkân verir. Yüksek voltaj yüklü hatlarda kullanıldığı için boyları genelde uzundur.

Şekil 13. Ofset Konfigürasyon



2.5 Fazlar Arası Aralayıcının Geliştirilmesi

2.5.1 Teknik Özellikler

Ar-Ge projesi kapsamında geliştirilen Fazlar Arası Aralayıcı özellikleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge-7. Geliştirilen fazlar arası aralayıcının teknik özellikleri

| Özellik | Değerler | |
|-------------------------------|----------------|-------|
| Uzunluk | 1.2 m | 2 m |
| Ağırlık | ~4.8 kg | ~5 kg |
| İç Malzeme | Cam elyaf | |
| İç Malzeme Çekme Direnci | 48-124 MPa | |
| İç Malzeme Sıkıştırma Direnci | 185-282 MPa | |
| İç Malzeme Dielektrik Direnci | 9-32 MPa | |
| Dış Malzeme | Silikon kauçuk | |
| Kıskaç Tasarımı | Mengene Tip | |

2.5.2 Montaj ve Faydalar

Fazlar Arası Aralayıcı, OGHat üzerindeiki iletken arasına sepetli araç, ıskanta(hotstick), helikopter çalışma platformu yada hat arası kullanılarak montaj edilmektedir. Direkler arası mesafeye göre 1 veya 2 noktada montaj edilebilir. Yapısında bulunan mengene tip kıskaç, iletken üzerine geçirilerek vidası ile sıkıştırılır. Bu işlem her iki iletken üzerinde uygulanır. Fazlar Arası Aralayıcı uygulamasıyla fazlar arası mesafenin korunması sağlanmaktadır. Bu sayede iletkenlerin birbirine teması engellenmiş olur.

Şekil 14. Geliştirilen Fazlar Arası Aralayıcı**Şekil 15.** Geliştirilen Fazlar Arası Aralayıcıya ait kıskaç tasarımı

2.6 Pilot Uygulama Çalışmaları

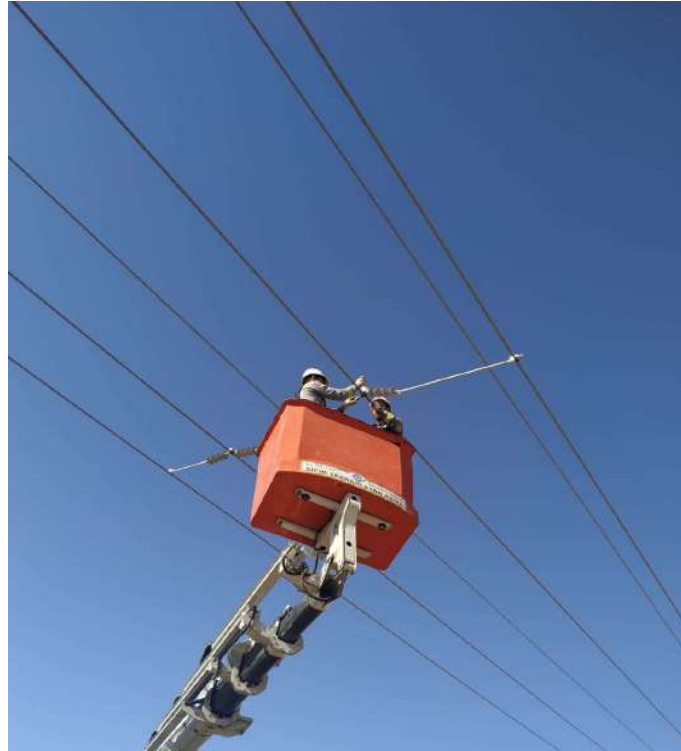
Proje kapsamında 70 adet fazlar arası aralayıcı geliştirilmiştir. Üretimi yapılan aralayıcılar Meram EDAŞ sorumluluk bölgelerinde rüzgâr kuvveti ve buz yükünün fazla olduğu ve iletken teması kaynaklı

faz-faz arızaların yaşandığı bölge verileri ile belirlenmiştir. Belirlenen bölgeler rüzgâr kuvvetinin yoğun hissedildiği kırsal ve düzlük bölgelerdir. Bu koşullar altında belirlenen bölgeler aşağıdaki gibidir.

Çizelge-8. Belirlenen Pilot Bölgeler ve Abone Sayıları

| Pilot Uygulama Bölgesi | Fider Adı | Abone Sayısı |
|------------------------|---|--------------|
| Aksaray- Eskil | Bilezikli KÖK- Oklava Fideri | 518 |
| Konya- Selçuklu-2 | DM-79 Tömek Eğribayat DM A ve B Barası | 1237 |
| Niğde- Niğde-1 | Çardacık KÖK- Yelatan Beyaz Kışlakçı Fideri | 1417 |
| Niğde- Niğde-2 | Misliova TM F-3 Alay Fideri | 5286 |
| Konya- Karatay-2 | Suruç Yeşilhat F-16 Fideri | 128 |
| Konya- Karatay-2 | Obruk Fideri | 597 |
| Konya- Seydişehir | Bozkır-2 Fideri | 21234 |

Şekil 16. Konya ili Selçuklu-2 DM-79 Tömek Eğribayat DM A ve B Barası Fazlar Arası Aralayıcı Pilot Uygulaması



Şekil 17. Konya ili Selçuklu-2 DM-79 Tömek Eğribayat DM A ve B Barası Fazlar Arası Aralayıcı Pilot Uygulaması



Şekil 18. Niğde ili Mislioiva TM F-3 Alay Fideri fazlar arası aralayıcı pilot uygulaması



BULGULAR

Uygulama yapılan bölgelere ilişkin iletken teması kaynaklı faz-faz arıza verileri aşağıda yer almaktadır.

Çizelge-9. Fazlar Arası Aralayıcı Uygulaması Öncesi Pilot Bölge Verileri

| Fazlar Arası Aralayıcı Uygulaması Yapılan Bölgeler | | | Fazlar Arası Aralayıcı Uygulaması Öncesi Faz-Faz Arıza Verileri | | | | |
|--|---|------------------------|---|------|------|--------|--------|
| Bölge Adı | Fider Çıkışı | Etkilenen Abone Sayısı | 2020 | 2021 | 2022 | SAIDI | SAIFI |
| Eskil | Bilezikli KÖK- Oklava Fideri | 5071 | 13 | 5 | 15 | 0,0059 | 0,0009 |
| Selçuklu-2 | DM-79 Tömek Eğribayat DM A ve B Barası | 36456 | 17 | 24 | 42 | 0,0025 | 0,0001 |
| Niğde-1 | Çardacık KÖK- Yelatan Beyaz Kışlakçı Fideri | 6111 | 2 | 2 | 2 | 0,0927 | 0,0005 |
| Niğde-2 | Mislioiva TM F-3 Alay Fideri Çıkışı | 8664 | 9 | 12 | 4 | 0,0125 | 0,0001 |
| Karatay-2 | Suruç Yeşilhat F16 Fideri | 55486 | 2 | 6 | 3 | 0,0025 | 0,0000 |
| Karatay-2 | Obruk Fideri | 48972 | 7 | 14 | 58 | 0,0173 | 0,0002 |
| Seydişehir | Bozkır-2 Fideri | 23776 | 4 | 4 | 5 | 0,0814 | 0,0011 |

Çizelge-10. Fazlar Arası Aralayıcı Uygulaması Sonrası Pilot Bölge Verileri

| Fazlar Arası Aralayıcı Uygulaması Yapılan Bölgeler | | | Fazlar Arası Aralayıcı Uygulaması Sonrası Faz-Faz Arıza Verileri | | |
|--|---|------------------------|--|-------|-------|
| Bölge Adı | Fider Çıkışı | Etkilenen Abone Sayısı | 2022 Ağustos-2024 Mart | SAIDI | SAIFI |
| Eskil | Bilezikli KÖK- Oklava Fideri | 5071 | 0 | 0 | 0 |
| Selçuklu-2 | DM-79 Tömek Eğribayat DM A ve B Barası | 36456 | 0 | 0 | 0 |
| Niğde-1 | Çardacık KÖK- Yelatan Beyaz Kışlakçı Fideri | 6111 | 0 | 0 | 0 |
| Niğde-2 | Mislioiva TM F-3 Alay Fideri Çıkışı | 8664 | 0 | 0 | 0 |
| Karatay-2 | Suruç Yeşilhat F16 Fideri | 55486 | 0 | 0 | 0 |
| Karatay-2 | Obruk Fideri | 48972 | 0 | 0 | 0 |
| Seydişehir | Bozkır-2 Fideri | 23776 | 0 | 0 | 0 |

TARTIŞMA VE SONUÇ

İlk çalışmanın yapıldığı tarih olan 2022 yılı Ağustos ayından 2024 yılı Mart ayına kadar ki süreç içerisinde pilot uygulama bölgeleri gözlemlenmiştir. Gözlem süreci içerisinde fazlar arası aralayıcıların iletken üzerindeki davranışı takip edilmiştir. Dört mevsimin de yaşandığı pilot bölgelerde aralayıcılarda ya da iletkenlerde kopma durumu gözlemlenmemiştir. Süreç içerisinde pilot bölge sorumluları ile belirli periyotlarla kontrol çalışması yürütülmüş ve herhangi bir olumsuzlukla karşılaşılmamıştır. Gözlemler ve veriler ışığında uygulama yapılan bölgelerde iletken teması kaynaklı faz-faz arızalarının yaşanmadığı tespit edilmiştir. Proje çalışması sonuçları göstermiştir ki, rüzgâr ve buz yükü gibi mekanik etkilerin neden olduğu iletken teması arızaları fazlar arası aralayıcılar kullanarak engellenebilmektedir. .Günlük yaşam içerisinde enerjiye her alanda ihtiyaç duyulması, kesinti sürelerinin minimum seviyede tutulması gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen araştırma geliştirme faaliyetleri ile birlikte iletken teması kaynaklı arızalarda iyileşmelerin sağlanacağı ön görülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Panth, D. (2014). Reasons For Failure Of Transmission Lines And Their. India.
- [2] Lilien, J.-I. (1998). Overhead electrical transmission line galloping: A full multi-Span 3-DOF model, some applications and design recommendations. IEEE Transactions on Power Delivery , 909-915. [3] Carvalho, H., Queiroz, G., & Fakury, R. H. (2016). Experimental Evaluation of the Wind Effect on an Operation Power Transmissin Tower. Mechanic and Energy, 331.
- [4] Wang, L., Yin, Y., Liang, X., & Guan, Z. (2001). Study on Air Insulator Strength under Conductor Galloping Condition by Phase to Phase Spacer . Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena , 617-619.
- [5] Adroja, P., Koradiya, S., Patel, J., & Parsania, P. (2013). Mechanical and Electrical Properties of Glass and Jute–Epoxy/Epoxy Polyurethane Composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 937.



100: Çevreye Duyarlı Bir Teknoloji Olarak Doğal Estere Dayalı Düşük Hacimli Transformatör Geliştirilmesi

N. Mert Koçanalı, Ramazan Altay, İrem Hazar, Mahmut Aksoy
BEST Transformer A.Ş.

Nihan Segah Cakar, Umur Deveci, Seyit Cem Yılmaz
Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş.

Gürol Ecer
SFA Electric

Kemal Tezcan
AFB Enerji

ÖZET

Bu makalede, ester yağ kullanılan pad-mounted transformatörlerin soğutma performansını optimize etmek amacıyla yapılan tasarım çalışmalarından ve bu tasarımların sonuçlarından bahsedilmektedir. Yapılan CFD simülasyonları sonucunda, özel olarak tasarlanan kabin ve hava akış sisteminin soğutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiş, bu sayede yaygın kullanılan muadillerine kıyasla daha küçük boyutlu ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir transformatör geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Pad-mounted transformatör, ester yağ, soğutma performansı, CFD simülasyonu, boyut optimizasyonu.

ABSTRACT

This article discusses the design efforts to optimize the cooling performance of pad-mounted transformers using ester oils, as well as the results of these designs. CFD simulations were conducted to examine the impact of a specially designed cabinet and airflow system on cooling performance. As a result, a transformer that is smaller in size and more environmentally sustainable compared to commonly used alternatives has been developed.

Keywords: Pad-mounted transformer, ester oil, cooling performance, CFD simulation, size optimization.

GİRİŞ

Transformatörler bir elektrik sisteminin en pahalı ve kritik bileşenlerinden biridir. Yüksek verimli makineler olmalarına rağmen, aktarılan gücün küçük bir kısmı ısı şeklinde kaybolur (genellikle sargılarda), bu da ortadan kaldırılması gereken bir sorundur. Isı taşıyıcı dielektrik sıvı, genellikle bir mineral yağı, üretilen ısıyı uzaklaştırmak ve aynı zamanda elektriksel izolasyon sağlamak için kullanılır. Bu sıvı, sargıların etrafında ve içinden dolaşarak onları soğutur ve böylece transformatörün ömrünü olumsuz etkileyen sıcak noktaların oluşumunu önler. Bu soğutma kanallarının boyutları, dielektrik sıvının özelliklerine, yapısal ve elektriksel gereksinimlere bağlıdır, [1].

Transformatörlerin termal modellemesi için en yaygın tekniklerden biri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)'dir. CFD'de, hem akışkan akışı hem de ısı transferinin yöneten ilkeleri, daha sonra cebirsel denklemlerle değiştirilip zaman ve mekân boyunca ayrı elemanlarda çözülen kısmi diferansiyel denklemler biçiminde yazılır.

Son yirmi yılda, birçok yazar CFD tekniğini güç transformatörlerinin sargılarının termal performansını araştırmak ve iyileştirmek için önemli bir araç olarak bildirmiştir. İlk on yılda, CFD'nin ana amacı mineral yağ içinde batırılmış 2-D sargıların hız ve sıcaklık profillerini belirlemektir, [2–7]. Daha yakın zamanda, hesaplama kaynaklarındaki gelişmeler, üç boyutlu (3-D) modellerin kullanılmasını sağlayarak, 2-D modellerde bulmak imkânsız olan üç boyutlu fenomenleri yakalamayı mümkün kılmıştır, [8–12]. Bu çalışmalar, sıvı ve katıların modellemesini yaparak, sıvı-katı arayüzü bağlantısı için Konjüge Isı Transferi (CHT) modelini kullanmaktadır.

Daha yeni çalışmalar, ester bazlı yağlarla yalıtım sistemlerinin (yağ ve kağıt) termal-hidrolik performansını daha iyi anlamak ve karakterize etmek için hem 2-D hem de 3-D modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir, [13, 14], ayrıca çeşitli alternatif sıvıların soğutma verimliliğini değerlendirmek amacıyla da, [15–18].

Sıcak nokta sıcaklığı, transformatör yalıtımının yaşlanması ile doğrudan ilişkilidir. Bu konuda yapılan çalışmalar, doğal esterin yalıtım kağıdının yaşlanma hızını azalttığını belirlemiştir. Bu çalışmaları yürütmek için hızlandırılmış yaşlanma testleri yapılmış ve hem mineral yağ hem de doğal esterde batırıldığında polimerleşme derecesi ve gerilme mukavemeti test edilmiştir, [14], [19]

Estere batırılmış dielektrik kağıdının daha düşük yaşlanma oranı, bu sıvıların mineral yağa kıyasla daha yüksek viskozitesinden dolayı sargılarda ortaya çıkan daha yüksek sıcaklıkla dengelenmektedir. Daha yüksek sıcaklığa rağmen, mineral yağ için tasarlanmış transformatörlerin biyolojik olarak çözünebilen esterlerle doldurulduğu birçok deneyim bulunmaktadır, [16, 19], aşırı yük gereksinimleri, çevresel nedenler veya trafo merkezinde yangın güvenliğini artırmak amacıyla. Ayrıca, transformatörlerin esterlerle yeniden doldurulması, bu sıvıların ilgili standartlarda belirtilmiştir, [20, 21].

Pad-mounted transformatörler ise modern elektrik dağıtım sistemlerinde kritik bir bileşen olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu transformatörler, genellikle yer üstünde veya yer altında, doğrudan zemin üzerinde monte edilerek kullanılan kompakt ve güvenilir enerji dağıtım çözümleridir. Pad-mounted transformatörlerin tercih edilmesindeki başlıca nedenler arasında kompakt tasarımları, güvenli yerleşim imkânı, estetik görünüm ve çevresel koşullara karşı dayanıklılık yer almaktadır.

Kompakt yapıları, pad-mounted transformatörlerin şehir içi alanlar gibi sınırlı yerleşim imkanına sahip bölgelerde bile kolayca entegre edilebilmesine olanak tanır. Bu özellik, özellikle kentsel alanlarda, parklar, otoparklar, alışveriş merkezleri gibi yerlerde önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca, bu transformatörler genellikle kapalı bir kabin içinde yer aldıkları için, çevresel faktörlere karşı koruma sağlarken, vandalizm ve dış etkenlerden kaynaklanan riskleri de minimize eder.

Güvenlik açısından pad-mounted transformatörler, dışarıdan temas riskini azaltan kapalı yapılarıyla dikkat çeker. Yüksek gerilimli bölümler izole edilmiştir ve bu durum hem bakım personeli hem de genel kamu için güvenlik sağlar. Ayrıca, transformatörlerin yer altına veya beton bir platform üzerine yerleştirilmesi, transformatörlerin stabilitesini artırır ve uzun ömürlü bir kullanım sunar.

Pad-mounted transformatörler, geleneksel trafo merkezlerine kıyasla daha az yer kaplar ve bu da onların kullanımını daha pratik hale getirir. Aynı zamanda, işletme ve bakım maliyetleri de daha düşüktür. Enerji verimliliği ve dağıtım güvenilirliği açısından da başarılı performans sergileyen bu transformatörler, özellikle dağıtım ağlarının modernizasyonu sürecinde önemli bir rol oynar.

Bu avantajlar göz önüne alındığında, pad-mounted transformatörler sadece estetik ve yer tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji dağıtım sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artıran önemli unsurlar olarak öne çıkar. Bu çalışma, ester yağı kullanılarak tasarlanan bir pad-mounted transformatörün soğutma performansını değerlendirmek ve boyut optimizasyonunu sağlamak amacıyla yapılan simülasyon çalışmalarını ve tasarım iyileştirmelerini ele almaktadır.

Ester yağının yüksek viskozitesinden kaynaklanan soğutma problemlerini çözmek amacıyla, transformatör için özel bir kabin tasarımı geliştirilmiştir. Bu kabin, altta hava girişini sağlayan açıklıklar, yanlarda hava giriş ve çıkışını sağlayan menfezler ve üstte hava çıkış açıklığı ile donatılmıştır. Bu tasarım, doğal konveksiyon etkisi yaratarak transformatörün daha etkin bir şekilde soğutulmasını amaçlamaktadır.

YÖNTEM

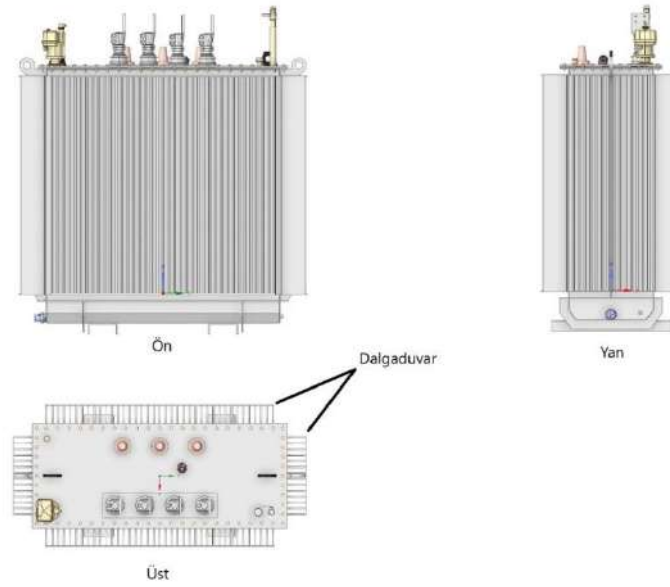
Bu çalışmada, pad-mounted ester yağlı transformatörün soğutma performansını analiz etmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları gerçekleştirilmiştir. CFD, akışkanlar (sıvı ve gaz) ve bu akışkanların etkisi altındaki süreçleri matematiksel olarak modelleyen ve bu modelleri sayısal yöntemlerle çözen bir mühendislik disiplindir. CFD, özellikle kompleks geometri ve sınır koşullarına sahip sistemlerde, akış, ısı transferi, türbülans ve diğer ilgili fiziksel olayları simüle etmek için kullanılır. CFD simülasyonları, akışkan davranışlarını öngörmek ve mühendislik tasarımlarını optimize etmek için son derece güçlü bir araçtır. Bu simülasyonlar, fiziksel deneylerin yapılmasının zor, maliyetli veya imkânsız olduğu durumlarda, alternatif bir analiz yöntemi olarak devreye girer. CFD ile elde edilen sonuçlar, bir sistemin tasarım aşamasında önemli kararlar alınmasına yardımcı olur ve gerçek dünya uygulamalarında karşılaşılabilecek problemleri önceden tespit etme imkânı sunar.

Bu çalışmada, transformatörün içinde ve çevresinde meydana gelen hava akışını ve ısı transferini modellemek için CFD simülasyonları kullanılmıştır. Modelleme süreci, öncelikle transformatör ve kabin geometrisinin üç boyutlu olarak modellenmesiyle başlamıştır. Ardından, bu geometri üzerine uygun sınır koşulları ve başlangıç değerleri atanmış, akışkan özellikleri belirlenmiş ve meshleme işlemi yapılmıştır. Meshleme işlemi, simülasyon alanının belli sayıda küçük hücrelere bölünmesi (sonlu elemanlar yöntemi) işlemidir ve bu hücrelerdeki akışkan davranışları sayısal olarak çözülür.

CFD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen bu simülasyonlar, Navier-Stokes denklemlerine dayanan sayısal yöntemlerle çözülmüştür. Bu denklemler, akışkanların momentum, enerji ve kütle korunumu ilkelerini ifade eder ve akışkanın hareketini ve ısı transferini tanımlar. Simülasyonlar sırasında türbülans modelleri de kullanılarak, hava akışının kabin içinde nasıl davrandığı ve transformatör yüzeylerinde nasıl bir ısı transferi gerçekleştiği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

CFD simülasyonlarının amacı, transformatör kabini içerisindeki hava akışını, sıcaklık dağılımını ve basınç değişimlerini doğru bir şekilde modelleyerek, soğutma performansının yeterliliğini değerlendirmektir. Simülasyonlar sonucunda, giriş, çıkış ve transformatörün dalga duvarlarının (finler) alt ve üst kısımlarındaki hava akış parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, transformatör tasarımının soğutma gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek için kullanılmıştır.

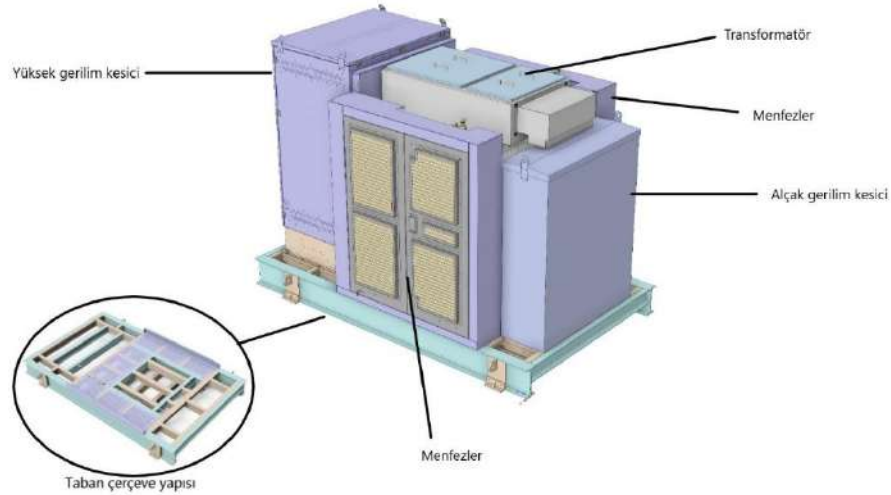
Şekil 1. Trafo 3 Yönden Görünüşü



Sonuçlar, CFD simülasyonlarıyla elde edilen verilerin gerçek dünyadaki uygulamalarla büyük ölçüde örtüştüğünü ve transformatörün soğutma performansının optimize edilmesine yardımcı olduğunu göstermektedir. Bu simülasyonlar, hem tasarım sürecinde maliyet ve zaman tasarrufu sağlamakta hem de daha güvenilir ve etkili bir transformatör geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

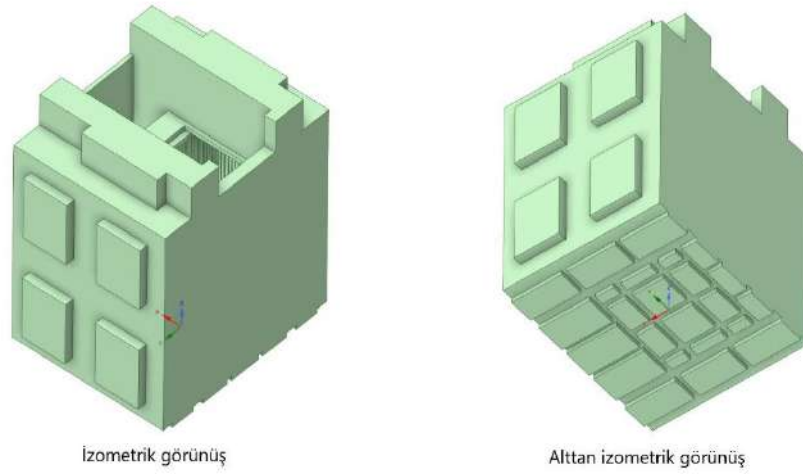
Bütün olarak sistemin 3D ayrıntılı modeli (Şekil 2) CFD simülasyon için gerekli elemanlar kalacak şekilde sadeleştirilir.

Şekil 2. Ayrıntılı 3D Model



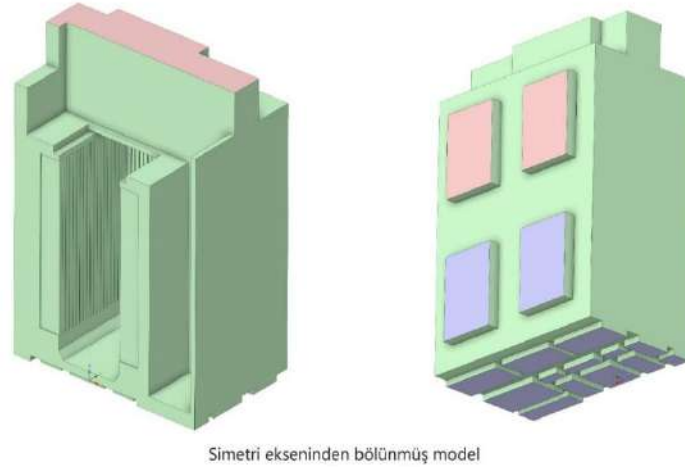
Bu sadeleştirme ısı kaynağı olarak kabul edilmeyen yüksek ve alçak gerilim kesici gibi elemanların duvar hava akışının gerçekleşeceği yerlerin de giriş, çıkış olarak belirlenmesinin ardından simülasyonda hava olarak tanımlanacak kısım katı olarak elde edilir (Şekil3).

Şekil 3. Katı CFD Modeli



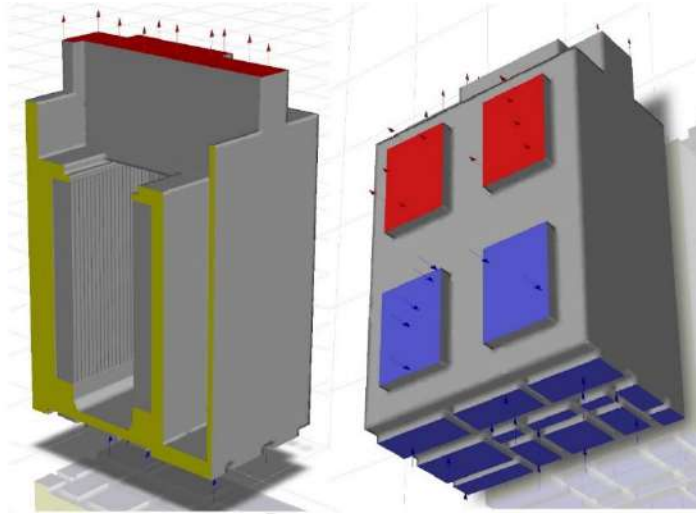
Bilindiği üzere sonlu elemanlar analizlerinde, özellikle 3 boyutlu simülasyonlarda, analiz modeli büyüdükçe modelde elde edilecek eleman sayısı artar ve bu nedenle çözüm süreleri ciddi şekilde uzayabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada kullandığımız analiz modeli XZ ekseninden simetrik olduğu için tam ortadan ikiye bölerek elde edilmiştir (Şekil 4).

Şekil 4. Simetri Ekseninden Bölünmüş Model (Kırmızı: Çıkış Yüzeyleri, Mavi: Giriş Yüzeyleri)



Simülasyonun kurulum bölümünde; giriş hızı 0.05 m/s, trafo duvar sıcaklığı gradyan olarak altta 42-69°C, çıkış basıncı: 0 Pa olarak tanımlanmış ve simülasyon bu sınır koşulları ile oluşturulmuştur (Şekil 5).

Şekil 5. Kurulum Sınır Şartları (Sarı: Simetri Eksenini, Kırmızı: Çıkış, Mavi: Giriş)



BULGULAR

Tablo. 1 Kritik Bölgelerde Elde Edilen Ortalama Değerler Tablosu

| Bölge | Ortalama Sıcaklık (°C) | Ortalama Basınç (Pa) | Ortalama Hız (m/s) |
|----------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| Giriş | 295.0 | 0.01884 | 0.05 |
| Çıkış | 301.7 | 0,00000 | 0.08283 |
| Dalgaduvar alt | 297.9 | -0.01561 | 0.06747 |
| Dalgaduvar üst | 332.5 | -0.006478 | 0.04158 |

Giriş noktasında elde edilen ortalama sıcaklık 295.0 K olarak ölçülmüştür. Bu değer, transformator kabine giren havanın başlangıçta oldukça serin olduğunu göstermektedir. Ortalama basınç değeri 0.01884 Pa ile pozitif ve düşük bir seviyededir; bu da havanın transformator içerisine serbestçe ve herhangi bir dirençle karşılaşmadan girdiğini ifade etmektedir. Ortalama hızın 0.05 m/s olması, girişteki hava akışının yavaş ve stabil olduğunu, bu nedenle ilk soğutma sürecinin düşük hızda gerçekleştiğini göstermektedir.

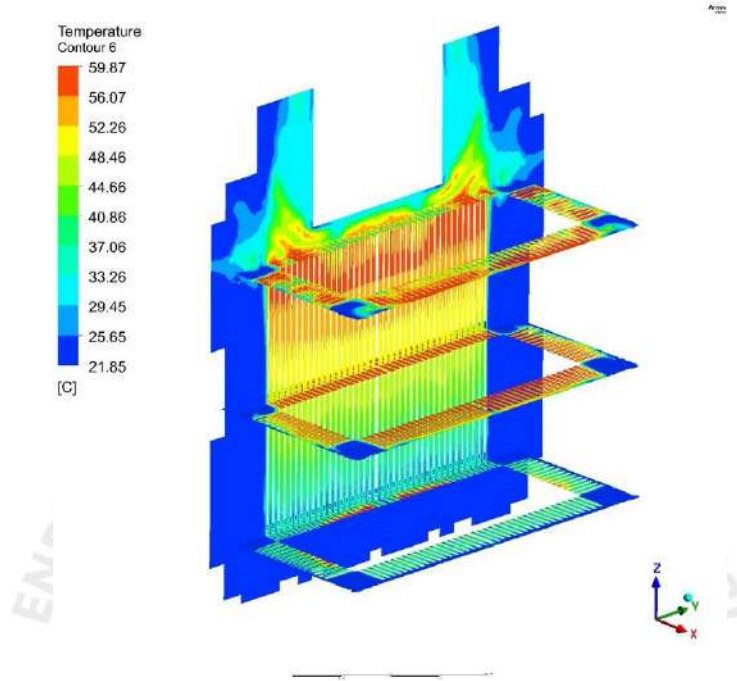
Çıkış noktasındaki ortalama sıcaklık, 301.7 K olarak ölçülmüş ve girişe kıyasla belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık artışı, transformator içerisindeki ısının etkin bir şekilde havaya aktarıldığını ve hava akışının bu ısıyı taşıyarak dışarı çıkardığını göstermektedir. Çıkış basıncı 0 Pa olarak tanımlandığı için sistemin baca etkisiyle havayı dışarı çektiğini ve düşük hava çıkışını desteklediğini göstermektedir. Ortalama hızın 0.08283 m/s'ye yükselmesi, hava akışının çıkışta hızlandığını ve ısının daha etkin bir şekilde dışarı atıldığını işaret etmektedir.

Dalgaduvarın alt kısmında ortalama sıcaklık 297.9 K olarak ölçülmüştür ve bu değer, giriş sıcaklığına göre hafif bir artış göstermektedir. Bu, alt kısımdan geçen havanın ısınmaya başladığını göstermektedir. Negatif basınç değeri -0.01561 Pa olup, hava akışının alt kısım boyunca yukarı doğru çekildiğini işaret etmektedir. Ortalama hızın 0.06747 m/s'ye yükselmesi, hava akışının bu bölgede hızlandığını ve soğutma sürecine önemli bir katkı sağlandığını göstermektedir.

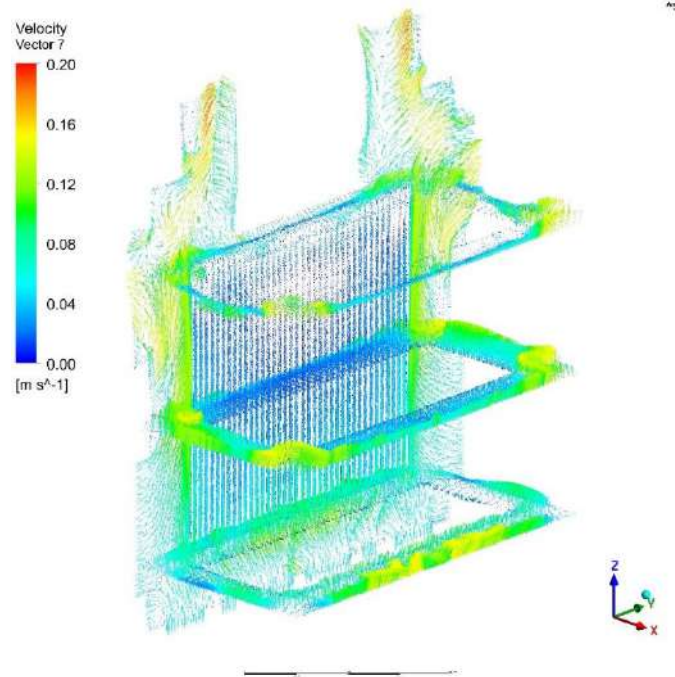
Dalgaduvarların üst kısmında ortalama sıcaklık 332.5 K olarak ölçülmüş ve bu değer, sistemdeki en yüksek sıcaklık olarak dikkat çekmektedir. Bu durum, ısının en çok biriktiği yerin transformatorün üst kısmı olduğunu göstermektedir. Negatif basınç değeri -0.006478 Pa, havanın bu bölgeden dışarı çıkmak üzere hareket

ettiğini gösterir; ancak hava akış hızının 0.04158 m/s ile diğer bölgelerden daha düşük olması, burada hava akışının nispeten yavaş olduğunu ve sıcak havanın burada bir miktar biriktiğini ancak soğumaya çok fazla negatif etkisinin bulunmadığını göstermektedir.

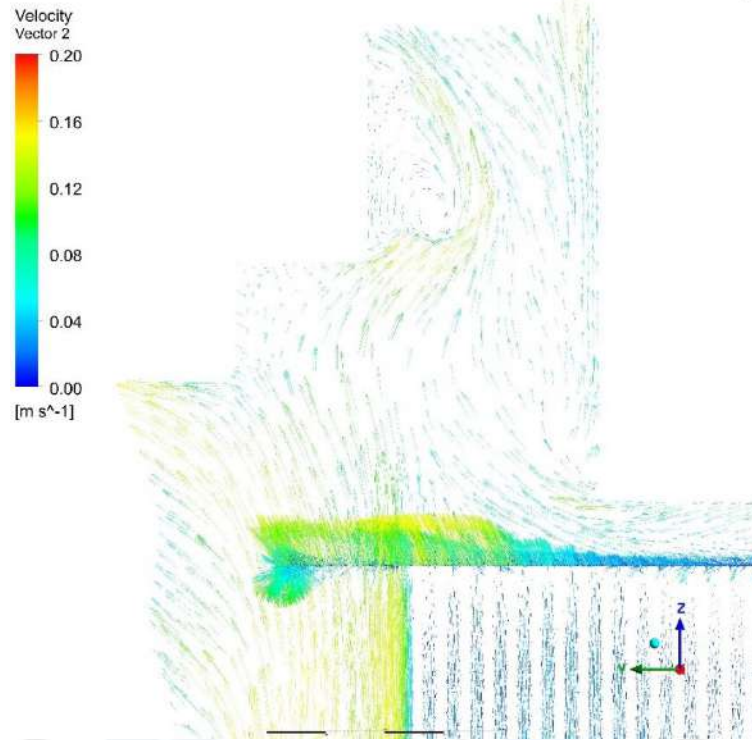
Şekil 6. Sıcaklık Dağılımı



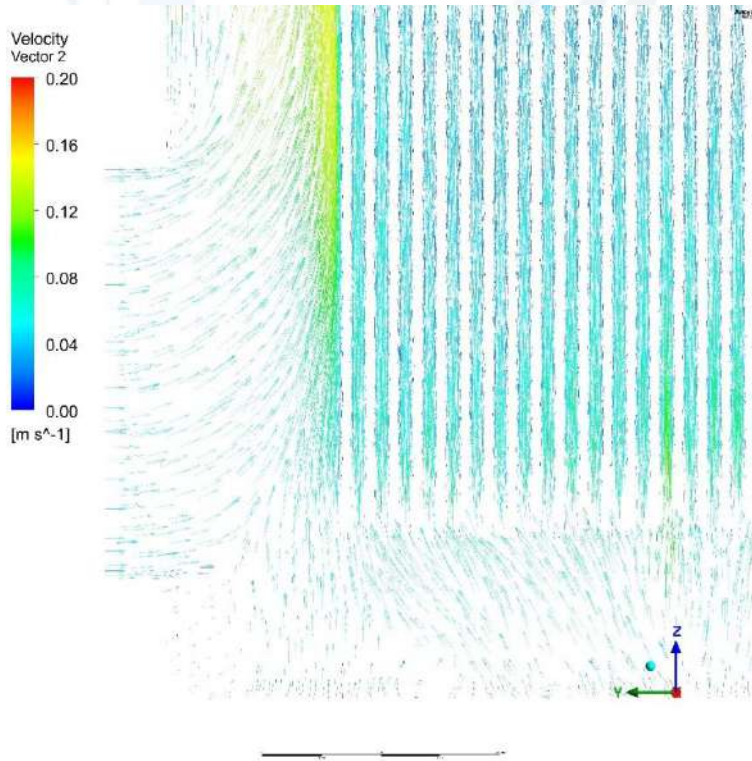
Şekil 7. Hız Vektörleri Dağılımı



Şekil 8. Hız Vektörleri Üst Ayrıntı



Şekil 9. Hız Vektörleri Alt Ayrıntı



TARTIŞMA

Bu analizler, transformatör kabini için genel soğutma performansını ortaya koymakta ve hava akışının etkin bir şekilde sağlandığını göstermektedir. Elde edilen verilere göre, transformatörün soğutma kapasitesi yeterli seviyede olduğunu ve bu transformatörün uzun yıllar çalışmasında soğutma sisteminin normal şartlarda yeterli olacağı öngörülmektedir.

SONUÇ

Simülasyonlar sonucunda, transformatörün giriş ve çıkış noktalarındaki sıcaklık, ortalama hız ve ortalama basınç değerleri incelenmiş ve sistemin soğutma performansının yeterli olduğu görülmüştür. Bu optimizasyonlar sayesinde, sahadaki merkezlerde kullanılan en küçük trafo köşkünün kıyasla, pad-mounted ester yağlı transformatörün boyutları %29 küçültülmüştür. Yaygın kullanılan muadillerine göre ise, transformatörün kapladığı alan %22, hacmi ise %13 oranında daha küçük olacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu çalışma, pad-mounted ester yağlı transformatörlerin hem performansını hem de boyutlarını optimize etmek için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Geliştirilen tasarım, daha küçük boyutlu, verimli ve çevre dostu transformatörlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür tasarımlar, enerji dağıtım sistemlerinde daha sürdürülebilir ve güvenli çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu çalışma ile literatüre bu sistemle alakalı CFD simülasyon konusunda katkı sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] "Electrical Insulating Oils," in ASTM Special Technical Publication, 1988.
- [2] J. M. Mufuta and E. Van Den Bulck, "Modelling of the mixed convection in the windings of a disc type power transformer," Appl. Therm. Eng., vol. 20, no. 5, pp. 417–437, 2000.
- [3] N. El Wakil, N.-C. Chereches, and J. Padet, "Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer," Int. J. Therm. Sci., vol. 45, no. 6, pp. 615–626, 2006.
- [4] E. Rahimpour, M. Barati, and M. Schäfer, "An investigation of parameters affecting the temperature rise in windings with zigzag cooling flow path," Appl. Therm. Eng., vol. 27, no. 11–12, pp. 1923–1930, 2007.
- [5] J. Smolka, O. Bíró and A. J. Nowak, "Numerical simulation and experimental validation of coupled flow, heat transfer and electromagnetic problems in electrical transformers," Arch. Comput. Methods Eng., vol. 16, no. 3, pp. 319–355, 2009.
- [6] F. Torriano, M. Chaaban, and P. Picher, "Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding," Appl. Therm. Eng., vol. 30, no. 14–15, pp. 2034–2044, 2010.
- [7] A. Skillen, A. Revell, H. Iacovides, and W. Wu, "Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings," Appl. Therm. Eng., vol. 36, no. 1, pp. 96–105, 2012.
- [8] M. E. Rosillo, C. A. Herrera, and G. Jaramillo, "Advanced thermal modeling and experimental performance of oil distribution transformers," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 27, no. 4, pp. 1710–1717, 2012.

- [9] F. Torriano, P. Picher, and M. Chaaban, "Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 40, pp. 121–131, 2012.
- [10] Nogueira, G. C., et al. "Thermal Analysis of Power Transformers with Different Cooling Systems using Computational Fluid Dynamics." *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 33, no. 1, 2022, pp. 359-368.
- [11] F. Torriano, H. Campelo, M. Quintela, P. Labbé, and P. Picher, "Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 69, no. November 2017, pp. 62–72, 2018. [12] R. Altay, I. Hazar, M. Aksoy, H. Aktay, J. C. Duart and R. Szewczyk, "Development of transformers with natural ester and cellulose or aramid insulation," *Journal of Energy : Energija*, doi.org/10.37798/2023723506, vol. 72, no. 3, 2023. [13] C. M. Gutiérrez, C. O. Alonso, C. F. Diego, I. F. Diego, C. O. Salas, A. K. Köseoğlu, R. Altay and A. O. Fernández, "Compatibility of Esters with Cellulosic Insulation Materials," in *Alternative Liquid Dielectrics 2024 2nd European Conference on Electrical Engineering 5 for High Voltage Transformer Insulation Systems*, Wiley online library, 2021, p. Chapter 3. [14] R. Altay, A. Santisteban, C. Olmo, C. J. Renedo, A. F. Ortiz, F. Ortiz and F. Delgado, "Use of Alternative Fluids in Very High-Power Transformers: Experimental and Numerical Thermal Studies," *IEEE Access*, p. 10.1109/ACCESS.2020.3037672, 2020.
- [15] P. Quintanilla, R. Altay, A. Santisteban, A. Ortiz and K. Koseoglu, "CFD analyses of a test platform with different fluids for use in transformers," *7th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, pp. 48-51, 2022.
- [16] R. Altay, P. J. Quintanilla, A. Ortiz, F. Delgado and A. K. Koseoglu, "100MV A Non-Uniform Heat Losses Study," *2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, vol. 10.23919/CMD54214.2022.9991711, 2023.
- [17] R. Altay, İ. Hazar, N. M. Kocanali, C. Adisen and M. Aksoy, "Investigation of magnetic wall shunt combinations on 650 MVA power transformers by finite element methods," *Transformer Magazine*, vol.11, no. 1, 2024. [18] A. Santisteban, A. Piquero, F. Ortiz, F. Delgado and A. Ortiz, "Thermal modelling of a power transformer disc type winding immersed in mineral and ester-based oils using network models and CFD," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 174651-174661, 2019. [19] İ. Dağlı, R. Altay, G. Yaman, A. K. Köseoğlu, S. A. SİS, N. Toprak, N. M. Koçanali, E. Kervan and F. Delgado, "Investigation of Ester Oil Utilization in Transformer Applications in a Comparative Manner," *19th International Conference on Sustainable Energy Technologies-SET2022*, 2022.
- [20] B. Wei, Y. Wang, S. Ren, R. Wang and Y. Xu, "Overload Investigation on Retrofilling Mineral Oil Distribution Transformer with Soybean Based Natural Ester," *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Beijing, 2020, pp. 1- 4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279714.
- [21] *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Insulating Liquid in Transformers*, IEEE Standard IEEE Std C57.147, 2018. [21] *IEC Natural esters - Guidelines for maintenance and use in electrical equipment*, IEC Standard 62975, 2021.

109: Yüksek Gerilim Trafo Merkezi Topraklama Sistemlerinde Bilgisayar Tabanlı Analiz: Gerçek Bir Uygulama Örneği

Emir Kaan Tutuş, Nevzat Onat

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Celal Fadıl Kumru

Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Yavuz Ateş

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği,

Ertuğrul Partal

BND Grup Teknoloji A.Ş.

ÖZET

Yüksek gerilim trafo merkezlerinin topraklama sistemleri tasarımları esnasında can güvenliği, teçhizat güvenliği ve operasyonel güvenlik olmak üzere üç temel kategori dikkate alınmaktadır. Mevcut trafo merkezi topraklama sistemleri, kabullere dayalı olan ampirik formüllerle tasarlanmış olsalar da Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) Topraklama Sistemleri Şartnamesine göre, 1 Ocak 2024 tarihinden itibaren topraklama sistemlerinin bilgisayar destekli analiz programlarıyla yeniden modellenmesi ve analizinin yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu nedenle, trafo merkezi topraklama sistemlerinin tasarımı öncesinde, modelleme ve analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu bakımdan, bu çalışmada, Manisa Organize Sanayi Bölgesi'ne ait olan, geleneksel hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanmış 154/33 kV trafo merkezinin topraklama sisteminin yeniden modellemesi ve analizi XGSLab yazılım programının XGSA FD modülü ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, görünür toprak özgül direncinin ve toprak dönüş akımının etki alanı (zone of influence) üzerindeki etkisinin analiz edilmesidir. Bununla birlikte, tasarlanan sistemin kritik dokunma gerilimi seviyesinin belirlenmesi, dokunma gerilimi açısından güvenli bölgenin tespiti ve ekipman güvenliğinin sağlanması da çalışmanın diğer amaçlarından birisidir. Ek olarak, topraklama sisteminde kullanılan iletken miktarının topraklama sistemi performansı üzerinde etkisi de çalışma kapsamında analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, şalt tesisi topraklama sistemi tasarımı ve analizinde bilgisayar tabanlı analiz yazılımı kullanılmasının tasarımın doğruluğunu ve mevzuata uygunluğunu sağlamak için gerekli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: topraklama sistemi tasarımı, etki alanı analizi, dokunma gerilimi ve güvenli bölge analizi, yürürlükte olan TEİAŞ topraklama sistemleri şartnamesi, XGSLab.

ABSTRACT

During the design of high-voltage substation earthing systems, three main categories are considered: personal, equipment, and operational security. Although existing substation earthing systems have been designed using empirical formulas based on assumptions, the revised TEİAŞ Earthing Systems Specification mandates that, starting from January 1, 2024, these systems must be re-modeled and analyzed using computer-aided analysis programs. Therefore, prior to the design of substation earthing systems, it is essential to conduct both modeling and analysis. In this context, this study focuses on the re-modeling and analysis of the earthing system of a 154/33 kV substation in the Manisa Organized Industrial Park, which

was originally designed using traditional calculation methods. The analysis is conducted using the XGSA FD module of the XGSLab software. The main objective of this study is to analyze the impact of apparent soil resistivity and ground return current on the zone of influence. Additionally, other objectives of this study include determining the critical touch voltage levels of the designed system, identifying safe zones concerning touch voltage, and ensuring equipment safety. Furthermore, the effect of the number of conductors used in the earthing system on its performance are analyzed and evaluated. The results indicate that using computer-based analysis software for the design and analysis of substation earthing systems is necessary to ensure design accuracy and compliance with regulations. **Keywords:** earthing system design, zone of influence analysis, touch voltage and safety zone analysis, current TEİAŞ earthing systems specification, XGSLab.

GİRİŞ

Son yıllarda dünya genelinde ve Türkiye’de elektrik güç sistemlerinin önemi artmış ve bu sistemler kapsamlı bir ağ yapısına evrilmiştir. Elektrik enerjisinin güvenli ve kesintisiz iletimi, bu ağ yapısının en kritik unsurlarından biridir. Elektrik sistemlerinin etkin çalışması kadar, bu sistemlerin güvenliğini sağlayan koruma yapıları da büyük önem taşımaktadır [1]. Bu koruma yapısının temelini ise topraklama sistemleri oluşturmaktadır. Topraklama, elektrikle çalışan cihazların güvenliği için en önemli adımlardan biri olup, elektrik sisteminde meydana gelebilecek olası kısa devreler ve diğer arıza durumlarında hem canlıları hem de teçhizatları koruma altına almayı hedeflemektedir [2]. Bu sayede, arıza durumunda devreye giren koruma cihazları, hasar görmüş bölgenin hızlıca devre dışı bırakılmasını sağlamaktadır.

Elektrik güç sistemlerinde topraklama hesaplamaları, önceki yıllarda geleneksel olarak ampirik formüller ve standartlar üzerinden yapılmış ve IEEE 80-2000, 2013 gibi uluslararası standartlar, uzun yıllar boyunca bu hesaplamalarda rehberlik etmiştir [3], [4]. Ancak, genişleyen elektrik şebekeleri ve artan enerji talepleri, bu geleneksel yöntemlerin saha uygulamalarında yeterli kalmadığını ortaya koymuştur. Özellikle, modern enerji sistemleri ve şebeke yapılarına paralel olarak, topraklama sistemlerinde daha dinamik ve kapsamlı analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu gelişmelere bağlı olarak Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 1 Ocak 2024 itibaren topraklama sistemi analizlerinde bilgisayar destekli yazılımların kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir [5]. Bu karar, geleneksel ampirik yöntemlerin yerini daha etkin ve hassas analiz yöntemlerinin almasını sağlamıştır. Bu bağlamda, XGSLab gibi yeni nesil yazılım programları, topraklama sistemlerinin analizinde önemli bir rol oynamaktadır [6]. Söz konusu yazılımlar,

toprak direnci, dokunma gerilimi gibi birçok kritik parametreyi dinamik olarak değerlendirme imkanı sunarak daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, geleneksel yöntemlerle tasarlanmış örnek bir topraklama sisteminin XGSLab gibi ileri düzey analiz yazılımı ile geliştirilmesi ve karşılaştırılması yapılacaktır. Bu karşılaştırma, mevcut sistemlerin yeni nesil yazılımlarla analiz edilmesi sonucunda ortaya çıkan farklılıkları ve bu yazılımların sağladığı avantajları gözler önüne serecektir. Böylelikle, daha güvenilir, kapsamlı ve doğruluğu yüksek topraklama hesaplamalarının yapılması mümkün hale gelmiştir. Geliştirilecek sistem için pilot bölge olarak Türkiye'nin en büyük sanayi tesislerinden biri olan Manisa Organize Sanayi Bölgesi'ndeki (MOSB) 154/33 kV Trafo Merkezi (TM) seçilmiş ve detaylı analizler yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın planlamasında öncelikle 2. bölümde pilot bölge olarak belirlenen MOSB TM'ye ait bilgiler belirtilmiş ve çalışmanın metodolojisi anlatılmıştır. Sonrasında sırasıyla bulguları ve yorumlar bölümünde elde edilen sonuçlar verilmiş ve analiz çıktıları paylaşılmıştır. En son bölüm olarak sonuçlar kısmı ile çalışma tamamlanmıştır.

YÖNTEM

Topraklama sistemi hesaplamaları, geçmişte IEEE 80-2000 standartlarına dayalı ampirik formüller kullanılarak gerçekleştirilmekteydi [3]. Ancak TEİAŞ'ın 1 Ocak 2024 itibarıyla yürürlüğe giren revize edilen topraklama sistemi şartnamesi ile birlikte, topraklama sistemlerinin analizinde bilgisayar destekli analiz programlarının kullanımı zorunlu hale gelmiştir [5]. Bu doğrultuda, ampirik formüllerle tasarlanmış mevcut TM topraklama sistemlerinin, bilgisayar destekli analiz programları kullanılarak (Örn.: XGSLab) yapılan analizlerin karşılaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle, Türkiye'nin en büyük sanayi bölgelerinden biri olan MOSB'da yer alan 154/33 kV TM için ampirik formüllerle tasarlanmış ve inşa edilmiş mevcut topraklama sistemi, XGSLab yazılımı ile yeniden modellenmiş ve dokunma gerilimi, güvenli bölge, etki alanı incelenmiştir. Ek olarak, XGSLab yazılımına elektrot çapı-uzunluğu gibi fiziksel parametrelerin ve toprağa giren akımın genliğindeki değişimler eklenmiş ve topraklama sistemi performansı üzerindeki etkileri çalışmada incelenmiştir.

Dünya çapında yaygın olarak kullanılan XGSLab, topraklama sistemlerinde hassas analizler için gelişmiş algoritmalarla donatılmış bir yazılımdır. Elektromanyetik simülasyonlarda yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlayarak tasarım süreçlerini optimize eder [6]. Çok sayıda geleneksel hesaplama yöntemi ve simülasyon yazılımı bulunmasına rağmen, XGSLab, toprak direnci ve toprak geçirgenliği hesaplamalarında frekans değerlerini de dikkate alarak kendisini bir adım

daha öne çıkarmaktadır. [7]'ye göre, toprak direnci değerindeki değişime bağlı olarak frekans etkisinin dikkate alınması gerekliliği değişebilir. Özellikle 700 $\Omega \cdot m$ değerinden sonra, frekans etkisinin göz önünde bulundurulması zorunludur [8], [9]. XGSLab'ın diğer yazılım programlarından bir diğer önemli farkı, homojen ve çok katmanlı toprak yapısını analiz edebilmesinin yanı sıra, çok bölgeli bir toprak yapısının da modellenmesine ve analizine de olanak tanınmasıdır.

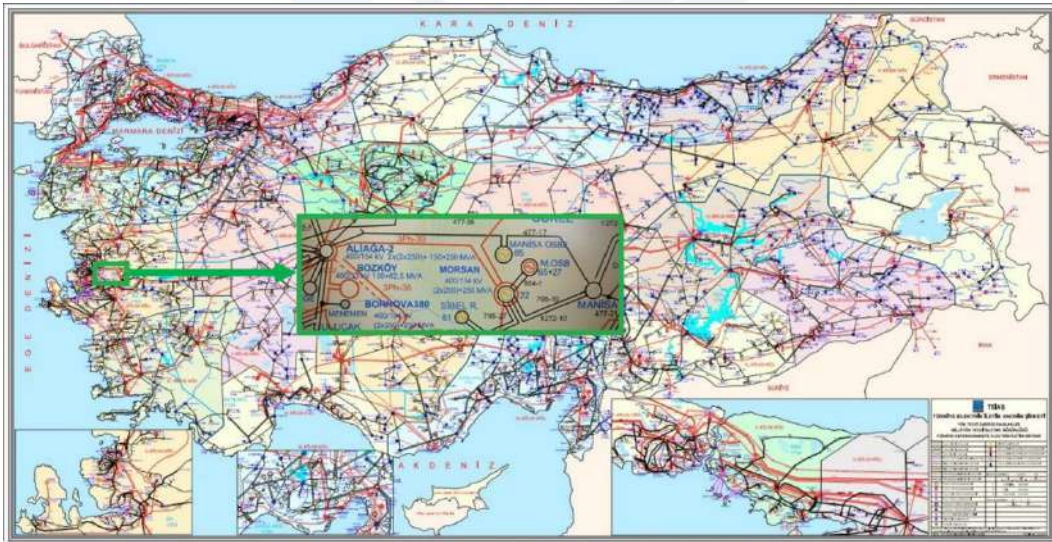
2.1. Sistemin Tanıtımı

TM, yatayda 90 metre ve düşeyde 50 metre ölçülerine sahip olup, toplamda 4500 metrekarelik bir alanı kaplamaktadır. Bu merkez, iki adet düşürücü tip transformatör aracılığıyla çift devreli 154 kV iletim hattından beslenmektedir. Nihai direk ile ilgili bilgiler aşağıda Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca bir adet de kontrol binası yer almaktadır. Bu alan, yüksekliği 2.5 metre olup, topraklama ağının 1 metre içerisinde yer alan bir çit ile çevrelenmiştir. TM'nin tek hat şeması, genel görünümü ve bilgisayar destekli yazılım programında modellenmiş versiyonu Grafik 1, Grafik 2 ve Grafik 3'de gösterilmektedir.

Tablo. 1 İletim Hattı Nihai Direğe Ait Parametreler.

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Nihai Direk ve Yüksekliği | CP3 + 15 / 48 m |
| Gerilim Değeri | 154 kV |
| Koruma İletkeni ve Tipi | 95 mm ² OPGW / ACSR |
| Direk Darbe Empedansı | ≈ 195 Ω |

Grafik 1: 154/33 kV MOSB Trafo Merkezi Tek Hat Şeması.

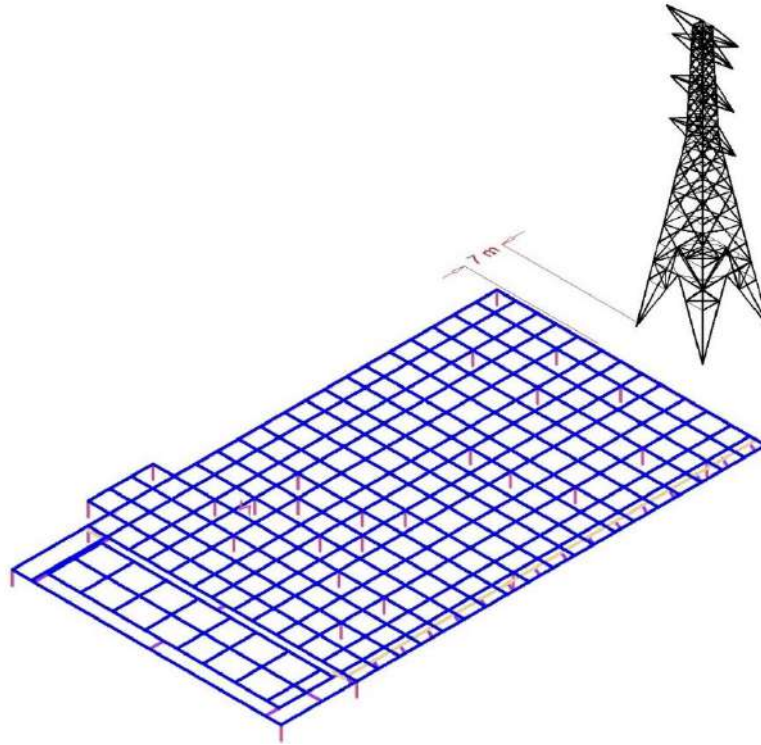


Kaynak: [10].

Grafik 2: 154/33 kV MOSB Trafo Merkezi.



Grafik 3: MOSB Trafo Merkezi Topraklama Sistemi 4 Boyutlu Modeli.



2.2. MOSB TM Topraklama Sistemi Tasarımı

Topraklama sistemi tasarımı, elektrik tesislerinin güvenliği ve işlevselliği açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu tasarım süreci, zeminin elektriksel özelliklerini ve tesisin gereksinimlerini göz önünde bulundurarak, güvenli bir topraklama sistemi oluşturmayı hedefler. İyi bir topraklama sistemi, elektrik akımlarını güvenli bir şekilde toprağa ileterek, elektriksel arızalar ve yıldırım olayları sırasında hem can hem de mal kaybına karşı koruma sağlamaktadır.

Topraklama sistemi tasarımında dikkat edilmesi gereken başlıca unsurlar, toprağın elektriksel iletkenliği, topraklama elektrotlarının yerleşimi ve boyutları, sistemde oluşabilecek gerilim artışlarının güvenli seviyelerde tutulması ve temas gerilimlerinin belirlenen sınırlar içinde kalmasıdır. Bu süreç, yalnızca belirli standartların karşılanmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tesisin genel güvenliğini ve dayanıklılığını da artırır. Grafik 4’de topraklama sisteminin tasarım sürecini anlatan bir akış diyagramı yer almaktadır.

TM topraklama sistemi için iletkenin kesit alanı belirlenmelidir. XGSLab yazılımı ile yapılmış olan kesit alanı hesaplamasında TEİAŞ şartnamesine göre referans alınan gerekli parametreler ve değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Topraklama ağında kullanılan iletkenin kesit alanı (1)’de yer alan formül kullanılarak hesaplanmıştır [5].

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (1)$$

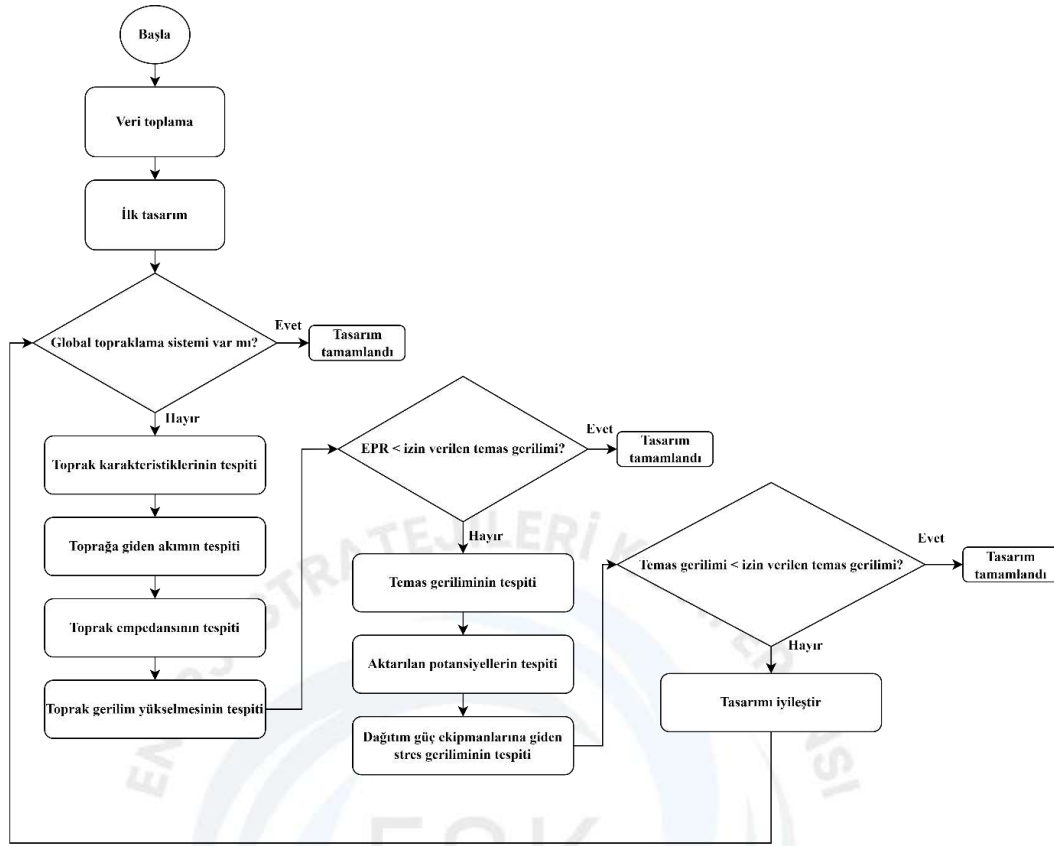
A , iletkenin kesit alanını mm^2 cinsinden; I , iletken akımının efektif değerini amper cinsinden; K , akım taşıyan bileşenin malzemesine bağlı olan bir sabiti; t_f , akım süresini saniye cinsinden; β , akım taşıyan bileşenin direnç sıcaklık katsayısının tersi olup, θ_i ve θ_f ise sırasıyla ortam ve son sıcaklıklarını $^{\circ}\text{C}$ cinsinden ifade eder.

Revize edilen TEİAŞ topraklama sistemi şartnamesi, kesit alanının hesaplanmasında TS EN 50522:2022 Standardını referans almakta olup, topraklama elektrotlarının en az 120 mm^2 örgülü bakır iletkenlerden oluşması gerektiğini belirtmektedir [12]. Bu nedenle, (1) formülü kullanılarak 114.41 mm^2 kesit alanı elde edilmiş olmasına rağmen, TM topraklama sistemi için iletken kesit alanı olarak 120 mm^2 seçilmiştir.

Tablo. 2 İletken Kesit Alanı Hesabı İçin Gerekli Parametreler ve Değerleri.

| <i>Parametre</i> | <i>Değer</i> | <i>Tanım</i> |
|--|---------------|--|
| I [A] | 31500 | Kesici anma kısa devre akımı etkin değeri |
| t_f [s] | 0.5 | Arıza temizleme süresi (İkincil koruma) |
| K [$\text{A}(\text{s})^{1/2} / \text{mm}^2$] | 226 | Akım taşıyan kısmın malzemesine bağlı katsayı |
| İletken Cinsi | Bakır | Topraklama iletkeni malzemesi |
| β [$^{\circ}\text{C}$] | 234.5 | Akım taşıyan kısmın 0°C 'deki direncinin sıcaklık katsayısının tersi |
| θ_i [$^{\circ}\text{C}$] | 20 | Ortam sıcaklığı |
| θ_f [$^{\circ}\text{C}$] | 300 | Müsaade edilebilir maksimum sıcaklık |
| A [mm^2] | 114.41 | Hesaplanan iletken kesiti |

Grafik 4: Topraklama Sistemi Tasarımı Akış Diyagramı.



Kaynak: [11].

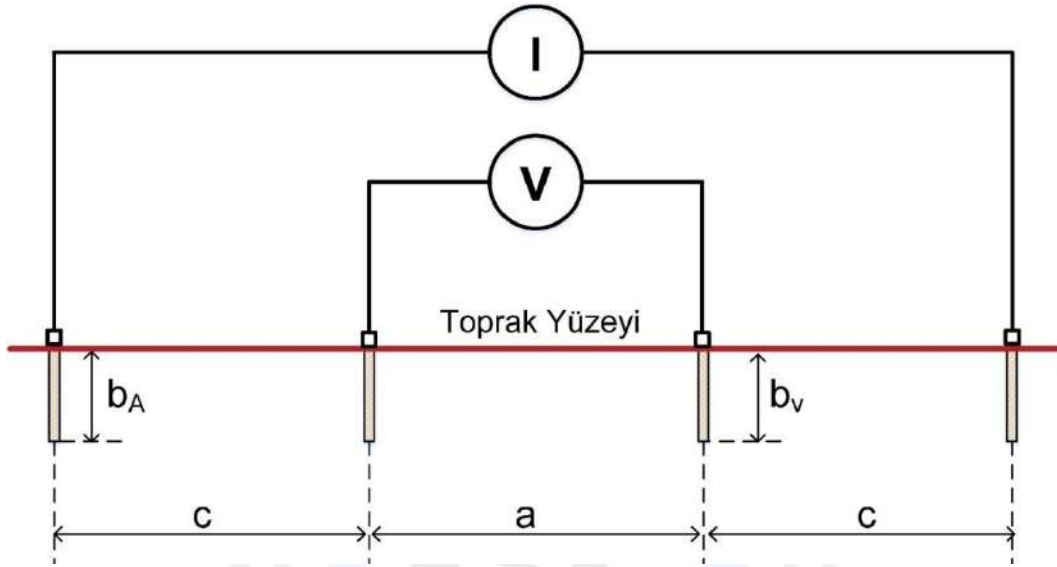
Modellemenin tamamlanabilmesi için, programa görünür toprak özgül direncinin bir parametre olarak eklenmesi gerekmektedir. Görünür toprak özgül direncini ölçmek için çeşitli yöntemler mevcut olmasına rağmen, Wenner yöntemi aralarında en bilinen yöntemlerin başında gelmektedir. Grafik 5’de bahsedilen Wenner yöntemi gösterilmiştir. Wenner yönteminde toprağa dört elektrot yerleştirilerek ölçüm yapılmaktadır. İçteki iki elektrot, dıştaki iki elektrodan toprağa uygulanan AC akımı sırasında üretilen elektriksel potansiyelini ölçmektedir [13].

‘a’ ile belirtilen mesafe, gerilim ölçümü için kullanılan elektrotların arasındaki uzaklığı ifade ederken, ‘c’ akım ve gerilim elektrotları arasındaki mesafeyi temsil eder. ‘bA’ ve ‘bV’ değişkenleri ise sırasıyla akım ve gerilim elektrotlarının toprağa gömüldüğü derinliği belirtir.

Tablo 3, TM için yapılan ölçümlerden elde edilen değerleri sunmaktadır. Mevcut ölçüm değerleri homojen toprak modeline göre yapılmıştır. Şartnamenin ilgili kısmında yer alan “Topraklama sisteminin tasarımında toprak yapısına bağlı olarak çok katmanlı toprak modeli kullanılacaktır.” ifadesi aslında homojen yapının kullanılmamasını gerektiğine işaret etmektedir. Bu nedenle mevcut ölçüm değerleri yerine çalışmada kullanılan XGSLab

yazılımına ait kullanıcı kılavuzunda yer alan tipik görünür toprak özgül direnç dağılımlarının verildiği eğrilere göre oluşturulmuş değerler kabul edilmiştir [14]. Tablodaki veriler, TM'nin görünür toprak özgül direncini hesaplamak için kullanılmıştır. a , b_A , b_V ve c değerleri ise yürürlükte olan revize edilmiş TEİAŞ topraklama sistemi şartnamesinde bulunan EK01'deki değerler kullanılmıştır [5].

Grafik 5: Wenner Yöntemi.



Tablo 3. Görünür Toprak Özgül Direnç Ölçüm Değerleri.

| Ölçüm no. | a [m] | b_A [m] | b_V [m] | c [m] | R [Ω] | ρ [$\Omega \cdot m$] |
|-----------|---------|-----------|-----------|---------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 0.5 | 0.1 | 0.05 | 0.5 | 152.633 | 500 |
| 2 | 1 | 0.1 | 0.05 | 1 | 78.485 | 498.5 |
| 3 | 1.5 | 0.1 | 0.05 | 1.5 | 52.479 | 497 |
| 4 | 2 | 0.1 | 0.05 | 2 | 39.323 | 495.5 |
| 5 | 3 | 0.15 | 0.05 | 3 | 26.038 | 492 |
| 6 | 4.5 | 0.15 | 0.05 | 4.5 | 17.241 | 488 |
| 7 | 6 | 0.15 | 0.05 | 6 | 12.811 | 483.25 |
| 8 | 9 | 0.2 | 0.05 | 9 | 8.484 | 480 |
| 9 | 13.5 | 0.2 | 0.05 | 13.5 | 5.481 | 465 |
| 10 | 18 | 0.2 | 0.1 | 18 | 3.978 | 450 |
| 11 | 27 | 0.2 | 0.1 | 27 | 2.222 | 377 |
| 12 | 36 | 0.2 | 0.1 | 36 | 1.631 | 369 |
| 13 | 54 | 0.2 | 0.1 | 54 | 1.149 | 390 |
| 14 | 81 | 0.2 | 0.1 | 81 | 0.825 | 420 |
| 15 | 100 | 0.2 | 0.1 | 100 | 0.653 | 410 |
| 16 | 121.5 | 0.2 | 0.1 | 121.5 | 0.524 | 400 |
| 17 | 150 | 0.2 | 0.1 | 150 | 0.398 | 375 |

Ölçüm değerlerinin yazılıma tanımlanmasının ardından toprak katman sayısı belirlenmelidir. XGSLab'ın pratik yollarından bir tanesi, yazılıma tanımlanan ölçüm sonuçlarına göre toprak katman sayısını otomatik olarak belirleyebilmesidir. Bu belirleme işleminde XGSLab yazılımı

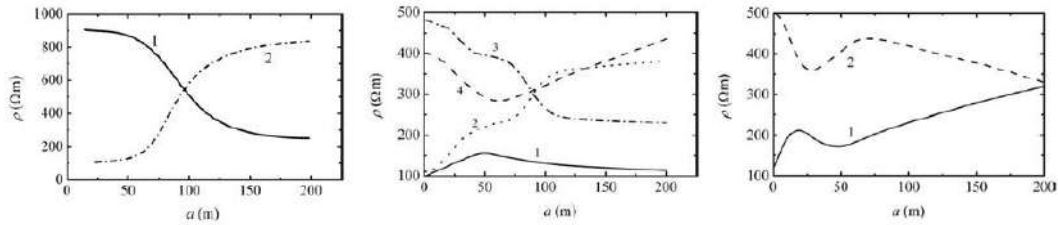
ölçüm değerlerine ait bir eğri oluşturup bu eğriye en yakın/uygun toprak katman sayısını literatürdeki eğrileri dikkate alarak belirlemektedir. Bu durumda, toprak özgül direnç analizi modülü, iki katmandan başlamak üzere RMS hatası önemli ölçüde azalmadığı duruma kadar katman sayısını artırır. Eğer göz ardı edilebilir seviyede değişim oluyor ise o durumda süreci durdurur. “k” adımıyla süreç, (2)’deki koşul sağlanana kadar devam eder.

$$RMS\ Error_k < 0.9 \cdot RMS\ Error_{k-1} \quad (2)$$

Süreç, önceki koşul sağlanmadığında, yani “k-1” adımıdaki RMS hatasına göre “k” adımıdaki RMS hatasının %10’dan daha az azalması durumunda durur. Otomatik tespit (Automatic Detection) fonksiyonu, minimum RMS hatasına sahip bir model aramak yerine, katman sayısının sınırlı tutulmasının tercih edildiği durumlarda, iyi bir denge sağlayan bir model bulmaya odaklanmaktadır. Bu nedenle, kullanılan çözüm “k-1” adımıyla (katman sayısı “k” olan) karşılık gelmektedir. Aşağıda Grafik 6’da farklı elektrot açıklıklarındaki Wenner ölçümlerinden elde edilen çok katmanlı toprak yapılarına ait görünür toprak özgül direnç eğrileri verilmiştir.

Grafik 6: Wenner Ölçümüne Göre Görünür Toprak Özgül Direnç Eğrileri.

a) 2 katman, b) 3 katman, c) 4 katman.



TM’lerde meydana gelen arıza durumunda toprağa giren akımın büyüklüğüne (arızanın yüksek gerilimli buşinglerde meydana geldiği varsayılarak) dayanarak maksimum izin verilen dokunma ve adım gerilimlerinin değerlendirilmesi, topraklama sistemi analiz yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, Toprak Potansiyel Yükselmesi (EPR, Earth Potential Rise) sınır değerleri, arıza temizleme süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Arıza temizleme süresi uzadıkça, sınır gerilim değeri [15]’e göre azalabilir. Bu nedenle, meydana gelen arızanın belirlenen sınırlar içindeki üçüncü parti yapıların varlığını değerlendirmek için etki alanı kontur hesaplamaları yapılmalı ve bu kontur grafiklerinin, Google Earth gibi elektronik haritalara entegre edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, TM topraklama sisteminin dokunma gerilimi açısından güvenliği, TS IEC 60479-1 Standardına [16] dayalı hesaplama metodolojisi ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Bir

alanın güvenli olarak kabul edilebilmesi için dokunma geriliminin, izin verilen (maksimum) dokunma gerilimini aşmaması gerekmektedir. Bu açıdan yürürlükteki revize edilen TEİAŞ Topraklama Şartnamesinde “TM topraklama sistemi tasarımında şalt sahası (iç fensin içi) içerisinde ayakkabılı durum dikkate alınacaktır. İç fens ile dış fens arasında idari binalar, lojman, dinlenme alanı vb. bulunması sebebi ile ayakkabısız durum dikkate alınacaktır. Dış fense dışarıdan dokunulması durumu için ayakkabısız durum dikkate alınacaktır” şeklinde bir ifade belirtilmiştir [5]. Ek olarak ilgili şartnamede verilen ayakkabılı ve ayakkabısız durumda izin verilen dokunma gerilimleri aşağıda yer alan Tablo 4’de gösterilmiştir. Şartnamede aşağıdaki değerlerin maksimum %80 seviyesinde olabileceği de ayrıca belirtilmiştir. Analizi yapılan TM’nin yüzeyi 0.15 m kalınlığında çakıl ile kaplı olduğu için ayakkabılı ve ayakkabısız durumda sırasıyla 1.92 ve 1.472 kV değerleri müsaade edilebilir dokunma gerilimi seviyeleri olarak dikkat edilmiştir.

Tablo. 4 Ayakkabılı ve Ayakkabısız Durumda İzin Verilen Dokunma Gerilimleri.

| Yüzey | ρ [$\Omega\cdot m$] | Ayakkabılı Durumda İzin Verilen Dokunma Gerilimi [kV] | | Ayakkabısız Durumda İzin Verilen Dokunma Gerilimi [kV] | |
|----------------------|----------------------------|---|---------------|--|---------------|
| | | Nominal Değer | %80’lik Değer | Nominal Değer | %80’lik Değer |
| Toprak Yüzey (Islak) | 10 | 1.130 | 0.904 | 0.530 | 0.424 |
| Çakıl | 2000 | 2.440 | 1.920 | 1.840 | 1.472 |
| Beton (Islak) | 21 | 1.140 | 0.912 | 0.540 | 0.432 |
| Asfalt (Islak) | 10000 | 6.220 | 4.976 | 5.620 | 4.496 |

Kaynak: [5].

BULGULAR ve YORUMLAR

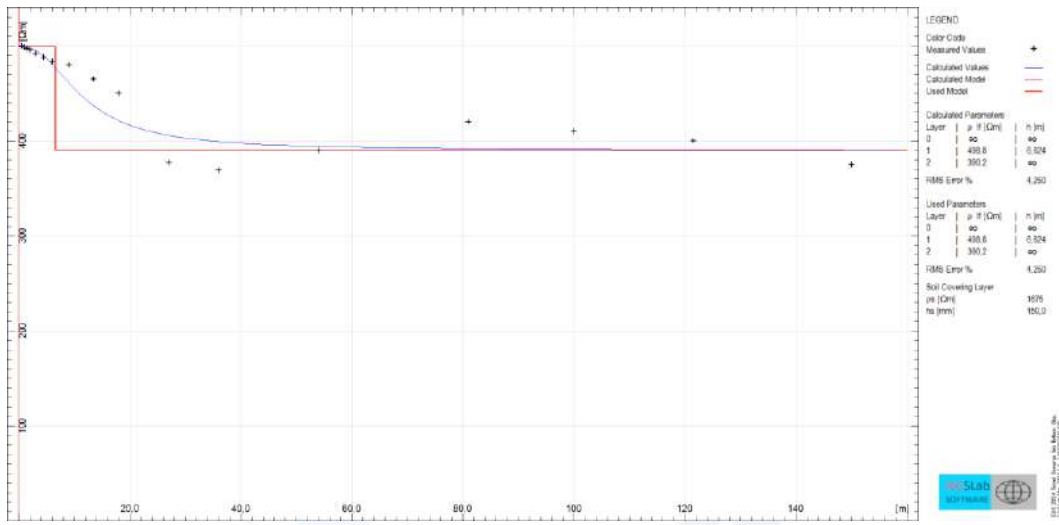
Bu çalışmada, MOSB’da yer alan iki adet 100 MVA transformatöre sahip bir TM’nin topraklama sistemi, XGSLab yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, TEİAŞ Topraklama Sistemleri Şartnamelerindeki son revizyonla birlikte yapıların topraklama sistemlerinde bilgisayar destekli analiz yöntemlerinin kullanılmasının zorunlu hale gelmesi nedeniyle bir pilot bölge seçerek referans bir çalışma oluşturmaktır.

Çalışmada, topraklama sisteminin performansını etkileyecek parametreler belirlenmiş ve aşağıda sunulmuştur. Bu parametrelerin topraklama sisteminin performansı üzerindeki etkileri dokunma gerilimi ve etki alanı (zone of influence) açısından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ek olarak, TEİAŞ şartnamesinde belirtilen dokunma gerilimi sınırlarının karşılanacağı şekilde iletken maliyet optimizasyonu her bir senaryo için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

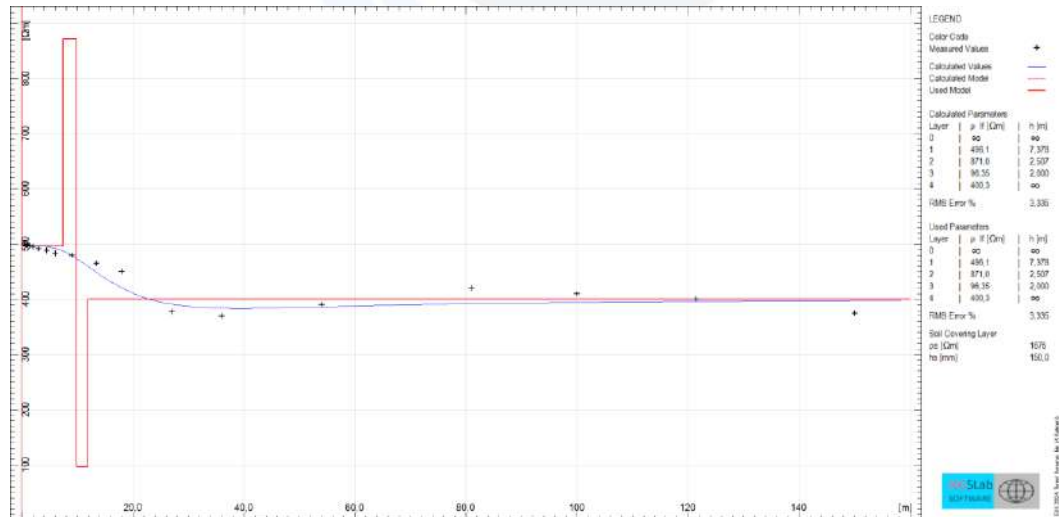
- Toprak katman sayısı (2 ve 4 katmanlı),
- Arıza esnasında toprağa giren akım genliği (2, 5, 20 kA),
- Topraklama ağının gömülme derinliği,
- Kazık boyu,
- Kazık çapı.

Yukarıda verilen toprak katman sayıları için kabul edilen toprak özgül direnç ölçümleri yazılıma girdi olarak tanımlandığında, otomatik belirleme seçeneği ile toprak yapısının 2 katmandan oluştuğu belirlenmiştir (Grafik 7, Senaryo Kodu: 2KT). Sonraki aşamada, aynı ölçüm verileri ile manuel olarak toprak katman sayısı 4 (Senaryo Kodu: 4KT) seçilerek elde edilen değerler Grafik 8’de gösterilmiştir.

Grafik 7: 2 Katmanlı Toprak Yapısı (Otomatik).



Grafik 8: 4 Katmanlı Toprak Yapısı (Manuel).



Grafik 7 ve Grafik 8’de gösterilen katman yapıları farklı senaryolarda incelenmiştir. 2 katmanlı ve 4 katmanlı toprak yapısı için 5’er adet senaryo bulunmaktadır. Her bir senaryo için, arıza esnasında toprağa giren akım genliği 2, 5 ve 20 kA olacak şekilde ayrı ayrı incelenmiştir. Bu senaryolar aşağıda Tablo 5’de gösterilmiştir. Örneğin, 4KT-S1 numaralı senaryo; toprak

yapısının 4 katmanlı olduğunu ve birinci senaryo olduğunu ifade etmektedir. Bu senaryoda, TM'nin topraklama sisteminin mevcut yapısındaki (2KT-S0) topraklama kazık uzunluğu ve çapı 2 kat büyütülerek, bu değişimin, dokunma ve adım gerilimi, etki alanı bakımından topraklama sistemi performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tablo. 5 Senaryo Detayları.

| Senaryo No. | Senaryo Detayı | İncelenen Parametre |
|---------------|--|---|
| 2KT-S0/4KT-S0 | - TM Mevcut Topraklama Sistemi | - |
| 2KT-S1/4KT-S1 | - Topraklama Kazık Boyu 5 m | Kazık Boyunun 2 Kat Artırılmasının Topraklama Performansı Üzerindeki Etkisi. |
| 2KT-S2/4KT-S2 | - Topraklama Kazık Boyu 9 m - Topraklama Kazık Çapı 44 mm | Hem Kazık Boyunun Artırılması Hem de Çapının 2 Kat Büyütülmesinin Topraklama Performansı Üzerindeki Etkisi. |
| 2KT-S3/4KT-S3 | - Topraklama Kazık Boyu 9 m - Topraklama Kazık Çapı 44 mm - Ağ Derinliği 2 m | 2KT-S2 Senaryosuna Ek Olarak Ağ Derinliği 0.8 Metreye Yerine 2 Metreye Gömülmesinin Topraklama Performansı Üzerindeki Etkisi. |
| 2KT-S4/4KT-S4 | - Topraklama Kazık Boyu Aynı - Topraklama Kazık Çapı Aynı - Ağ Derinliği 2 m | 2KT-S0 Senaryosuna Ek Olarak Ağ Derinliği 0.8 Metreye Yerine 2 Metreye Gömülmesinin Topraklama Performansı Üzerindeki Etkisi. |

3.1. Senaryo Analiz Sonuçları

Çalışmanın bu kısmında yalnızca 2KT-S0 senaryosuna ait analiz görsellerine yer verilmiştir. Bunun nedeni, sonuçların farklı senaryolara ait görsel çıktılar üzerinde net ve anlaşılır bir biçimde karşılaştırılmamasıdır. Bundan dolayı, Tablo 5'de verilen tüm senaryolara ait sonuçlar detaylı bir şekilde Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir.

Çalışma frekansı 50 Hz olmak üzere, arıza esnasında toprağa dönüş akımları 2-5-20 kA olması durumunda elde edilen EPR ve TM topraklama sistemi direnci (R_e) değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'dan görüldüğü üzere farklı akım seviyeleri için toprak direnci değeri değişmemektedir. Bu değer, görünür toprak özgül direnci, iletken tipi, kesiti, vb. gibi doğrudan fiziksel tasarım parametreleri ile ilişkili olup, arıza esnasındaki toprağa dönüş akımından bağımsızdır. Ancak, EPR değeri topraklama direnci sabit olduğu için artan akım ile birlikte orantılı biçimde arttığı görülmektedir.

Tablo. 6 2KT-S0 için EPR ve R_e Değerleri.

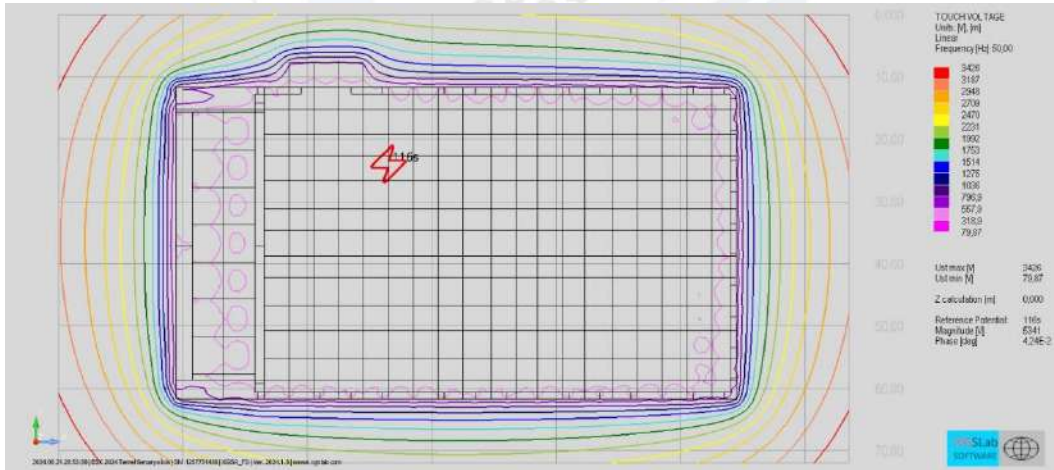
| Frekans [Hz] | I_e [kA] | EPR [kV] | R_e [Ω] |
|--------------|------------|----------|--------------------|
| 50 | 20 | 53.409 | 2.67 |
| | 5 | 13.352 | |
| | 2 | 5.340 | |

TM topraklama sistemlerinde dokunma ve adım gerilimleri ilgili standartlarda/şartnamelerde izin verilen limitler içinde tutularak canlıların güvenliğini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca, TEİAŞ şartnamesinde yer alan “Topraklama sistemi tasarımında şalt sahası (iç fensin içi) içerisinde ayakkabılı durum dikkate alınacaktır. İç fens ile dış fens arasında idari binalar, lojman, dinlenme alanı vb. bulunması sebebi ile ayakkabısız durum dikkate alınacaktır. Dış fense dışarıdan dokunulması durumu için ayakkabısız durum dikkate alınacaktır.” ifade baz alındığında analiz edilen alanın sadece iç fense sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple dokunma gerilimi analizi ayakkabılı durum için yapılmıştır. Mevcut ağ çakıl ile kaplandığı için, Tablo 4’de verilen çakıl kaplamaya ait olan dokunma gerilimi seviyesi dikkate alınmıştır.

3.1.1. 2KT-S0 Senaryosu 2 kA İçin Analiz Sonuçları

Aşağıda Grafik 9’da arıza meydana geldiğinde toprağa giren akım 2 kA iken oluşan dokunma gerilimi eğrileri verilmiştir. Şekilde yer alan kırmızı renkli yıldırım sembolü arıza noktasının lokasyonunu göstermektedir. Bu nokta, arızanın transformatörün 154 kV’luk tarafında olduğunu temsil etmektedir. Dokunma gerilimi eğrileri incelendiğinde, topraklama ağının iç kısımlarındaki dokunma gerilimi değerlerinin şartnamede ayakkabılı durum için müsaade edilen 1.92 kV’dan (Tablo 4) daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Belirtilen şartlar altında topraklama ağının bütün kısımlarında dokunma gerilimi kriterinin sağlandığı tespit edilmiştir.

Grafik 9: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (2 kA) Oluşan Dokunma Gerilimi Konturları.

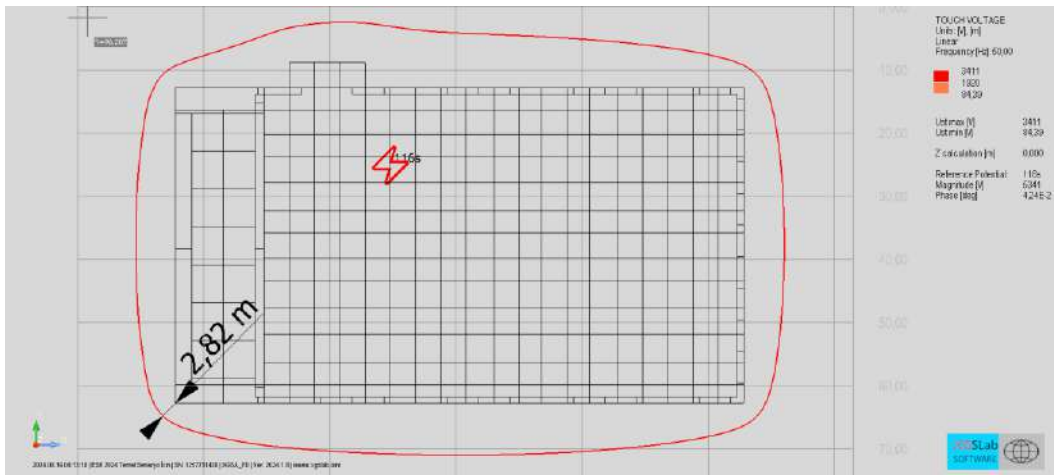


Bununla birlikte şekildeki eğriler dikkate alındığında 1.92 kV’luk konturun ağın dış kısmından daha ileri bir bölgede (fensin dışında kalan 1 metrelik sınırın ötesi) oluştuğu görülmektedir (Grafik 10). Diğer bir ifade ile, ağın belirli bir mesafedeki dış kısmı dahi dokunma gerilimi açısından güvenli bölgededir. Bu durumda, ağın dışarısında kalan bölgelerde herhangi bir canlının dokunacağı bir iletken bulunmamasından dolayı bu bölgelerin izin verilen dokunma geriliminde olma gereksinimi yoktur. Bu nedenle, sınır konturunun ağa daha yakın bir noktaya

çekilebilmesi için tasarım aşamasında daha az iletken kullanılarak uygulama gerçekleştirilebilir. Böylelikle tasarım maliyetinde de önemli oranda düşüş sağlanmış olur.

Tasarım maliyetindeki düşüşü gözlemek amacıyla, mevcut topraklama ağında iletken sayısının azaltılması ve bunun izin verilen dokunma gerilimi konturunda ne ölçüde daralma meydana getirdiğini gösteren bir çalışma yapılmıştır. Mevcut topraklama ağındaki yatay ve dikey iletkenlerin yaklaşık % 40'lık kısmı (1000 m) çıkarılmış olup, kazık sayılarında değişiklik yapılmamıştır.

Grafik 10: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (2 kA) Oluşan 1.92 kV Dokunma Gerilimi Konturu.

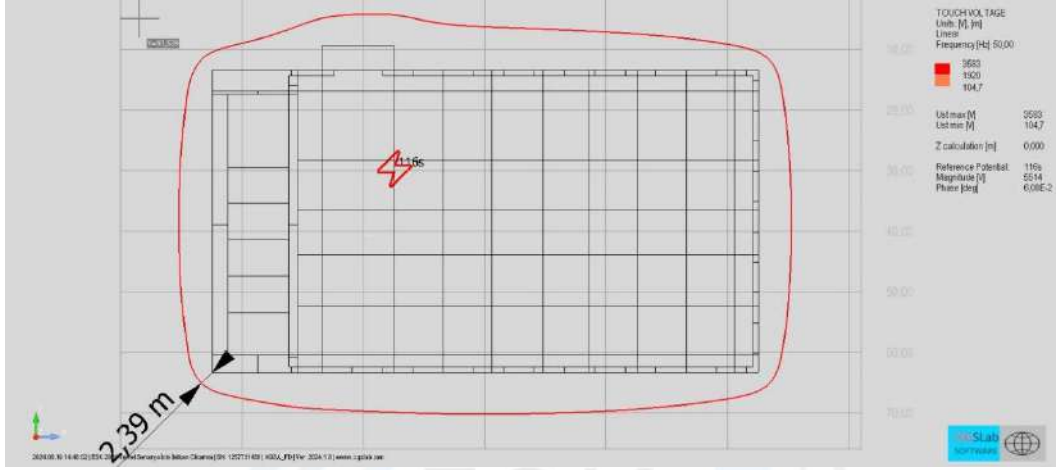


İletken çıkarılan senaryonun EPR, toprak direnci, dokunma gerilimi değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Grafik 11'den görüldüğü üzere topraklama ağından belirli miktarda iletken çıkarılması durumunda dahi izin verilen dokunma gerilimi konturunun topraklama ağını çevrelediği görülmektedir. Mevcut durumdaki izin verilen dokunma gerilimi konturunun ağa en yakın noktası 2.82 metre iken (Grafik 10), iletken çıkarıldıktan sonra bu mesafenin 2.39 metreye düştüğü (Grafik 11) görülmüştür. Her iki durumda da topraklama ağı dokunma gerilimi bakımından güvenli bölge içerisinde kalmakta olup, 2 kA arıza durumunda güvenli bölgenin sağlanması için Grafik 11'deki gibi bir topraklama sisteminin de alternatif olarak tasarlanabileceği anlaşılmaktadır. Böylelikle, maliyet açısından önemli ölçüde tasarruf sağlanabilmektedir.

Ayrıca, EPR sınır değerleri, arıza temizleme süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Referans alınan TEİAŞ şartnamesine göre, arıza temizleme süresi 0.2 saniye olup, [15]'e göre sınır yüzey potansiyel gerilim değeri 1500 V'tur. Meydana gelen arızanın belirlenen sınırlar içindeki üçüncü parti yapılara etkilerini değerlendirmek için 1500 V'luk etki alanı konturu

Google Earth üzerinde çizdirilerek incelenmiştir. 2KT-S0 için yapılan analizler sonucunda 1500 V'luk EPR konturunun etki alanının gösterildiği Google Earth görseli Grafik 12'de verilmiştir. Topraklama ağının merkezi referans alındığında yarıçapı 91 metre olan bir dairesel alan oluşmaktadır. Diğer bir ifade ile, bu alan içerisinde kalan üçüncü parti yapılar toprak yüzeyinde minimum 1500 V'luk bir gerilim artışına maruz kalmaktadırlar.

Grafik 11: 2KT-S0 İletken Çıkarılan Senaryoya Ait Arıza Durumunda (2 kA) Oluşan 1.92 kV Dokunma Gerilimi Konturu.



Grafik 12: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (2 kA) Oluşan 1.5 kV EPR Konturunun Etki Alanı.

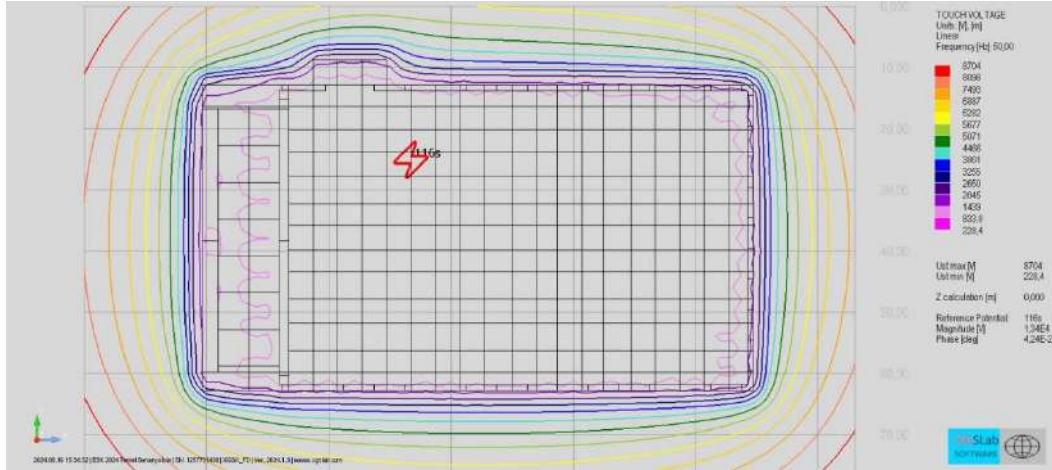


3.1.2. 2KT-S0 Senaryosu 5 kA İçin Analiz Sonuçları:

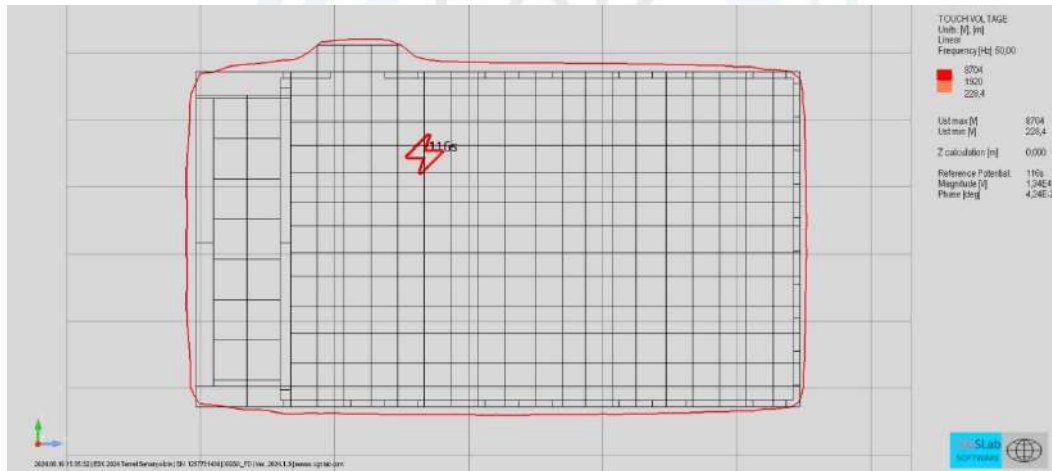
Bu alt senaryoda, mevcut topraklama ağının 2 katmanlı toprak yapısı için toprak geri dönüş akımı 5 kA alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda 5 kA toprak geri dönüş akımı için, topraklama sisteminin performansı dokunma gerilimi ve etki alanı bakımından

incelenmiştir. Grafik 13 ve 14’de sırasıyla 2KT-S0 senaryosuna ait arıza durumunda meydana gelen dokunma gerilimi konturları ve izin verilen dokunma gerilimi (1.92 kV) konturu yer almaktadır.

Grafik 13: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (5 kA) Oluşan Dokunma Gerilimi Konturları.



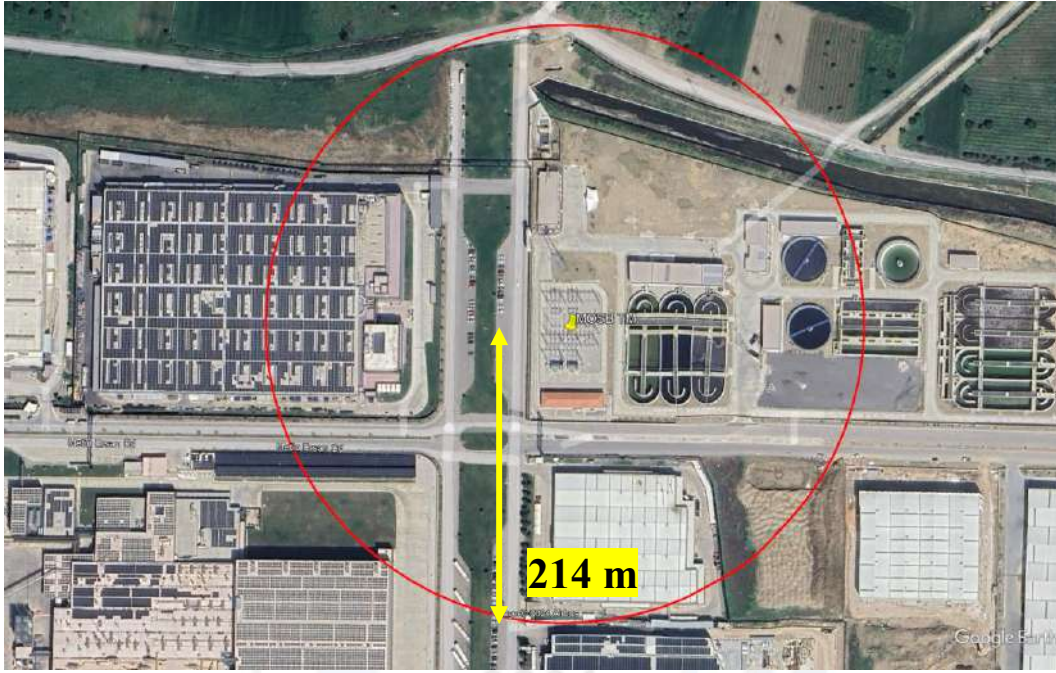
Grafik 14: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (5 kA) Oluşan 1.92 kV Dokunma Gerilimi Konturu.



Analiz sonucunda, can güvenliği bakımından bu konturun ağa en yakın noktasının fense en az 1 metre mesafede olması, yani fensin dışında kalan ağına çevrelenmesi beklenmektedir. Ancak, Grafik 15’de yer alan izin verilen dokunma gerilimi konturunun topraklama ağına çevrelenmesine rağmen, bu konturun ağa çok yakın olduğu ve hatta ağına köşe noktalarının bu konturun dışında kaldığı tespit edilmiştir. Mevcut topraklama sistemi tasarımının, arıza esnasında köşe noktalardan birine temasta bulunan herhangi bir canlı için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, güvenilir koşulların sağlanabilmesi için tasarım aşamasında ağa iletken eklenmesi veya kazık sayısının artırılması gibi uygulamaların yapılması önem arz etmektedir.

2KT-S0 senaryosuna ait 2 kA alt senaryosunda, etki alanı yarıçapı 91 metre iken, Grafik 15’de görüldüğü gibi 5 kA alt senaryosunda ise bu durum 214 metreye yükselmiştir. Sonuç olarak olası bir arızadan olumsuz olarak etkilenecek üçüncü parti yapı sayısında artış meydana geldiği iki görsel karşılaştırıldığında açıkça gözlemlenmiştir.

Grafik 15: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (5 kA) Oluşan 1.5 kV EPR Konturunun Etki Alanı.

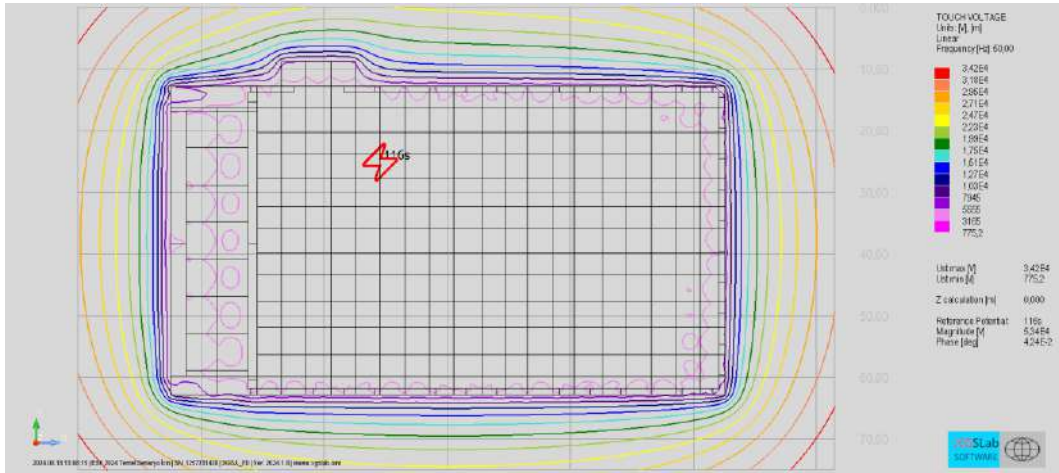


3.1.3. 2KT-S0 Senaryosu 20 kA İçin Analiz Sonuçları:

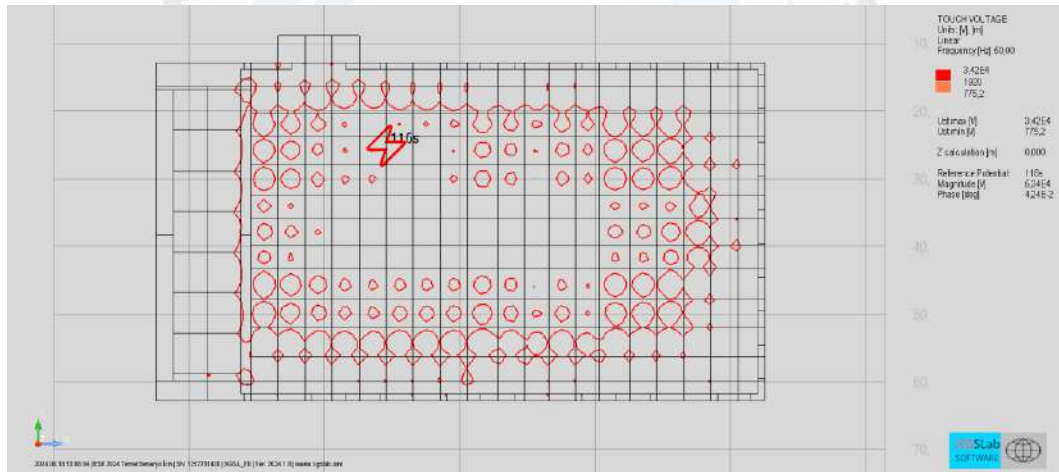
Bu alt senaryoda, mevcut topraklama ağının 2 katmanlı toprak yapısı için toprak geri dönüş akımı 20 kA alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda 20 kA toprak geri dönüş akımı için, topraklama sisteminin performansı dokunma gerilimi ve etki alanı bakımından incelenmiştir. Grafik 16 ve 17’de sırasıyla 2KT-S0 senaryosuna ait arıza durumunda meydana gelen dokunma gerilimi konturları ve izin verilen dokunma gerilimi (1.92 kV) konturu yer almaktadır.

20 kA toprağa dönüş akımı var olduğunda, izin verilen dokunma gerilimi seviyesinin ağır iç kısmında kaldığı Grafik 17’de görülmektedir. Dolayısıyla mevcut tasarımın, 20 kA toprağa dönüş akımı seviyesi için dokunma gerilimi bakımından güvenli olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumun, topraklama sisteminin tasarım aşamasında analizler ile öngörülmesi ve gerekli tasarım güncellemelerinin (iletken miktarının ve kazık sayısının artırılması, ağ geometrisinin güçlendirilmesi) yapılması gerekmektedir.

Grafik 16: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (20 kA) Oluşan Dokunma Gerilimi Konturları.

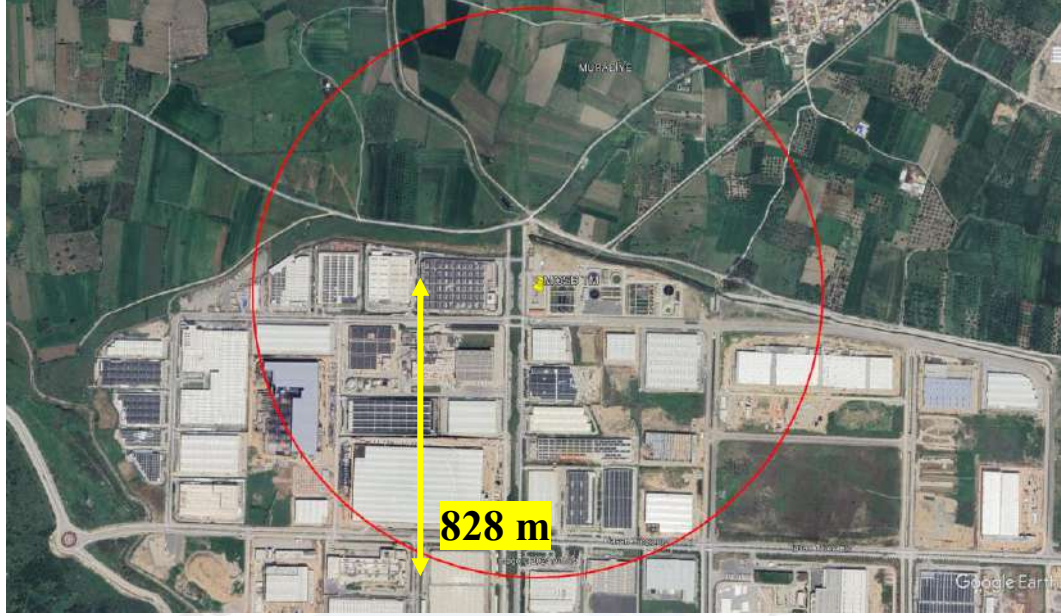


Grafik 17: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (20 kA) Oluşan 1.92 kV Dokunma Gerilimi Konturu.



2KT-S0 senaryosuna ait 20 kA alt senaryosunda, Grafik 18'de belirtildiği gibi etki alanı yarıçapı 828 metre olarak tespit edilmiştir. İken, diğer alt senaryolar ile kıyaslandığında, olası bir arızadan olumsuz olarak etkilenecek üçüncü parti yapı sayısında artış gözlemlenmiştir. Etki alanının incelendiği bu üç alt senaryodan anlaşılacağı üzere, etki alanının büyüklüğü, toprağa dönüş akımının genliği ile doğrudan ilişkilidir. Sonuç olarak, toprağa dönüş akımının artması arızadan olumsuz etkilenen yapı sayısını da artırmaktadır.

Grafik 18: 2KT-S0 Senaryosuna Ait Arıza Durumunda (20 kA) Oluşan 1.5 kV EPR Konturunun Etki Alanı.



Tablo 7 ve Tablo 8’de çalışılan senaryolarda elde edilen sayısal sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur. Maksimum dokunma geriliminin belirlenmesi için, fens köşesine 1 metre mesafedeki kontur seçilmelidir. Bu kritere göre, 5 ve 20 kA alt senaryolarında istenen koşul sağlanmadığından dolayı iletken çıkarma işlemi gerçekleştirilerek tasarımın güncellenmesi durumu incelenmemiştir. Bu nedenle, tablolardaki İletken Çıkarma (İÇ) senaryoları sadece 2 kA toprağa dönüş akımı için incelenmiş olup, 5 ve 20 kA kısımları × ile gösterilmiştir. İletken çıkartılan her senaryo farklı ağ uzunluğuna sahip olup, iletken optimizasyonu yapılmamıştır. Ek olarak, bu senaryolarda topraklama kazığı sayısı değiştirilmemiştir. Burada amaç, mevcut topraklama ağından iletken çıkarılmasının (mevcut ağ toplam iletken uzunluğunun yaklaşık %40-%60 oranında) topraklama sistemi performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

Tablo. 7 2 Katmanlı Toprak Yapısı İçin Senaryolara Ait Detaylı Sonuçlar.

| Senaryolar | Toprak Empedansı [Ω] | EPR [kV] | | | Ağ Uzunluğu [m] | Maksimum Dokunma Gerilimi [kV] | | | İzin Verilen Dokunma Gerilimi* [kV] | Etki Alanı Yarıçapı [m] | | |
|------------|----------------------|----------|-------|------|-----------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------|-------|-------|
| | | 20kA | 5kA | 2kA | | 20kA | 5kA | 2kA | | 20kA | 5kA | 2kA |
| 2KT-S0 | 2.670 | 53.40 | 13.30 | 5.30 | 2403 | 8.646 | 2.186 | 0.910 | 1.92 | 828 | 214 | 91 |
| 2KT-S0-İÇ | 2.749 | × | × | 5.50 | 1475 | × | × | 0.933 | | × | × | 91.25 |
| 2KT-S1 | 2.628 | 52.56 | 13.14 | 5.26 | 2403 | 8.865 | 2.059 | 0.826 | | 828.8 | 210.8 | 91.05 |
| 2KT-S1-İÇ | 2.739 | × | × | 5.48 | 1250 | × | × | 0.886 | | × | × | 91.34 |
| 2KT-S2 | 2.496 | 49.91 | 12.48 | 4.99 | 2403 | 7.619 | 1.792 | 0.909 | | 828.4 | 211.2 | 91.10 |
| 2KT-S2-İÇ | 2.594 | × | × | 5.19 | 1003 | × | × | 1.189 | | × | × | 91.21 |
| 2KT-S3 | 2.404 | 48.08 | 12.02 | 4.80 | 2403 | 7.037 | 1.871 | 0.866 | | 829.1 | 210.2 | 90.90 |
| 2KT-S3-İÇ | 2.471 | × | × | 4.94 | 1020 | × | × | 0.997 | | × | × | 91.51 |
| 2KT-S4 | 2.561 | 51.22 | 12.81 | 5.12 | 2403 | 8.680 | 2.261 | 0.941 | | 828.1 | 210.4 | 91.21 |
| 2KT-S4-İÇ | 2.661 | × | × | 5.32 | 1293 | × | × | 0.941 | | × | × | 91.54 |

Tablo. 8 4 Katmanlı Toprak Yapısı İçin Senaryolara Ait Detaylı Sonuçlar.

| Senaryolar | Toprak Empedansı [Ω] | EPR [kV] | | | Ağ Uzunluğu [m] | Maksimum Dokunma Gerilimi [kV] | | | İzin Verilen Dokunma Gerilimi* [kV] | Etki Alanı Yarıçapı [m] | | |
|------------|----------------------|----------|-------|------|-----------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------|--------|-------|
| | | 20kA | 5kA | 2kA | | 20kA | 5kA | 2kA | | 20kA | 5kA | 2kA |
| 4KT-S0 | 2.669 | 53.38 | 13.35 | 5.34 | 2403 | 9.056 | 2.274 | 0.910 | 1.92 | 850.68 | 215 | 91.30 |
| 4KT-S0-İÇ | 2.782 | × | × | 5.56 | 1333 | × | × | 0.987 | | × | × | 91.36 |
| 4KT-S1 | 2.628 | 52.55 | 13.14 | 5.26 | 2403 | 8.683 | 2.166 | 0.868 | | 849.46 | 214.84 | 91.72 |
| 4KT-S1-İÇ | 2.748 | × | × | 5.50 | 1177 | × | × | 0.934 | | × | × | 91.80 |
| 4KT-S2 | 2.527 | 50.55 | 12.64 | 5.05 | 2403 | 7.795 | 1.995 | 0.798 | | 847.57 | 214.39 | 91.10 |
| 4KT-S2-İÇ | 2.592 | × | × | 5.18 | 1203 | × | × | 0.815 | | × | × | 91.61 |
| 4KT-S3 | 2.273 | 45.46 | 11.36 | 4.54 | 2403 | 6.819 | 1.692 | 0.687 | | 847.22 | 214.85 | 91.45 |
| 4KT-S3-İÇ | 2.305 | × | × | 4.61 | 1187 | × | × | 0.769 | | × | × | 91.87 |
| 4KT-S4 | 2.560 | 51.21 | 12.80 | 5.12 | 2403 | 8.761 | 2.211 | 0.891 | | 846.34 | 215 | 91.70 |
| 4KT-S4-İÇ | 2.654 | × | × | 5.31 | 1353 | × | × | 1.007 | | × | × | 91.75 |

*Revize Edilen TEİAŞ Topraklama Şartnamesi
İÇ = İletken Çıkarılmış

3.2. Değerlendirmeler

3.2.1. Toprak Katman Yapısı:

Toprak katman yapısının topraklama performansı üzerindeki etkisi Tablo 7 ve Tablo 8 üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenebilmektedir.

2KT-S2 ile 4KT-S2 ve 2KT-S3 ile 4KT-S3 senaryoları (bu senaryolarda topraklama kazık boyu 9 metre olarak belirlenmiştir) dışında, toprak yapısının 2 veya 4 katmanlı olmasının EPR, dokunma gerilimi ve etki alanı yarıçapı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, 2 ve 4 katmanlı toprak yapılarının birinci katmanlarının görünür toprak özgül direnci değerlerinin ve katman derinliklerinin birbirine oldukça yakın olmasıdır. Ayrıca, söz konusu senaryolarda kullanılan tüm topraklama sistemi bileşenleri birinci katman içinde yer almaktadır. Bu nedenle, katman sayısı farklı olsa bile topraklayıcıların bulunduğu katmanların benzer özellikte olması, analiz sonuçlarını etkilememektedir.

Ancak, bir önceki paragrafta belirtilen dört senaryoda topraklama kazıklarının boyu 9 metredir ve bu senaryolarda topraklama sisteminin bir kısmı (topraklama kazıkları) ikinci katman içerisinde yer almaktadır. 2 ve 4 katmanlı toprak yapılarındaki ikinci katmanların görünür toprak özgül direnç değerleri birbirinden farklı olduğundan, 2KT-S2 ile 4KT-S2 ve 2KT-S3 ile 4KT-S3 senaryolarında incelenen sonuçlar arasında değişiklikler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, toprak katmanlarının görünür özgül direnç değerlerinin farklı olması ve topraklama bileşenlerinin birden fazla katman içinde yer alması, analiz sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Toprak yapısına bağlı olarak görünür toprak özgül direnci değerindeki değişim (toprak dönüş akımının genliği sabit kaldığında) etki alanı çapında değişikliklere yol açmaktadır. Bu etki alanı

içinde bulunan üçüncü parti tesislerdeki ekipmanın aşırı gerilime ve bireylerin aşırı dokunma gerilimine maruz kalma riski, ayrıca metal iletkenler aracılığıyla uzak noktalarda transfer gerilimlerinin oluşup oluşmadığı dikkatle incelenmelidir.

Bu bağlamda, kritik öneme sahip bir diğer konu ise toprak yapısının çok bölgeli olması durumudur. Çok bölgeli toprak yapısı, farklı özellikteki toprak katmanları anlamına gelmektedir. Bu tür bir yapıda, topraklama sisteminin birden fazla bölge içinde bulunması, topraklama performansını önemli ölçüde etkileyecektir

3.2.2. Ölçüm Tekniği:

Topraklama sistemi tasarımının ve hesaplamalarının tutarlılığını sağlamak için, tasarım aşamasından önce toprak yapısının ve görünür toprak özgül direnci değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, sahadaki farklı noktalardan yeterli çoklukta ölçümler yapılmalıdır. Bu ölçümlerde (Wenner Yöntemi) özellikle akım ve gerilim elektrotları arasındaki mesafeler için revize edilen TEİAŞ Topraklama Şartnamesi EK01'de belirtilen elektrot açıklıklarının kullanılması, doğru toprak yapısının tespiti açısından büyük önem taşımaktadır.

3.2.3. Toprak Dönüş Akımı:

Toprak dönüş akımının faz-toprak kısa devre arızaları sırasında etki alanı üzerindeki etkisi, analizlerle ortaya konulmuştur. Örneğin, 2KT-S0 senaryosunda toprak dönüş akımının 2 kA'den 5 kA'e yükselmesi, etki alanı çapının yaklaşık %130 oranında arttığını göstermektedir. Bu durum, etki alanı yarıçapındaki değişimin, toprak dönüş akımı genliğindeki artışla doğru orantılı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, uygulama öncesinde yapılacak kısa devre ve toprak dönüş akımı hesaplamalarının, topraklama sistemlerinin tasarımında kritik bir rol oynadığı net bir şekilde görülmektedir.

3.2.4. Arıza Temizleme Süresi:

Kısa devre akımının arıza temizleme süresi, etki alanı açısından önemli bir diğer parametredir. Revize edilen TEİAŞ Topraklama Şartnamesinde belirtildiği üzere, bu süre çalışmada 0.2 saniye olarak seçilmiştir. ITU-T K.68 Standardına göre, 0.2 saniyelik arıza temizleme süresi için dikkate alınması gereken EPR sınır kontur değeri 1500 V'tur. Ancak, farklı arıza temizleme süreleri için bu sınır değeri değişiklik göstermektedir. Örneğin, 0.5 saniyelik süre için sınır değer 650 V olarak belirlenmiştir. Bu sınır değerler arasındaki farklılık, etki alanı yarıçapını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, tasarım öncesinde arıza temizleme süresinin ve bu süreye karşılık gelen EPR sınır kontur değerinin ilgili mevzuata göre belirlenmesi büyük önem

taşımaktadır. Aksi takdirde, olası faz-toprak arızalarında sınır kontur içinde kalan üçüncü parti yapılar, teçhizat ve can güvenliği açısından olumsuz etkilenecektir.

3.2.5. Dokunma Gerilimi:

Analiz sonuçlarına göre, 2 ve 5 kA toprak geri dönüş akımı için mevcut tasarımın dokunma gerilimi açısından yeterli olduğu ve TM'nin tamamının güvenli bir alanda kaldığı görülmektedir. Ancak, 20 kA toprak geri dönüş akımı durumunda mevcut tasarımın yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, tasarım öncesinde toprağa geri dönüş akımının alacağı maksimum değer doğru bir şekilde hesaplanması ve analizlerin en kötü koşulun dikkate alınarak yapılması kritik bir husustur.

Topraklama ağında kullanılan iletken ve topraklama kazığı miktarı azaltılarak, hesaplanan dokunma gerilimi değeri, izin verilen dokunma gerilimine yaklaştırılabilir. Bu şekilde, topraklama şebekesinde kullanılan örgülü bakır iletkenler ve çubukların miktarının optimize edilmesi, yatırım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin, 2KT-S0 senaryosunun 2 kA alt senaryosunda, izin verilen dokunma gerilimi (1.92 kV) konturu, fensin köşesinden 2.82 metre mesafededir. İletken uzunluğunda yaklaşık % 40 oranında bir azaltma yapıldığında (kazık sayısı değişmemiştir), 1.92 kV'luk konturun fensin köşesine olan mesafesinin 2.39 metreye düştüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, en kötü senaryo dikkate alındığında, ilgili izin verilen dokunma gerilimi konturunun fensin köşesine 1 metreden daha fazla mesafede olması durumunda, topraklama ağından iletken çıkartılarak ağ geometrisi güncellenebilir ve böylece bakır maliyeti optimize edilebilir.

3.2.6. Ağ Gömülme Derinliği:

Ağın toprağa gömülme derinliğinin topraklama sistemi performansına etkisi her iki katman yapısı için de S0 ve S4 senaryolarının karşılaştırması ile incelenmiştir. Mevcut senaryoda (S0) ağ 0.8 metre derinliğe gömülü haldeyken, S4 senaryosunda ağ modeli 2 metre derinliğe gömülmüştür. Ağın 0.8 yerine 2 metreye gömülmesi toprak empedansının azalmasına ve dolaylı olarak EPR değerinin düşmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak ağın daha derine gömülmesi topraklama sistemi performansında gözle görülür değişim meydana getirmektedir.

2 metre derinliğe gömülen ağın kazık boyu da dikkate alındığında; 2 katmanlı toprak yapısında ağ hem birinci hem de ikinci katman içinde yer alırken, 4 katmanlı toprak yapısında ağ yalnızca birinci katmanda kalmaktadır. Dolayısıyla, her iki durumdaki toprak geçiş empedansları katman yapılarının ve sayılarının farklı olmasından dolayı değişmektedir. Ancak, ağın daha derine gömülmesinin topraklama sistemi performansını olumlu yönde etkileyeceği şeklinde bir

genelleme yapılması doğru değildir. Topraklama sistemi performansının artırılması için ağın daha derine gömülmesi gerekiyorsa hem toprak yapısı hem de uygulama maliyeti açısından değerlendirme ve analizlerin yapılması gerekmektedir.

3.2.7. Kazık Boyu ve Çapı:

Her iki katman için de temel senaryo (S0) ile kazık boyunun 2.5'dan 5 metreye çıkartıldığı senaryoda (S1) toprak empedansları ve EPR değerleri yaklaşık %1.6 oranında azalmıştır.

Hem kazık boyu 9 metre hem de kazık çapı 44 mm olarak analiz edilen senaryoda (S2) ise temel senaryoya kıyasla toprak empedansı ve EPR açısından sırasıyla %6.5 (2KT-S2) ve %5.4 (4KT-S2) oranında azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu değişimlerin birbirinden farklı olmasının temel sebebi, ağın belirli kısmının ikinci katmanda yer alması ve bu katmandaki görünür toprak özgül direnç değerlerinin birbirinden farklı olmasıdır.

Kazık boyunun 9 metre, kazık çapının 44 mm ve ağ gömülme derinliğinin 2 metre olduğu S3 senaryosu temel senaryo ile karşılaştırıldığında toprak empedansı ve EPR değerlerinin %10 (2KT-S3) ve %15.8 (4KT-S3) oranında azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu değişimlerin birbirinden farklı olmasının temel sebebi tıpkı bir önceki paragrafta açıklandığı, ağın farklı katmanlarda yer almasıdır. Buradaki farkın fazla olmasının sebebi 4 katmanlı toprak yapısında ağ modelinin birinci, ikinci ve üçüncü katmanlarda yer almasından dolayı ortaya çıkan görünür toprak özgül direncindeki değişimdir.

Sonuç olarak, kazık boyunun ve kazık çapının artırılması, topraklama sistemi performansına olumlu katkı sağlamaktadır. Ancak, boy ve çap gibi fiziksel parametrelerin değişiminden daha önemli olan husus, iletkenlerin katmanlı toprak yapısında hangi katman içerisinde yer aldığıdır. Her bir katmanın derinliği ve özgül direnci farklı olduğundan, ağın bulunduğu bölgeye göre arıza esnasında topraklama sisteminin performansı değişiklik gösterecektir. Bu açıdan daha önce de belirtildiği gibi toprak katman yapısının doğru belirlenmesi ve analizlerin en kötü koşullara göre gerçekleştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir TM'nin topraklama sistemi tasarımı XGSLab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, farklı katman sayısına sahip topraklama sistemlerinde faz-toprak arızası geri dönüş akımı genliğinin etki alanına ve dokunma gerilimi üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Elde edilen sonuçlar revize edilen TEİAŞ Topraklama Şartnamesine göre incelenmiştir. Ayrıca, XGSLab yazılımında kazık çapı, kazık uzunluğu ve yatay iletken uzunluğu gibi fiziksel parametrelerin yanı sıra toprağa giren akımın genliğindeki değişimlerin

topraklama sistemi performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

- Toprağa geri dönüş akımının tasarım öncesinde doğru bir şekilde hesaplanması, kullanılacak bakır iletken ve elektrot miktarının optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Böylelikle, eş zamanlı olarak yatırım maliyetinden tasarruf etmek mümkün olabilmektedir.
- Toprağa geri dönüş akımının genliği ve arıza temizleme süresi etki alanı üzerinde belirleyici olan başlıca iki parametredir.
- Müsaade edilebilir dokunma geriliminin belirlenmesinde, mevzuatta belirtilen; arıza temizleme süresi, topraklama ağının yüzey kaplaması (çakıl, vb.), personel güvenlik ekipmanları (eldiven ve ayakkabı) doğrudan etkin olan bileşenlerdir.
- Sonuçlar, topraklama sistemi tasarımı ve analizinde bilgisayar destekli analiz programlarının kullanılmasının kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, tasarım doğruluğunun ve ilgili mevzuata uygunluğun sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Gelecek çalışmalarda, arızanın konumu, arıza tipi (faz-faz-toprak, vb.), katmanlı ve çok bölgeli toprak yapıları dikkate alınarak etki alanı, dokunma gerilimi ve adım gerilimi üzerindeki etkileri incelenecektir. Ayrıca, Wenner yöntemindeki ölçüm sayısının ve akım gerilim elektrotları arasındaki mesafe değişiminin görünür toprak özgül direncini belirleme üzerindeki etkileri araştırılacak ve maliyet optimizasyonu için analizler yapılacaktır. Bir diğer çalışma, XGSLab kullanılarak TS EN IEC 62305-1:2010, TS EN IEC 61936-1:2021 Ek E ve IEEE 998 standartlarına göre, aynı TM'de (devre kesiciler, akım trafoları, gerilim trafoları vb.) birincil ekipmanlara doğrudan yıldırım düşmesi etkilerini değerlendirme ve oluşabilecek olumsuz etkileri azaltma önlemlerinin alınmasını içerecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Nassif, A. B., Agüero, J. R., ve Dong, M., “Practical Charts for Sizing Neutral Grounding Elements for Machine-Based Distributed Energy Source Step-Up Transformers,” IEEE Trans. Power Syst., 37, 2483–2486, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3156439.
- [2] Saleh, S. A., vd., “Experimental Assessment of Grounding System Impacts on Ground Currents and Transient Overvoltage,” IEEE Trans. Ind. Appl., 58, 5987–6001, 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3189614.
- [3] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [4] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013.
- [5] “TEİAŞ Topraklama Sistemi Şartnamesi,” Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, 2024.
- [6] “XGSLab,” Erişim Tarihi: 10.06.2024, [Çevrimiçi]. <https://www.xgslab.com/xgslab/general>
- [7] CIGRE Report 781, “Power system technical performance Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems,” 1-145, 2019.
- [8] Hasan, H., “Characterisation of earthing systems and materials under DC, variable frequency and impulse conditions,” 4, 1–190, 2017.
- [9] Kouros, M., “Transient Behaviour of Grounding Grids,” Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, 2020.
- [10] “TEİAŞ Yük Tevzi Kontrol Merkezi,” Erişim Tarihi: 13.07.2024, [Çevrimiçi]. <https://www.teias.gov.tr/yuk-tevzi-kontrol-merkezleri>
- [11] “TS EN IEC 61936-1,” Türk Standartları Enstitüsü, 2021.
- [12] “TS EN 50522,” Türk Standartları Enstitüsü, 2022.
- [13] Cheytani, M. ve Chan, S. L. I., “The applicability of the Wenner method for resistivity measurement of concrete in atmospheric conditions,” Case Stud. Constr. Mater., 15, e00663, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00663.
- [14] “XGSLab User’s Guide,” Erişim Tarihi: 17.07.2024. [Çevrimiçi]. <https://www.xgslab.com/>
- [15] “Operator responsibilities in the management of electromagnetic interference by power systems on telecommunication systems,” International Telecommunication Union, 2008.
- [16] “TS EN IEC 60479-1,” Türk Standartları Enstitüsü, 2018.

110: Güneş Enerjisi Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Devlet Teşvikleri: Çin Uygulamaları Bağlamında Türkiye Değerlendirmesi ve Politika Önerileri

Elif Gözde Doyuran

Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Enerji Ekonomisi ve Yönetimi
Doktora Programı

ÖZET

Bu araştırmada, Çin ve Türkiye'de fotovoltaik gelişimini destekleyen önemli devlet teşvik mekanizmaları ele alınmış ve her iki ülke için karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Karşılaştırmalı analiz ışığında Çin örneğinden Türkiye için alınan dersler belirlenmiş ve Türkiye'deki teşvik mekanizmalarının daha fazla geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için politika önerileri yapılmıştır.

Çin kapsamında, fotovoltaik endüstrisini güçlendirmeye katkı sağlayan Golden Sun Programı ve FiT mekanizması, güçlü ve zayıf yönleri perspektifinde analiz edilmiştir. Türkiye için ise aynı analiz YEKDEM ve YEKA mekanizmaları için yapılmıştır. Her iki ülkedeki devlet teşviklerinin karşılaştırmalı analizinin bulguları, Türkiye'nin Çin mekanizmalarındaki zayıflıklardan çıkaracağı dersler olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, herhangi bir teşvik mekanizması tasarlamadan önce, Türkiye'deki ilgili mercilerin uygun politika tasarımı ve izleme mekanizmaları ile güçlü yönetim yapısı açısından gerekli düzenlemeleri yapması ve Ar-Ge bileşenini güçlendirmesi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş, Fotovoltaik, Devlet, Teşvik, Tarife

ABSTRACT

In this research, major government subsidies that support solar PV development in China and Türkiye have been analysed and a comparative analysis has been made for both countries. Comparative analysis was followed by identification of lessons learned from China case and making policy recommendations for Türkiye for further development and enhancements of relevant subsidies.

For China, subsidies called Golden Sun Program and the FiT mechanism that supported solar PV development and strengthened its industry have been analysed in the perspectives of their strengths and weaknesses. As for Türkiye, the same analysis has been made for YEKDEM and YEKA. Findings of the comparative analysis of government subsidies in both countries suggest that Türkiye has lessons to take from weaknesses in Chinese subsidies. In this context, prior to establish any subsidy mechanism, Turkish government has been recommended to make necessary arrangements in terms of strong governance structure with proper policy design and monitoring mechanisms and to strengthen R&D component.

Key Words: solar PV, government, subsidy, feed-in-tariff

GİRİŞ

1.1. Fotovoltaik Teknolojilerine Genel Bakış ve Devlet Desteklerinin Önemi

Kaynak açısından zengin, temiz ve yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri olan güneş enerjisinin, enerji geçişini teşvik etmek ve iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir.

Yaygın güneş enerjisi teknolojilerinden olan fotovoltaikler, son yıllarda kömür yakıtlı kaynaklar ve diğer alternatif kaynaklara göre avantajlı hale gelmiştir. Pek çok araştırma, fotovoltaiklerin gelecekte elektrik üretiminde hâkim paya sahip olacağını göstermektedir.

IEA tarafından yayımlanan "Yenilenebilir Enerji 2023" raporuna göre, güneş enerjisi 2023 yılında dünya çapındaki tüm yenilenebilir enerji kapasitesi ilavelerinin dörtte üçünü oluşturmuştur (IEA, 2024).

Fotovoltaik endüstrisinde ilerleme kaydedilmesi, destekleyici politikaların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, devlet teşvikleri, güneş teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik politikaların oluşturulmasında önemli bir rol üstlenecektir.

1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Amacı

Bu çalışmanın amacı, Çin ve Türkiye'de fotovoltaik teknolojilerinin teşvik edilmesine yönelik uygulanan devlet teşvik mekanizmalarının incelenerek ve iki ülke uygulamaları arasındaki

karşılaştırmalı analiz sonuçlarına dayanarak Türkiye'deki endüstrinin güçlendirilmesine yönelik politika önerilerinde bulunmaktadır.

Çalışmada, Çin'de 2009-2012 yılları arasında yürütülmüş olan Golden Sun Programı ve 2011 ile 2016 yılları arasında yürütülmüş olan FiT mekanizmaları ele alınmıştır. Bununla birlikte Türkiye'deki benzer uygulamalar olan YEKDEM ve YEKA mekanizmaları incelenmiştir.

Bununla birlikte fotovoltaik teknolojilere yatırımların teşvik edilmesine yönelik iki ülkede yürütülmüş olan Ar-Ge destekli teşvik mekanizmaları da bu çalışmanın kapsamında ele alınmıştır.

YÖNTEM

2.1.Çalışmanın Yaklaşımı

Araştırmada sonuçlara ulaşabilmek adına vaka analizi yaklaşımıyla nitel ve nicel veriler kullanılarak karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Çin ve Türkiye'deki teşvik mekanizmalarına ilişkin bilgiler, başta IEA verileri olmak üzere ilgili kuruluşların raporlarından ve akademik makalelerden elde edilmiştir.

Araştırma kapsamında temel olarak, Çin'deki iki önemli devlet teşvik mekanizması olan Golden Sun Programı ve FiT mekanizmasının güçlü ve zayıf yönleri ele alınmıştır. Aynı şekilde Türkiye'de güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişiminin desteklenmesi adına etkin faaliyet göstermekte olan YEKDEM ve YEKA mekanizmaları incelenmiştir.

Bahse konu mekanizmalara ek olarak çalışmada, iki ülkede fotovoltaik teknolojilerine yönelik faaliyet gösteren devlet destekli Ar-Ge teşviklerine de yer verilmiştir.

Türkiye'deki diğer mekanizmalara göre daha önemli ve büyük etki ve sonuç alanları yaratabilmeleri nedeniyle çalışmanın kapsamı Türkiye için YEKDEM ve YEKA ile sınırlı kalmış olup, vergi teşvikleri ve diğer mekanizmalar göz ardı edilmiştir.

Çin ve Türkiye örnekleri üzerinden yapılan karşılaştırmalı analizler ışığında Türkiye'deki mekanizmalarda geliştirilmesi gereken alanlar değerlendirilerek politika önerilerinde bulunulmuştur.

2.2.Araştırma Soruları

Aşağıdaki araştırma soruları bu araştırma çalışmasının temelini oluşturmuştur:

- Çin'de fotovoltaik teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik başlıca devlet destekli mekanizmalar ışığında, Türkiye'de benzer teşviklerin artırılması için ne gibi dersler çıkarılabilir?
- Varsa Türkiye'nin devlet destekli mekanizmalara ilişkin zayıflıkları nasıl giderilebilir?
- İhtiyaç halinde mevcut mekanizmalar nasıl daha da genişletilebilir?

BULGULAR ve YORUMLAR

3.1.Çin'de Güneş Enerjisine Genel Bakış

2023 yılına ait IEA verileri, yıllık 500 GW üzerindeki üretim büyüklüğüyle güneş enerjisi modülleri üretiminde Çin'in küresel üretim kapasitesinin yüzde 80'lik bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda bahse konu veriler, devlet teşviklerinin aşamalı olarak kaldırılmış olmasına rağmen Çin'de fotovoltaik teknolojilerinin yayılımının hızlandığını doğrulamaktadır. Maliyet avantajı ve uzun vadeli sözleşmeler yoluyla işletmeleri teşvik eden destekleyici politika ortamları, söz konusu teknolojilerin yayılmasında etkili olduğu ilgili araştırmalarca vurgulanmaktadır.

Çin'deki fotovoltaik pazarı 2023 yılı içerisinde yüzde 116 oranında genişlemiş olup, bahse konu genişleme aynı yıl içerisinde gerçekleşmiş olan 507 GW tutarındaki yenilenebilir enerji kapasite ilavesinin yaklaşık yüzde 50'sini oluşturmuştur (IEA, 2023).

3.2. Çin'de Fotovoltaik Teknolojilerine Yönelik Teşvikler

3.2.1. Golden Sun Programı

2009-2012 yılları arasında uygulanmış olan programda finansal destek ile birlikte bilimsel ve teknolojik destek sağlamaya yönelik teşvikler yer almıştır.

Program kapsamında teşviklerle desteklenen Çinli işletmelerin teknolojik anlamda verimli ve gelişmiş altyapı ve tesisler kurmaları zorunlu kılınmıştır.

Program aşağıdaki alanları desteklemek üzere tasarlanmıştır (Kang ve diğerleri.,2017):

- Uzak bölgelerde ve elektriğe erişimi olmayan bölgelerde rüzgar ve güneş fotovoltaik projeleri
- Güneş enerjisi kaynakları açısından zengin bölgelerdeki büyük ölçekli fotovoltaiklerden enerji üretimi projeleri
- Anahtar fotovoltaik teknolojilerinin sanayileştirilmesine yönelik tanıtım projeleri

Program kapsamındaki projelerin neredeyse tamamında, destek fonlarının yüzde 70'i proje inşaatı öncesinde, geri kalan yüzde 30'u ise proje tamamlandıktan sonra ödenmiştir.

Programda düzenleme ve denetleme faaliyetlerinin yanlış tasarlanması başarısızlıklara yol açmış olsa da program genel anlamda fotovoltaik üretim kapasitesini artırma hedeflerine ulaşmıştır.

Çin'de fotovoltaik modüllerinin ihracat payındaki 2009'dan 2012'ye kadarki düşüş dikkat çekici olmaktadır (Tablo. 1). Bu durum, fotovoltaik endüstrisinde ihracatının yerini yurt içi genişlemesinin aldığını açıklamakta ve programın yurt içi talebin artırılması hedefine katkı sağladığını göstermektedir.

Tablo. 1 Çin'e Ait İhraç edilen Fotovoltaik Modüllerinin Payı

| | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| İhracat Payı (%) | 97.5 | 98.2 | 98.5 | 96.0 | 95.4 | 87.9 | 82.5 |

Kaynak: Kang ve diğerleri., 2017

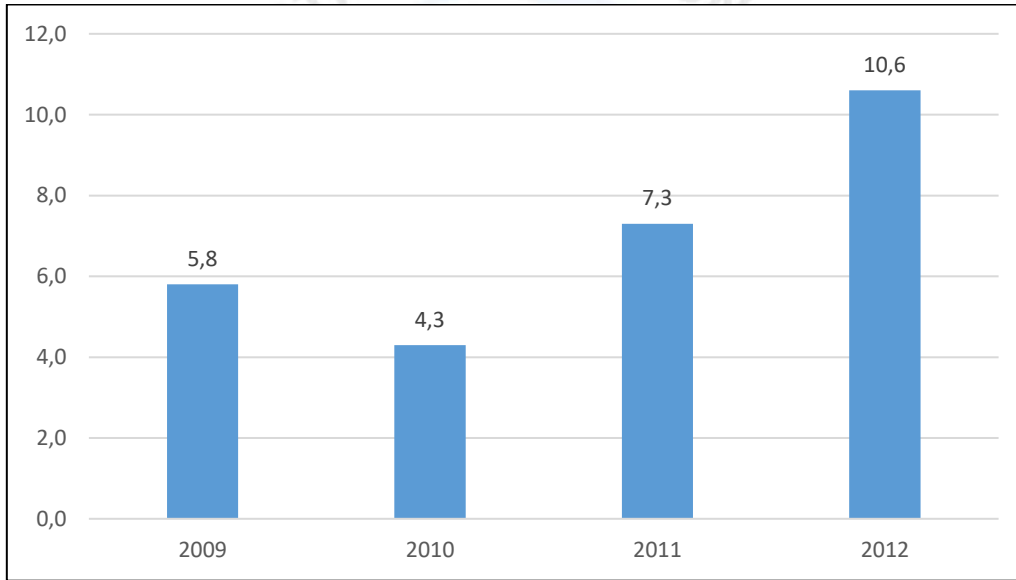
Program, malzeme ve montaj maliyetlerinin düşmesine ve üretim kapasitesinin artmasına katkı sağlamıştır. Projenin teşvikleri ile birlikte söz konusu maliyetler Watt başına 4,5 ABD Dolarından 1,5 ABD Dolarına düşmüştür (IEA, 2022).

Sırasıyla Tablo 2 ve Grafik 1, program kapsamında toplam 5.930 MW kapasite ve kümülatif olarak 28 milyar Yuan tutarında finansal içeren toplam 655 projenin onaylandığını göstermektedir.

Tablo. 2 Golden Sun Programı Kapsamındaki Projeler

| Faz | Proje Sayısı | Projenin Kapasitesi (MW) |
|-----------------------|--------------|--------------------------|
| Faz I (2009) | 140 | 216 |
| Faz II (2010) | 46 | 275 |
| Faz III (2011) | 129 | 692 |
| Faz IV (Haziran 2012) | 155 | 4.747 |
| Faz V (Kasım 2012) | 185 | |
| TOPLAM | 655 | 5.930 |

Kaynak: Kang ve diğerleri., 2017

Grafik 1: Golden Sun Programı Kapsamında Sağlanan Teşvikler (Milyar RMB¹)

Kaynak: Kang ve diğerleri., 2017

Projenin düzenleme ve denetleme faaliyetlerinin tasarımındaki aksaklıklar nedeniyle, büyük miktarda yatırım boşa gitmiş ve bu nedenle 2013 yılında Çin Hükümeti 10 milyar RMB'den fazla tutardaki teşvikin geri çekilmesi sürecini başlatmıştır (Kang ve diğerleri., 2017).

Öte yandan program fotovoltaik işletmelerinin finansmana erişiminin iyileşmesine ve enerji üretiminde verimliliğin artmasını sağlamıştır. Bununla birlikte programla birlikte, ihtiyaç sahibi kişilerin temiz enerjiye erişimini kolaylaştırmış ve fotovoltaik teknolojilerinden üretilen

¹ RMB (Renminbi), Çin'nin resmi para birimi olan Çin Yuanı'nın kısa adıdır ve döviz kodu CNY'dir.

enerjinin kullanılmasında ilerleme kaydedilmiştir. Bu bağlamda programın başarıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

• **Finansmana Erişimin İyileştirilmesi:** Fotovoltaik teknolojilerinin teşvikler yoluyla devlet müdahalesiyle desteklenmesi bahse konu teknolojilerin geleceğine dair piyasada olumlu sinyaller ve güvence oluşturmuştur. Böylelikle ticari bankalar ve özel yatırımcılar da bu teknolojilerin güçlendirilmesine yönelik yatırımlarını hızlandırmıştır. Teşvik fonlarının yüzde 70'inin inşaat öncesinde ödenmesi eş finansman sağlayıcıları için güvence oluşturmuştur.

• **Enerji Üretimi Verimliliğinde Artış:** Golden Sun Programı, Çin'in fotovoltaik endüstrisine ilişkin uluslararası piyasalarda da olumlu sinyaller oluşturmuştur. Bunun sonucunda Çin'in ilgili teknolojilerdeki üretim ölçeği genişlemiş olup, polisilikon malzemelerinin üretiminde artışlar ve maliyetlerde önemli düşüşler gözlenmiştir. Ayrıca fotovoltaik modülleri ve ilgili diğer sistemlere ait fiyatlarda keskin düşüşler izlenmiştir.

• **Enerji İhtiyacı Sahiplerine Temiz Enerjinin Ulaştırılması:** Program kapsamında elektriğe erişimin yetersiz olduğu veya hiç olmadığı bölgelere temiz enerji getirilmiştir. Bu bölgelerden biri olan Qinghai program kapsamındaki 46 proje için başvuru yapmış, onaylanan ve toplam 33,4 MW kurulu güce sahip projelerden 15'i için 552 milyon Çin Yuanı tutarında teşvik sağlamıştır. Program ayrıca geleneksel tarım işçilerini de geride bırakmayarak, onların yaşamlarında ve üretim faaliyetlerinde gerekli enerjiye teknolojik olarak ilerlemiş yollarla erişebilmeleri için imkan sağlamıştır.

• **Fotovoltaiklerden Enerji Üretiminin Daha Etkin Yönetilmesi:** Programın başlamasıyla birlikte fotovoltaik sistemleri kapsamındaki faaliyetlerin belirli standartlar çerçevesi dâhilinde yürütülebilmesini teminen birtakım önlemler, teknik ilkeler ve prensipler yayınlanmıştır. Bu kapsamda geleneksel yönetim sistemini değiştirmeyi hedefleyen hükümet, fotovoltaik teknolojilerinden elde edilen gücün tahsis edilmesi için etkin şebeke bağlantısının sağlanabilmesine yönelik yönergeler de yayınlamıştır.

Öte yandan, program dâhilindeki politikalar ve düzenleyici mekanizmalar işletmeleri belirli şebeke bağlantısı standartlarına uymaları konusunda yönlendirememiş, ayrıca teknolojik gelişmeyi destekleyecek Ar-Ge yatırımlarını gerektiği kadar teşvik edememiştir. Bu bağlamda programın başlıca başarısız sonuçları aşağıdaki gibidir:

• **Politikaların Sistematik Tasarım Zayıflığı:** Finansal teşviklerin aktarım mekanizmasının açık bir şekilde tasarlanmamış olması sonucunda teşviklerin kullanılmasında gecikmeler meydana gelmiş ve destek kapsamına alınan projeler öngörülen süreleri içinde tamamlanamamıştır. Ayrıca ilgili paydaşlar arasında oluşan koordinasyon

eksikliği uygulamada aksaklıklar yaratmış ve fotovoltaik politikalarında sık sık değişikliklere gidilmesine sebep olmuştur. Sıklıkla gerçekleştirilen politika değişiklikleri yatırımcılara kazançların devamlılığına ilişkin olumsuz sinyaller oluşturmuştur. Bununla birlikte işletmeler, fotovoltaik tesislerini kurup işler hale getirmek yerine program dahilindeki finansal teşviği elde etmek hedefine odaklanmıştır. Bunun nedeni finansal teşviklere hak kazanabilmek için fotovoltaik tesislerin inşaatının tamamlanarak faaliyetlerinin başlatılmış olmasının zorunlu olmamasıdır.

• **Teknolojik Ar-Ge Yatırımının Eksikliği:** Teşvik politikaları kapsamında yer almasına rağmen program, teknolojik inovasyon ve Ar-Ge bileşenlerine yeterli ölçüde odaklanamamıştır. Çin’de fotovoltaik endüstrisinde belirli derecede ilerleme kaydedilmiş olsa da ana teknolojilerdeki Ar-Ge teknolojilerinde Çin rakip ülkelerin gerisine düşmüştür.

• **Zayıf Düzenleme Mekanizmaları:** Fotovoltaik projelerinin tabi olduğu mevzuatlarda açıkça belirtilmiş yasa ve düzenlemeler bulunmamıştır. Bununla birlikte finansman, bilim, teknoloji ve enerji birimlerinin projelerin denetim ve izlenmesinden sorumlu olduğu belli olmasına rağmen koordinasyon ve ana sorumluluğun hangi birime ait olacağına dair bir netlik bulunmamıştır. Bunun sonucunda ilgili fotovoltaik projelerinin, program kapsamına alındıktan sonra izlenebilmesi için etkili düzenleyici mekanizmalar oluşturulamamıştır. Düzenleyici mekanizmalardaki aksaklığın sebebi finansman teşviklerinin kapsama alınan projeler başlatılmadan önce işletmelere aktarılmış olmasıdır. Finansman desteği toptan ödeme yoluyla sağlanmış ancak proje denetimleri uygulanmamıştır. Bu aksaklık donanım, mühendislik ve inşaat ile birlikte şebeke bağlantısı ve elektrik santrallerinin de kalitesinin denetlenmesini engellemiştir. Denetim zayıflığı birçok proje geliştiricisinin hükümete malzeme maliyetleri ve ürün kalitesine ilişkin yanlış bilgi vermesine yol açmıştır.

• **Şebeke Bağlantısına İlişkin Teknik Standartlarda Zayıflık:** Çin’de fotovoltaik sistemlerinin şebekeye bağlanabilmesine ilişkin teknik kurallar ve ilkeler açık bir şekilde tanımlanmamıştır. Kalite ve temel güvenlik gereklilikleri belirtilmiş olsa da bunların uygulanmasını zorunlu kılacak herhangi bir mekanizma oluşturulmamıştır. Bunun sonucunda birçok fotovoltaik işletmesi şebeke bağlantısına ilişkin engellerle karşılaşmış ve faaliyetlerini sürdürmekte aksaklıklar yaşamıştır.

3.2.2. Tarife (FiT-Feed in Tariff) Mekanizması

Toplam enerji üretiminde güneş enerjisinin payının artırılması, yerel üretim endüstrisine yönelik sürdürülebilir talep yaratılması, kapasite fazlasının giderilmesi ve uluslararası piyasada

iyileşme sağlanması amacıyla Çin Hükümeti 2011 yılında FiT mekanizmasını başlatmıştır (Lin ve diğerleri, 2017).

FiT politikaları yerel fotovoltaik piyasasını 2011-2013 yılları arasında önemli ölçüde canlandırmıştır. 2013 yılında yerel piyasanın hızla genişlemesine ve yeni kurulumların patlayıcı bir güçle büyümesine rağmen, fotovoltaik kaynaklı elektrik üretiminde ciddi oranda israf oluşmuştur. Bunun nedeni, kapasite kurulumlarının büyük bir kısmının, daha önce yüksek oranda kaynak tahsisi yapılmış batı bölgelerine gerçekleştirilmiş olmasıdır.

Fotovoltaik projelerinin neredeyse tamamı, yenilenebilir enerji kullanımının sınırlı olduğu ve Batı Çin'in az gelişmiş bölgelerinde başlatılmıştır. Projelerin başlatılmadığı Doğu ve Orta Çin bölgelerine enerji iletiminin sağlanabilmesi uzun mesafeli iletim hatlarının oluşturulmasını gerektirmiştir. Ancak bu iletim hatları mevcut olmadığı için özellikle Doğu ve Orta Çin bölgeleri yeterli derecede fotovoltaik kaynaklı enerji üretimi imkanından faydalanamamıştır.

Doğu ve Orta Çin'de de yatırımların teşvik edilmesi amacıyla, güneş enerjisi kaynak dağılımı bazında Çin üç bölgeye ayrılmıştır. Tablo. 3, üç ayrı bölge için uygulanan tarifeleri göstermektedir. Bahse konu tarifeler 20 yıl süreyle garanti altına alınmış ve bu Çin'in fotovoltaik piyasasının hızla büyümesini sağlamıştır.

Tablo. 3 Çin'de Üç Ayrı Bölge için Düzenlenen FiT Mekanizması

| Bölgeler | Tarife (CNY/kwh) |
|----------|------------------|
| Bölge 1 | 0,9 |
| Bölge 2 | 0,95 |
| Bölge 3 | 1 |

Kaynak: Lin ve diğerleri, 2017

Aşırı kapasite kurulumu ve politika maliyetlerinin sınırlandırılması ve fotovoltaik elektriğinin israfının kontrol edilmesi amacıyla 2014 yılında her il için kurulum kotası belirlenmiştir.

Kotalar ölçüsündeki kurulumun işletmelerden bir yıl içerisinde tamamlanması beklenmiş ve kotaların üzerindeki kurumların FiT dâhilinde desteklenmemesi öngörülmüştür.

FiT mekanizmasındaki kota uygulaması, ihtiyaç duyulan bölgelere adil dağılımın sağlanması ve fotovoltaik israfının kontrol edilmesi amacıyla uygulanmıştır.

Uzun vadeli garantili tarifeler, Çin'deki yerel fotovoltaik piyasasının hızla genişlemesine yardımcı olmuş, Çin fotovoltaik piyasası 2016 yılında toplam 77 GW'lık kümülatif kurulumla

ulaşmıştır. Böylelikle Çin yalnızca fotovoltaik tedarik zincirinde değil, aynı zamanda hammadde üretiminde de küresel lider konumuna gelmiştir (Lin ve diğerleri, 2017).

Öte yandan FiT Mekanizmalarının bazı eksiklikleri de olmuştur. He ve Zhang (2013), FiT Mekanizmasının bölgesel bazda güneş kaynağı ihtiyaçlarını ve fotovoltaik maliyetlerindeki değişiklikleri etkili yönetemediğini belirtmektedir.

Bahse konu araştırmada belirtilen bir diğer eksiklik ise FiT Mekanizması için açıkça belirtilmiş bir uygulama süresinin olmamasıdır.

3.2.3. İhale (Top Runner-En İyi Koşucu) Programı

Çinli şirketlerin fotovoltaik Ar-Ge yatırımlarına teşvik edilmesi amacıyla İhale Programı 2016 yılında yürürlüğe girmiştir.

İhale Programı Hebei, Shanxi, İç Moğolistan, Anhui ve Shandong eyaletlerinde bulunan, hükümetin önde gelen 8 teknoloji üssü olan ve toplam kapasiteleri 5,5 GW olan endüstri parklarında yürütülmüştür (Lin ve diğerleri, 2017).

Bahse konu teknoloji üslerinin her biri için kurulum kotası belirlenmiş olup, kotalar ihale süreciyle program gerekliliklerine uygun projelere tahsis edilmiştir. En İyi Koşucu olarak değerlendirilen, yani en rekabetçi projeleri sunmuş olan geliştiriciler ihaleyi kazanmıştır.

İhale sürecinde geliştiriciler arasındaki rekabet sayesinde, çok sayıda teknolojik inovasyon odaklı projeler geliştirilmiş ve örnek fotovoltaik bölgeleri oluşmuştur. Rekabet ayrıca güneş enerjisine ilişkin fiyatların yüzde 20 oranında düşmesine katkı sağlamıştır. Bu anlamda program teknolojiye ileri seviye çeşitli proje geliştiricilerinden uygun fiyatlar talep edebilme imkânı oluşturmuştur.

Güneş enerjisi verimliliğinde iyileşmeye önemli destek veren program, teknolojik inovasyon odaklı olmayan ancak sadece devlet teşvikleriyle ayakta kalmak isteyen işletmelerin faaliyetlerinin sonlanmasını da sağlamıştır (Tan, 2021).

3.2.4. Çin'deki Ar-Ge Faaliyetlerinin Fotovoltaik Endüstrisine Etkileri

Yenilenebilir Enerji Yasası ile Çin, 11. Beş Yıllık Plan (2006-2010) kapsamında kamu fonlarıyla desteklenen Ar-Ge programları başlatmıştır. Söz konusu programlar dahilinde fotovoltaikler için yıllık 6 milyon ABD doları tutarında finansman sağlanmıştır. Sonraki birkaç

yıl içinde Ar-Ge için ortalama yıllık yatırım tutarı 75 milyon ABD dolarına ulaşmıştır. Artan Ar-Ge yatırımları, fotovoltaik modüllerinin maliyetlerinin hızla düşmesini sağlamıştır (Gao ve diğerleri., 2021).

Önceki bölümlerden anlaşıldığı üzere, Çin'in fotovoltaik endüstrisindeki üretimi büyük ölçekte geliştirmiştir. Ancak modül fiyatlarının ABD ve Almanya gibi rakiplerinden daha yüksek olmasının sebebi Çin'in fotovoltaiklere yönelik Ar-Ge yatırımlarını sistematik bir şekilde gerçekleştirmediği olmasıdır.

Çin, teknolojik gelişmişliğe odaklanmış Ar-Ge yatırımlarını teşvik etmemiştir. Bunun yerine yaparak öğrenme stratejileriyle fotovoltaik teknolojilerinde iyileştirmeler yapmış olan Çin, teknolojilerinin çoğunu ithal etmiştir.

Ayrıca rakip ülkelerden (ABD, Almanya ve Japonya) farklı olarak fotovoltaik teknolojilerine yönelik uzun vadeli Ar-Ge programları hazırlayamamış olan Çin, teknoloji geliştirme yerine düşük maliyetli üretim odaklı Ar-Ge programları benimsemiştir.

Ar-Ge politikalarına ilişkin bir diğer önemli nokta ise rakiplerinden farklı olarak Çin'in, akademi ve araştırma enstitüleri gibi paydaşları fotovoltaik endüstrisi ile bir araya getirerek iş birliği oluşturamamış olmasıdır.

3.3. Türkiye'de Güneş Enerjisine Genel Bakış

Ulusal Enerji Planında, güneş enerjisindeki kurulu gücün 2035 yılında 52,9 GW'a yükseltilmesi öngörülmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Türkiye'nin 2024-2026 Ara Dönem Programında, YEKA modeli ile yerli bileşen kullanımının zorunlu kılınacağı projeler vurgulanmaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023).

2024-2028 yılı 12. Kalkınma Planında, güneş enerjisi kurulu gücünün 2028'de 30 GW'a (Hedeflenen toplam kurulu güç 136 GW) çıkarılması hedeflenmektedir. Güneş enerjisi kurulu gücünün 2024-2028 dönemi için planlanan toplam kurulu güç artışının yaklaşık yüzde 65'ini oluşturacağı öngörülmektedir. Ayrıca, toplam kurulu güçteki güneş enerjisi kurulu gücünün yüzde 10 seviyesinden yüzde 20'nin üzerine çıkacağı vurgulanmaktadır. Bu anlamda, 12. Kalkınma Planında güneş enerjisinin sadece Türkiye'nin yeşil dönüşümünde değil, aynı zamanda ulusal enerji politikalarında da bir dönüm noktası oluşturacağı anlaşılmaktadır.

2011'den itibaren Türkiye'de lisanssız elektrik üretimi ağırlıklı olarak güneş enerjisi yatırımları ile artmıştır. 2023 yılında güneş enerjisi lisanssız kurulu güçte yüzde 93,3'lük bir paya sahip olmuştur (10,7 GW'de 10 GW) (PWC, 2024).

3.4. Türkiye'de Fotovoltaik Teknolojilerine Yönelik Teşvikler

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi adına YEKDEM ve YEKA en büyük sonuç alanlarına sahip teşvik mekanizmalarındandır. Türkiye ayrıca yenilenebilir enerjilere yatırımların canlandırılması amacıyla bazı Ar-Ge mekanizmaları başlatmıştır. Bu araştırmada, Türkiye'de fotovoltaik gelişimi için devlet teşviklerinin bir parçası olarak aşağıdaki mekanizmalar ele alınmıştır.

- Yenilenebilir Enerji Destek Mekanizması (YEKDEM) (İBİŞ ve İBİŞ, 2023)
- Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) (İBİŞ ve İBİŞ, 2023)
- Türkiye'de Ar-Ge Araştırmaları (İBİŞ ve İBİŞ, 2023)

3.4.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)

2010 yılından bu yana uygulanan YEKDEM kapsamında, güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına 10 yıllık bir süre için alım garantileri uygulanmaktadır. Mekanizma bugüne kadar yenilenebilir enerji kurulu gücünde önemli artışların olmasına katkı sağlamıştır.

İlk olarak YEKDEM, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan elektrik üreticilerinin ürettikleri elektriği 10 yıl boyunca sabit fiyatlarla satmalarına olanak sağlamıştır. Kapsam dâhilinde santrallere ABD doları bazlı satın alım garantisi sağlanmış olup, tarifeler güneş enerjisi için 10 yıl geçerli olmak üzere kWh başına 0,133 ABD doları olarak belirlenmiştir. Bu mekanizma 30 Haziran 2021'den önce sisteme dahil edilecek tesisler için geçerli olmuştur.

Bununla birlikte santralin bileşenleri Türkiye'de üretiliyorsa, aşağıdaki tarife şemasında belirtilen destek, santralin faaliyete geçtiği tarihten itibaren beş yıl boyunca sağlanmıştır (yurt içi bileşen primleri).

Tablo. 4 Güneş Fotovoltaiklerinin Yurt İçinde Üretilen Bileşenleri için Yurt İçi Bileşen Primi

| | Yurt İçi Üretim | Yurt İçi Bileşen Primi (ABD doları-senti/kWh) |
|--|--|--|
| Fotovoltaik Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi | Fotovoltaik panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı | 0,8 |
| | Fotovoltaik panel | 1,3 |
| | Fotovoltaik panelini oluşturan hücreler | 3,5 |
| | İnvertör | 0,6 |
| | Fotovoltaik panel üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme | 0,5 |

Kaynak: İBİŞ, 2023

Yurt içi bileşen priminin uygulanması, yerli üretim ve yenilenebilir enerji yatırımlarının teşvik edilmesi adına Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesinde önemli rol oynamıştır.

YEKDEM kapsamında 2019 yılında, toplam kapasitesi 20,9 GW olan 777 yenilenebilir enerji tesisine 38,04 milyar TL (6,41 milyar ABD doları) tutarında teşvik ödemesi gerçekleştirilmiştir (PWC, 2024).

Bu mekanizma 2021 yılının sonunda sona ermiştir. Hükümet, politikanın yürürlüğe girmesinden bu yana güneş teknolojilerinde önemli maliyet düşüşlerine istinaden, tarifeleri düşürülmüş yeni bir mekanizma tasarlamıştır.

Dolar bazında kurulan YEKDEM mekanizması, oluşan döviz kayıpları nedeniyle devlet hazinesine mali yük getirmiştir.

Döviz kayıplarından kaynaklanan mali yükü azaltmak için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 30 Haziran 2021'den sonra sisteme dâhiledilecek santrallerde uygulanmak üzere güncellenmiş TL bazlı bir YEKDEM mekanizması yürürlüğe koymuştur. Güncellenen bu mekanizma 1 Temmuz 2021 ile 31 Aralık 2025 arasında sisteme giren santrallerin 10 yıl boyunca faydalanmasını sağlamıştır. Bu düzenlemede de santralde kullanılan bileşenlerin en az %51'i yerli üretim kaynaklı ise katılımcı santrallere 5 yıllık yerli bileşen primi eklenmiştir.

Sonrasında YEKDEM, tarife ve yurt içi bileşen primlerinin enflasyon endeksleri ve döviz değişimlerine göre aylık dönemlerde güncelleneceği şekilde yeniden tasarlanmıştır. Böylelikle mekanizma ekonomik hassasiyetlere daha duyarlı hale gelmiştir.

Bu kapsamda 2023 yılının Mayıs ayında yürürlüğe giren en son YEKDEM mekanizması, katılımcıların beklentilerini ve enerji piyasalarındaki son gelişmeleri daha iyi karşılamıştır.

YEKDEM'in yatırımcılara sağladığı teşvikler ve düzenleyici çerçeve, yenilenebilir enerji santrallerine yapılan yatırımların hızlanmasını sağlamıştır (PWC, 2024).

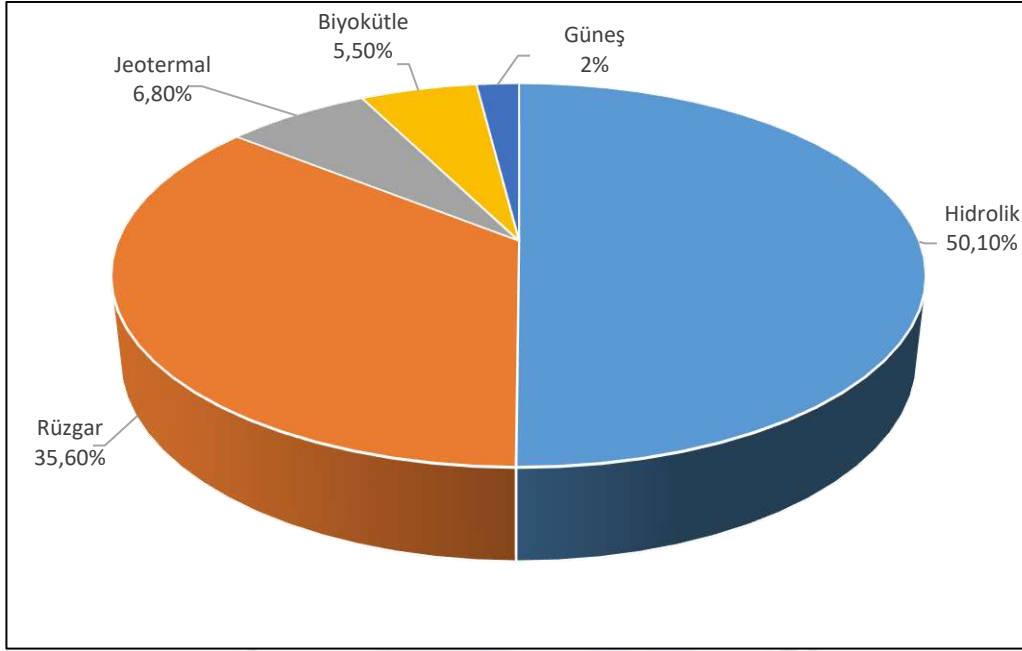
Tablo.5 YEKDEM Mekanizmasının Getirdiği Genel Sonuçlar

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|--------|--------|---------|---------|-----------|-----------|
| YEKDEM Katılımcı Sayısı | 2 | 3 | 9 | 17 | 32 | 36 |
| YEKDEM Kurulu Güç (MW) | 12,9 | 13,9 | 81,7 | 162,7 | 305,9 | 468,8 |
| YEKDEM Kurulu Gücünde Güneş Enerjisinin Payı (%) | 0,07% | 0,07% | 0,39% | 0,77% | 1,41% | 2,04% |
| YEKDEM Katılımcılarının Üretimi (MWh) | 24.269 | 39.140 | 159.961 | 375.477 | 1.492.885 | 2.785.749 |
| YEKDEM Katılımcılarının Enerji Üretiminde Güneş Enerjisinin Payı (%) | 0,05% | 0,06% | 0,21% | 0,51% | 2,01% | 3,32% |

Kaynak: İBİŞ&İBİŞ, 2023

Tablo 5'te güneş enerjisi santralleri için YEKDEM'in katılımcı sayısı, toplam kurulu güç içindeki payı ve toplam üretim içindeki payı bakımından artış eğilimi gösterdiği görülmektedir.

Grafik 2: 2022 Yılı Sonunda YEKDEM Kurulu Gücünün Kaynaklara Göre Dağılımı (%)

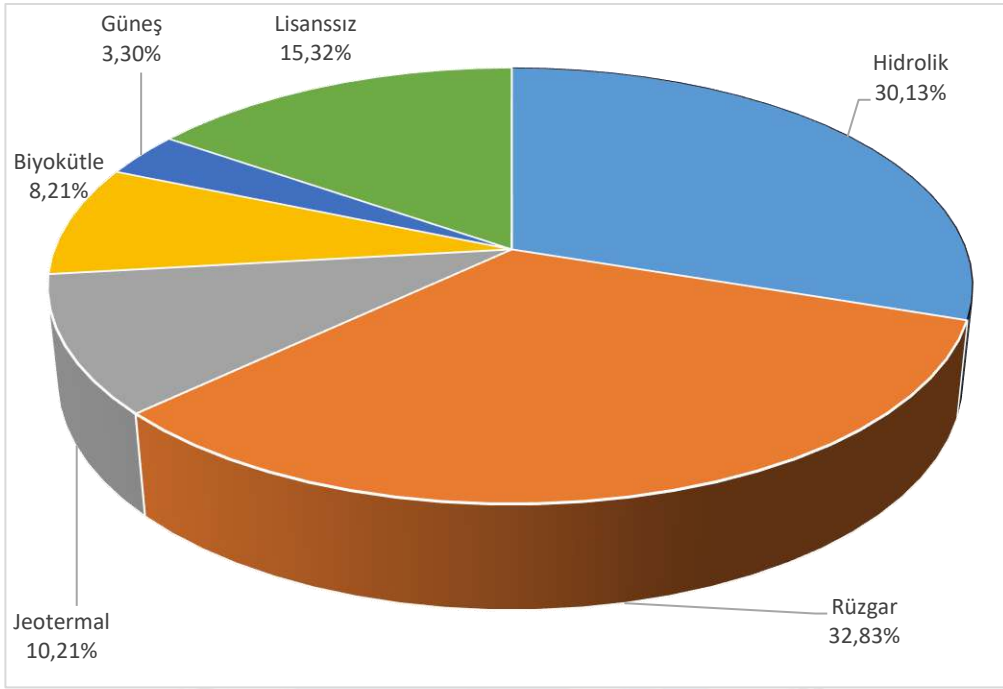


Kaynak: İBİŞ&İBİŞ, 2023

Grafik 2, YEKDEM katılımcılarının oluşturduğu kurulu gücün içerisinde güneş enerjisi santrallerinin yüzde 2'lik bir paya sahip olduğunu göstermekte olup, bu oran rüzgar ve hidrolik sistemlerin payıyla karşılaştırıldığında çok düşük kalmaktadır.

Aynı şekilde YEKDEM katılımcıları arasında kaynaklar bazında üretimin dağılımı incelendiğinde (Grafik 3), güneş enerjisi kaynaklarından enerji üretiminin diğer yenilenebilir kaynaklara göre düşük kaldığı görülmektedir.

Grafik 3: 2022 Yılında YEKDEM Enerji Üretiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı (%)



Kaynak: İBİŞ&İBİŞ, 2023

3.2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA)

Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA), yenilenebilir enerji projeleri için tahsis edilen özel nitelikli alanlardır.

YEKA kapsamında güneş enerjisi dâhibüyük ölçekli yenilenebilir projelerinin desteklenmesi amaçlanmıştır.

Bu mekanizma ayrıca, Ar-Ge merkezlerinin kurulduğu ve üretim tesislerinin teknoloji transferlerine katkıda bulunduğu Yerli Bileşen Kullanımına Tahsis modelini de içermektedir.

YEKA süreci, katılımcı geliştiricilerin Ar-Ge Yatırımı yapmalarını zorunlu kılmıştır.

YEKA mekanizması şu ana kadar elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payını artırdığı için, satın alınan elektriğin maliyetlerinin düşmesine ve yenilenebilir enerji alanında yerli teknolojilerin gelişmesine de yardımcı olmuştur.

Planlanan ve devam eden GES ihalelerinin (PWC, 2024) bazıları aşağıdaki gibidir:

- YEKA GES-1: Yerli Bileşen Kullanımına Tahsis yöntemi ile düzenlenen YEKA GES-1 ihalesi kapsamında Kalyon Solar Technologies (Kalyon PV) kurulmuştur. Ar-Ge faaliyetleri

de yürüten Kalyon PV, yüzde 80'in üzerinde yerli üretim oranına sahip fotovoltaikler üretmektedir. Kalyon Grubu'nun toplam kurulu gücü 1.000 MW'a ulaşmıştır.

- YEKA GES-4: 3 ilde toplam 1.000 MW kapasiteli 15 GES'i (200 MW, 300 MW ve 500 MW kapasiteli GES'ler) kapsamıştır. Kazananlara her tesiste MWe başına üretilen ilk 23 GWh elektrik için satın alma garantisi verilmiştir.

- YEKA GES-5: Planlama aşamasındadır. Yerli Bileşen Kullanım Tahsisi yöntemiyle yürütülen ihalelerin kurulum süreçleri tamamlandığında Türkiye'deki güneş enerjisi kurulu gücünün 2.000 MW artması beklenmektedir (PWC, 2024). Ayrıca bu ihalelerde yer alan güneş enerjisi santrallerinde yüzde 65-75 oranında yerli üretim oranının bulunduğu tahmin edilmektedir.

3.2.5. Türkiye'deki Ar-Ge Çalışmaları

Yenilenebilir enerji, hükümetin yerli enerji üretiminin payını artırma ve ithalatı düşürme konusundaki politik önceliği doğrultusunda desteklediği en büyük alanlardan biridir. Yenilenebilir enerjiye destek, 2016'dan bu yana Ar-Ge finansmanında önemli pay edinmiştir. Toplam enerjiyle ilgili bütçenin yüzde 41'i yenilenebilir enerjiye ayrılmış olsa da, yenilenebilir enerji finansmana yönelik tahsis edilen kısım içerisinde güneş enerjisi küçük paylara sahiptir (IEA, 2021).

Türkiye, ülkenin enerji ve doğal kaynaklarda kendine yetebilmek adına geliştirilmiş yerli teknolojik kapasitenin önem arz ettiği görüşündedir. Ar-Ge, inovasyon ve teknolojik gelişime yönelik önlemler yoluyla gerekli stratejileri oluşturan Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminde kullanılan bileşenlerin yerli üretimini artırmak için birtakım politikalar uygulamaya koymuştur. Bu politikalardan biri, önceki bölümlerde belirtildiği gibi YEKA ihalelerinin bir parçası olarak yerel üretim tesislerinin inşasının zorunlu kılınmasıdır.

Türkiye'de Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının yönetimi ve koordinasyonunda Yatırım Teşvik Sistemi ve Proje Bazlı Teşvik Sistemi yürürlükte.

Proje Bazlı Teşvik Sistemi yenilikçi, Ar-Ge yoğun ve yüksek katma değerli büyük ölçekli projeleri desteklemeyi amaçlayan bir mekanizmadır.

Yatırım Teşvik Sisteminin amacı, teknolojik geçişi hızlandıran yüksek ve orta-yüksek teknolojileri içeren yatırımların desteklenmesidir (İBİŞ, 2023).

Yatırım Teşvik Sisteminin diğer amaçları yüksek Ar-Ge içeriğine sahip ve uluslararası rekabet gücünü artıracak bölgesel, büyük ölçekli ve stratejik yatırımların teşvik edilmesi ve Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesine ilişkin usul ve esasların belirlenmesidir.

Yatırım Teşvik Sisteminin temellerinden biri Öncelikli Yatırımlardır. Yüksek teknoloji ürünlerinin üretimi için yapılan yatırımlar öncelikli yatırım olarak değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji üretimi için türbin ve jeneratör üretimine yapılan yatırımlar ile Ar-Ge ve çevre yatırımları öncelikli yatırımlar olarak değerlendirilebilir.

3.3. Çin ve Türkiye'ye İlişkin Karşılaştırmalı Analiz

Golden Sun Programı ve FiT Mekanizması uygulama süreçlerinde bazı eksiklikler olmasına rağmen, yine de Çin fotovoltaik piyasasının yurt içinde ve uluslararası alanda gelişimine önemli katkılarda bulunmuş ve Çin'i küresel sektör liderliğine taşımıştır.

Çin teşvik sistemlerindeki zayıflıklar temel olarak, etkili sistematik tasarım ile birlikte düzenleme ve izleme mekanizmalarının eksikliği olmuştur. Teşviklerin aktarımı sonrasındaki denetim ve izlemedeki aksaklıklar gereksiz büyüklükteki yatırımlar ve aşırı kapasite sorununa yol açmıştır.

Ayrıca Çin teşvik mekanizmalarının koşulları, uyulması gereken şebeke bağlantı standartları konusunda net gereklilikler içermemiştir.

Çin'deki FiT mekanizması, ihtiyaçlara dayalı ayrıntılı bir bölgesel analiz içermemiştir. Bu durum, teşviklerin bölgelere uygunsuz şekilde tahsis edilmesine, aşırı kapasiteye ve gereksiz büyüklükteki yatırımlara yol açmıştır. Ayrıca, FiT mekanizmasının belirli bir uygulama süresi olmamıştır.

Ar-Ge politikalarına ilişkin olarak, Çin fotovoltaik gelişiminin en erken aşamalarında çeşitli programlar aracılığıyla önemli Ar-Ge yatırımları yapmış olmasına rağmen, bu politikaların sürdürülebilirliğini sağlamada başarısız olmuştur. Bunun nedeni, Çin'in teşviklerinin uygulama aşamalarında yaptığı Ar-Ge yatırımlarının, teknolojik inovasyondan çok maliyet düşürmeye odaklanmış olmasıdır.

Teşvik mekanizmalarının Çin'in fotovoltaik endüstrisinin önemli derecede teknolojik ilerlemeler sağlamasına katkı sağlamış olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Çin sürdürülebilir ilerleme odaklı uzun vadeli Ar-Ge yatırım politikaları oluşturamamıştır.

Çin'in Ar-Ge politikalarında eksik olan bir diğer husus ise, Çin'in fotovoltaik alanındaki paydaşları politikalarına yeterli düzeyde dâhiletmemiş olmasıdır.

Türkiye'de uygulanan YEKDEM ve YEKA mekanizmalarının şu ana kadar güneş enerjisi kurulu kapasitesinin artmasına katkıda bulunmaları bakımından etkili oldukları açıktır. Ancak YEKDEM içerisinde kurulu güç ve enerji üretimi bazında güneş enerjisinin payının diğer yenilenebilir kaynaklardan az olması, güneş enerjisinin de payının artırılması adına fotovoltaik teknolojilerinde gelişmeye açık alanlar olduğu görülmektedir.

Çin'deki FiT Mekanizması ile karşılaştırıldığında, Türkiye'deki YEKDEM ve YEKA Mekanizmaları ilgili yasalar ve yasa değişiklikleriyle açıkça belirtilmiş uygulama dönemlerine sahiptir. Ayrıca, YEKA mekanizmasındaki yurt içi bileşen primi, yalnızca yerli üretimi artırmak için değil, aynı zamanda işletmeleri üretimde teknolojik inovasyona teşvik etmek için de güçlü ve etkili bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte YEKDEM Mekanizması, yararlanıcıları enflasyon ve kur değişikliklerinin yaratacağı ekonomik kırılganlıklar ve belirsizliklerden korumak adına önlemler içerdiği için başarılı olmuştur.

Ancak Çin teşvik mekanizmalarındaki diğer aksaklıklar göz önünde bulundurulduğunda, fotovoltaik teknolojilerinin güçlendirilmesi için etkili teşvik mekanizmalarının oluşturulması adına Türkiye'nin ders alması gereken başlıca hususlar aşağıdaki gibidir:

- Teşvikler, karşılaşılabilecek olası hassasiyetlere cevap verebilecek ve etkin izleme ve denetim mekanizmalarını içerecek kapsamlı bir yönetim ve teknik çerçeve içerisinde oluşturulmalıdır.

- Teşviklerde, amaçlanan sonuçları oluşturacak yatırımların gerçekleştirilmesini teminen Ar-Ge bileşeni güçlendirilmelidir ve ilgili paydaşları da içerecek Ar-Ge mekanizmaları oluşturulmalıdır.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

YEKDEM ve YEKA, Türkiye'de sadece fotovoltaik endüstrisinin geliştirilmesinde değil, aynı zamanda yerli üretimin ve teknolojik inovasyonun artırılmasında da bugüne kadar başarılı sonuçlar elde etmiştir. Yine de Türkiye'de fotovoltaiklere yönelik devlet teşviklerinde tasarım politikaları ve Ar-Ge bileşenleri açısından gelişmeye açık bazı alanlar bulunmaktadır.

Karşılaştırmalı analiz bulguları, Türkiye'nin Çin'deki teknoloji odaklı Ar-Ge ve teşviklere ait yönetim mekanizmalarının geliştirilmesindeki başarısızlıklardan ders çıkarması gerektiğini göstermektedir.

Bu bağlamda, bu araştırmanın ışığında, Türkiye için aşağıdaki hususlarda politika önerileri sunulmaktadır:

i. Politika Tasarımı

- Aşırı kapasite ve maliyet yaratacak gereksiz yatırımları önlemek için teşvik mekanizmalarının unsurları hassas bir şekilde analiz edilmeli, ayrıca paydaşlar üzerindeki potansiyel etkiler de dikkate alınmalıdır.

- Teşvik mekanizmalarının uygulama ilkeleriyle uyumunun izlenebilmesi için şeffaflığa dayalı sistemler geliştirilmelidir.

- İşletmelerin kendi teknolojilerini geliştirebilmeleri adına iç kapasitelerini genişletmelerinin teşvik edilmesi amacıyla performansa ve ödüle dayalı teşvikler oluşturulmalıdır.

- Türkiye'deki üst merciler fotovoltaik endüstrisini ayrı olarak ele almalı ve ulusal politika belgelerinde kapsamlı bir yer vermelidir.

- Düzenli izlemenin sağlanabilmesi için, ilgili projelerin her aşamasında teşviklerin uygulanmasının takip edilmesi amacıyla teşviklerin aktarımı sonrası denetim mekanizmaları oluşturulmalıdır.

ii. Etkili Ar-Ge Politikaları

- Ülkemizdeki Ar-Ge merkezlerinde fotovoltaik sektörüne özel bir yer ayrılmalıdır.

- Türkiye'deki Ar-Ge merkezlerinde fotovoltaik uzmanlığı güçlendirilmelidir.

Gerekirse üniversiteler, danışmanlık şirketleri ve diğer ilgili paydaşlar Ar-Ge merkezlerine dahil edilmelidir.

- Sektördeki politika hedeflerine ulaşılmasını sağlamak için kamu kurumları ile enerji politikası paydaşları (politika birimleri, düzenleyiciler ve Ar-Ge enstitüleri) arasındaki iş birliği ve koordinasyon kolaylaştırılmalıdır.

- Fotovoltaik teknolojilerine dair enerji politikası gündemi ve önceliklerine uygun kapsamlı bir Ar-Ge stratejisi yol haritası geliştirilmelidir.

- Enerji araştırma politikaları, projeleri ve finansmanı ile ilgili bakanlıklar arasındaki koordinasyon iyileştirilmelidir.

• Türkiye'nin fotovoltaik Ar-Ge programları için, kamu, özel sektör veya diğer yollardan fon desteği sağlayabilecek finansman mekanizmalarının oluşturulması sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] International Energy Agency. (2024). Renewables 2023-Analysis and Forecast to 2028. France: IEA Publications.
- [2] IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. IEA Publications.
- [3] Wang, Y.-h., Luo, G.-l., & Kang, H. (2017). Successes and Failures of China's Golden-Sun Program. Advances in Engineering Research.
- [4] IEA. (2022). Special Report on Solar PV Global Supply Chains. IEA Publications.
- [5] Ye, L.-C., Rodrigues, J. F., & Lin, H. X. (2017). Analysis of feed-in tariff policies for solar photovoltaic in China 2011–2016. Applied Energy.
- [6] Zhang, S., & He, Y. (2013). Analysis on the development and policy of solar PV power in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [7] Tan, H. (2021). Solar Energy in China: The Past, Present, and Future. China Focus: [https://chinafocus.ucsd.edu/2021/02/16/solar-energy-in-china-the-past-present-and-future/adresinden alındı](https://chinafocus.ucsd.edu/2021/02/16/solar-energy-in-china-the-past-present-and-future/adresinden%20alindi).
- [8] Wen, D., Gao, W., Qian, F., Gu, Q., & Ren, J. (2021). Development of solar photovoltaic industry and market in China, Germany, Japan and the United States of America using incentive policies. Energy Exploration and Exploitation
- [9] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı.
- [10] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). Orta Vadeli Program (2024-2026).
- [11] PWC. (2024). Dünyada ve Türkiye'de Güneş Enerjisi Sektörü.
- [12] İBİŞ, M., & İBİŞ, E. N. (2023). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması ile Getirilen Teşvikler. M. İBİŞ, & E. N. İBİŞ içinde, Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimi ve Verilen Teşvikler (s. 722-755). Yargı Yayınevi.

[13] İBİŞ, M., & İBİŞ, E. N. (2023). Yatırım Teşvik Sistemi. M. İBİŞ, & E. N. İBİŞ içinde, Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimi ve Verilen Teşvikler (s. 823-830; 839-841). Yargı Yayınevi.

[14] IEA. (2021). Turkey 2021 Energy Policy Review.

[15] İBİŞ, M. İ.-E. (2023). Öncelikli Yatırımlar. M. İ.-E. İBİŞ içinde, Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimi ve Verilen Teşvikler (s. 828). Ankara: Yargı Yayınevi.



113: Kullanıcı Kaynaklı Gelişmiş Enerji Kalitesi Problemlerinin Makine Öğrenmesi Metotlarıyla Tespit Edilmesi

Dr. Onur Enginar

PRESIFY Analitik Yazılım A.Ş., Hacettepe Üniversitesi

Rabia Şeyma Güneş

PRESIFY Analitik Yazılım A.Ş.

Tugay Eren Güzelyol, Berkay Emekli, Yiğit Ahmet Arıkök GDZ

Elektrik Dağıtım A.Ş.

Erman Terciyanlı

INAVITAS Enerji A.Ş.

ÖZET

Bu çalışmada, güç kalitesi olaylarının sınıflandırılması için makine öğrenmesi temelli bir algoritma geliştirilmiştir. Etiketsiz güç kalitesi olayları, denetimsiz öğrenme yöntemleriyle kümeleme yapılarak etiketlenmiş ve bu etiketler konvolüsyonel sinir ağı (CNN) modeliyle tahmin edilmiştir. Model, dört farklı güç kalitesi problemini manuel olarak etiketlenmiş verilerle eğitmiştir. İlk aşamada K-Means yöntemi ile sorunlu olmayan seriler ayrıştırılmış, ikinci aşamada ise sorunlu seriler zaman uzayına taşınarak modele girdi değişkenleri olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, %94,46 doğrulukla güç kalitesi olaylarını sınıflandırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç kalitesi problemleri, Kümeleme, Stockwell dönüşümü, Konvolüsyonel sinir ağları

ABSTRACT

In this study, a machine learning-based algorithm was developed for classifying power quality events. Unlabeled power quality events were clustered using unsupervised learning methods, and these labels were predicted using a convolutional neural network (CNN) model. The model was trained with manually labeled data for four different power quality issues. In the first phase, non-problematic series were separated using the K-Means method, and in the second phase, the problematic series were transformed into the time domain and used as input variables for the model. This approach achieved a 94.46% accuracy in classifying power quality events.

Keywords: Power quality problems, Clustering, Stockwell transform, Convolutional neural networks

GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında, güç kalitesi izleme cihazları tarafından kaydedilen güç kalitesi olaylarının sınıflandırılması için bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışmada, etiketsiz güç kalitesi olaylarının önce denetimsiz öğrenme modellerinden kümeleme yöntemi kullanılarak etiketlenmesine ve ardından girdi verilerinin ön işlenmesinin ardından denetimli öğrenme türü olan bir konvolüsyonel sinir ağı (CNN) modeliyle olayların tahmin edilmesine odaklanmaktadır. Model eğitimi sürecinde, gerilim serilerinde gözlemlenen dört farklı güç kalitesi problemi sınıfı manuel olarak etiketlenmiştir. Modelin ilk aşamasında, hesaplanan DTW uzaklıklarına dayalı olarak gerilim serileri K-Means algoritması ile kümelenebilir ve bu sayede güç kalitesi sorunu olmayan seriler etkili bir şekilde ayrıştırılmıştır. İkinci aşamada, sorunlu olarak belirlenen seriler, S Transform kullanılarak zaman uzayına dönüştürülmüş ve model için giriş oluşturacak özellikler çıkarılmıştır. Bu girdileri kullanan CNN sınıflandırma modeli, manuel olarak etiketlenmiş veriye kıyasla %94,46 doğruluk oranı elde etmiştir. Kaydedilen 711 olaydan 673'ü doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.

Dağıtım şebekelerinde güç kalitesi sorunları, enerji sistemlerinin artan karmaşıklığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu nedeniyle kritik hale gelmiştir. Güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmış olup, bu çalışmalar enerji sistemlerinin izlenmesi ve yönetiminin iyileştirilmesine katkıda bulunmak için makine öğrenimi yöntemlerini kullanmayı amaçlamaktadır.

Güç kalitesi hatalarının sınıflandırılması ve bu hatalara sebebiyet veren olayların bulunması ile ilgili literatürdeki çalışmaların çoğunluğu güç kalitesi hatalarının sınıflandırılması ile ilgilidir. Literatürde en fazla odaklanılan güç kalitesi hataları genellikle sag, swell ve harmonik sorunları olarak gözükmektedir. Güç kalitesi olayları üzerinde ise çok daha az çalışma bulunmaktadır. Kısa devre olayları (Fault Events), şebekeye fazla enerji yükleme (Line Energizing) ve kendiliğinden sönmüş olaylar (Self-Extinguishing) literatürdeki çalışmaların genel olarak ele aldığı olaylardır.

Güç kalitesi hataları ve güç kalitesi olayları birbiriyle ilişkili kavramlardır. Güç kalitesi hataları bu olayların sonucunda ortaya çıkmaktadır. Projenin asıl kapsamı da belirli güç kalitesi hatalarının altında yatan olayları bulup sınıflandırmaktır. Literatürdeki çalışmaların neredeyse tamamında simülasyon verileri kullanılmıştır. Çoğunlukla bu veriler MATLAB&Simulink toolu ile

oluşturulmuştur. Gerçek veri seti kullanılan çalışmalar literatürde bulunmasına rağmen sayıları simülasyon verileri kullanan çalışmalara kıyasla daha azdır. [1] Türkiye Dağıtım Hattının Güç Kalitesini İzleme projesinde kullanılan izleme cihazlarından gerçek zamanlı ölçüm verileri elde edilmiştir. Bu cihazlar belirli ölçüm noktalarından hem güç kalitesi olaylarını hem de güç kalitesi olaylarını aynı anda gerçek zamanlı olarak izlemiştir. Bu veri seti kısa devre, kesinti, fazla yüklenme ve sönümlenme gibi güç kalitesi olaylarını içermektedir. Çalışmanın ana hattı veri ön işleme, öznitelik çıkartma, sınıflandırma ve sebep analizi olarak 4 bölüme ayrılmıştır. Öznitelik çıkartma işleminde güç kalitesi olayları verilerine wavelet transform uygulanmıştır. Daha sonra sınıflandırma işleminde SVM kullanılarak oluşan güç kalitesi olaylarının tipi belirlenmiştir. Sebep analizi kısmında ise karar ağaçları kullanılarak bu güç kalitesi olaylarının hangi güç kalitesi hatalarına sebebiyet verdiği analiz edilmiştir. [2] güç kalitesi hatalarının sınıflandırılması yapılmıştır. MATLAB&Simulink kullanılarak elde edilen simülasyon verileri CNN networkler aracılığıyla sınıflandırılmıştır. Bu çalışmanın yenilikçi yönü sinüzoidal eğrilerinin resim formatında üretilmesi ve sınıflandırma işleminin bu veriler üzerinde yapılmasıdır. Çalışma basitçe 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak S transform veriler üzerine uygulanarak öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Daha sonra bu veriler Le-Net5 networkü kullanılarak sınıflandırılmıştır. [3] güç kalitesi hatalarını Windowed 1D-CNN LSTM yöntemiyle sınıflandırmıştır. Belirli aralıktaki (Window) sinüzoidal sinyaller resim formatında seçilerek 1D-CNN networküne verilmiştir. Özniteliği çıkartılan bu aralıktaki veriler LSTM networküne zamansal olarak sıralı bir şekilde girdi olarak verilmiştir. Seçilen aralık parametre olarak değiştirilmeye ve optimize edilmeye açık bırakılmıştır. Bu sayede sekans olarak her bir aralıktaki veri resim formatında incelenmiş ve sınıflandırma değerleri alınmıştır. Kullanılan veri seti sentetik olarak elde edilmiştir. [4] ise MATLAB ile elde edilen güç kalitesi olaylarını LSTM networkleri kullanarak sınıflandırılması yapılmıştır. Veriler ham haliyle modele verilerek eğitilmiştir. Sekans aralığı farklı değerler kullanılarak modelin sonucuna göre optimize edilmiştir. [6] güç kalitesi bozulması sınıflandırmasında yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, karar ağaçları ve K- en yakın komşu gibi yöntemlerin önemini vurgulayarak, etkili sınıflandırma tekniklerinin güç kalitesi sorunlarının çözümündeki rolünü öne çıkarmıştır. Makine öğrenimi teknikleri, dağıtım şebekelerinde güç kalitesi analizine uygulanarak arıza tespiti ve sınıflandırma süreçlerini iyileştirmiştir. [7] dağıtım sistemlerinde arıza tespiti ve konum tanıma için optimize edilmiş tekniklerin uygulanmasını tartışmış, yük dengesizliği ve arızalar gibi değişkenliklerin güç kalitesi

sorunları üzerindeki etkisini vurgulamıştır. [8] Discrete Wavelet Transform-Multiresolution Analizi ve Destek Vektör Makinesi sınıflandırıcısını kullanarak çoklu güç kalitesi bozulmalarını sınıflandırmak için bir yöntem önermiş, makine öğreniminin güç kalitesi bozulmalarını doğru bir şekilde tanıma ve sınıflandırma konusundaki potansiyelini göstermiştir. [9] dağıtım şebekelerinde güç kalitesi olaylarının sınıflandırılmasında makine öğrenimi tekniklerinin yükselen rolünü vurgulayarak, güç kalitesi analizi için Fast Fourier Dönüşümü gibi geleneksel tekniklerle birlikte makine öğreniminin kullanımına geçişi işaret etmiştir. Makine öğrenimi algoritmaları ayrıca dağıtım şebekelerinde güç kalitesi değerlendirmesi için kapsamlı tahmin modelleri geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. [10] dağıtılmış üretime sahip dağıtım şebekelerinde makul güç kalitesi tahmin modellerine duyulan ihtiyacı vurgulayarak, şebekenin güç kalitesi seviyesini nicel olarak yansıtmaya gerekliliğine dikkat çekmiştir. [11] farklı güç kalitesi sorunlarını tespit etmek, yerini belirlemek ve sınıflandırmak için çoklu etiket K-en yakın komşu yöntemini kullanarak, makine öğreniminin güç sistemi bozulma değerlendirmesindeki etkinliğini ortaya koymuştur. [12] güç iletişim ağlarında trafik sınıflandırması için iyileştirilmiş bir Hidden Naive Bayes algoritması sunmuş ve makine öğrenimine dayalı denetimli öğrenme algoritmalarının trafik sınıflandırması için uygulanmasını göstermiştir. Bu çalışmalar, dağıtım şebekelerinde güç kalitesi sorunlarının ele alınmasında makine öğrenimi yöntemlerinin çok yönlülüğünü ve etkinliğini vurgulamaktadır. Ayrıca, güç kalitesi değerlendirme modellerine makine öğreniminin entegrasyonu, enerji sistemlerinin izlenmesi ve yönetiminin iyileştirilmesinde umut verici sonuçlar göstermiştir. [13] çok değişkenli Gauss dağılımı ve yerel duyarlılık analizi üzerine kurulu yenilikçi bir mikro şebeke güç kalitesi değerlendirme modeli önererek, derin öğrenmeye dayalı modellerin güç kalitesi değerlendirmesindeki avantajlarını vurgulamıştır. [14] güç kalitesi sorunlarını sınıflandırmak için Destek Vektör Makinesi yöntemlerini kullanarak, makine öğreniminin güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılmasını iyileştirmedeki rolünü vurgulamıştır. Sonuç olarak, dağıtım şebekelerinde güç kalitesi sorunlarını sınıflandırmak için makine öğrenimi yöntemlerinin uygulanması, arıza tespiti, bozulma sınıflandırması ve güç kalitesi değerlendirmesinin iyileştirilmesinde önemli bir potansiyel göstermektedir. Destek Vektör Makineleri, karar ağaçları ve sinir ağları gibi gelişmiş algoritmaların kullanılmasıyla, araştırmacılar dağıtım sistemlerinde güç kalitesini analiz etmek ve yönetmek için doğru ve verimli modeller geliştirebilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları ve dağıtılmış üretim entegrasyonu ile

güç şebekesi evrimleşmeye devam ederken, makine öğrenimi teknikleri, enerji sistemlerinin güvenilirliğini ve kararlılığını sağlamak için değerli bir araç sunmaktadır.

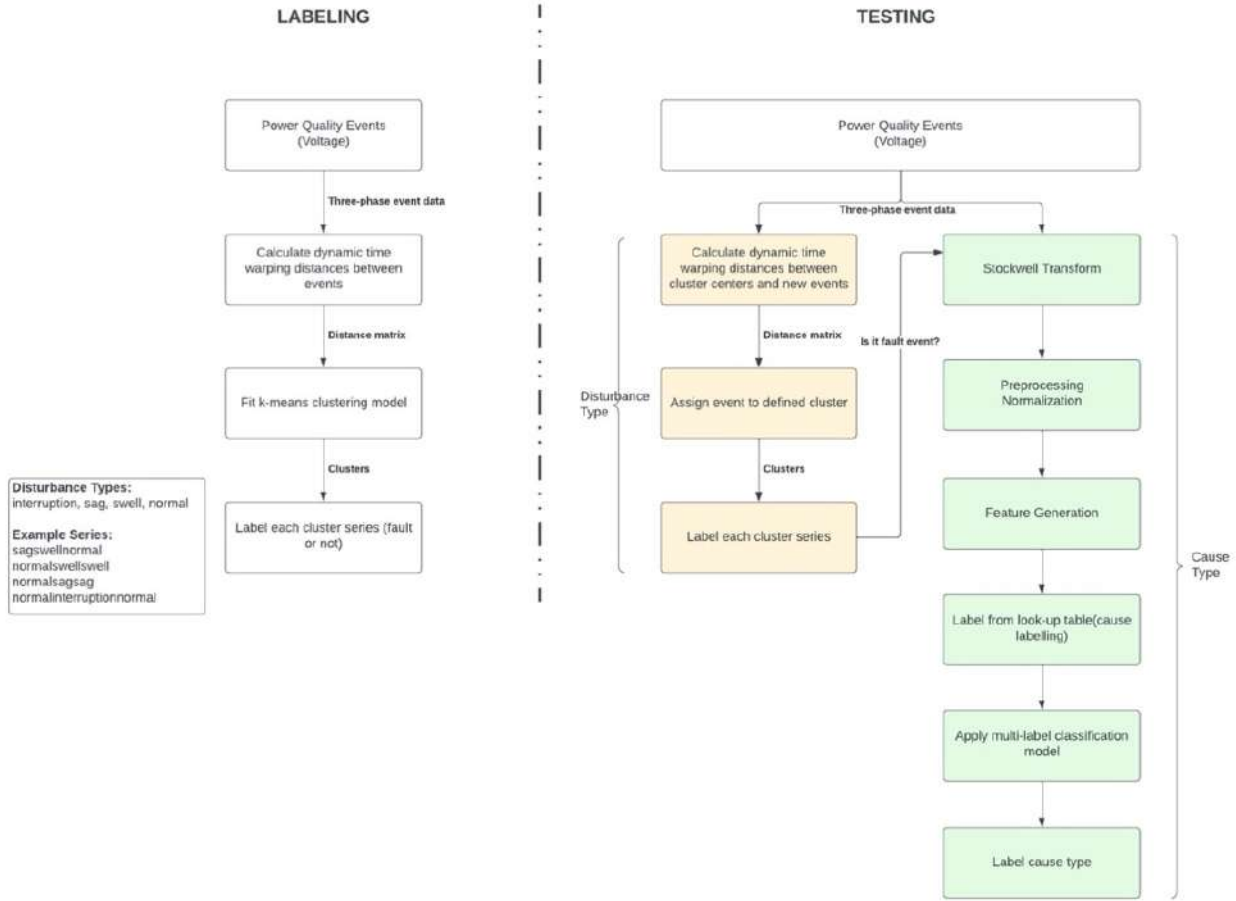
YÖNTEM

Çalışma kapsamında güç kalitesi olaylarını ve nedenlerini sınıflandıran geliştirilmiş algoritma iki aşamadan oluşmaktadır. Algoritmasının akış diyagramı Şekil 1’de bulunmaktadır. 1. Aşama labeling olarak isimlendirilmiştir. Bu aşamada cihazlardan toplanan güç kalitesi olaylarının dinamik zaman bükme (DTW) ve K-Means kümeleme modeli aracılığıyla güç kalitesi soruna sahip olup olmadığı sınıflanmıştır. Bunun ile cihazlardan gelen güç kalitesi problemi öncesi veya sonrasında tutulan güç kalitesi problemi taşımayan gerilim serilerinin ayıklanmasıdır. Modelin ikinci aşaması ile testing olarak adlandırılmıştır. Bu aşamada, güç kalitesi sorununa sahip olan 3 faz serilerinin Stockwell transformu ile zaman-frekans uzayında zaman bilgisi korunarak gerilim dalgası verisinin dönüştürülmesi ve elde edilen zaman serilerinde özellik çıkarılması sonrasında sınıflama modelini içermektedir. Modeli oluşturan algoritma parçaları aşağıdaki şekilde verilmiş ve çalışmanın devamında açıklanmıştır.

2.1 Güç Kalitesi Olay Sınıflandırma Algoritması:Labeling

İlk aşamada cihazlardan toplanan güç kalitesi olaylarının dinamik zaman bükme (DTW) ve K-Means kümeleme modeli aracılığıyla güç kalitesi soruna sahip olup olmadığı sınıflanmıştır. Bunun ile cihazlardan gelen güç kalitesi problemi öncesi veya sonrasında tutulan güç kalitesi problemi taşımayan gerilim serilerinin ayıklanmasıdır. Kümeleme algoritmaları genellikle iki türe ayrılır: bölümlene tabanlı ve hiyerarşik. Bölümlene tabanlı algoritmalar, veriyi örtüşmeyen kümeler halinde bölen K-means ve Gaussian karışım modelleri gibi algoritmaları içerir. Hiyerarşik algoritmalar ise, birleştirici ve ayrıştırıcı kümeleme gibi algoritmaları kullanarak veriyi hiyerarşik ağaç benzeri bir yapıya dönüştürür. Bu çalışma kapsamında K-Means modeli kullanılarak, DTW uzaklıkları hesaplanmış 3 faz gerilim verisinin güç kalitesi problemine sahip olup olmadığı belirlenmiştir.

Şekil 1: Güç Kalitesi Olay Sınıflandırma Algoritması Akış Diyagramı



2.2 Güç Kalitesi Olay Sınıflandırma Algoritması:Testing

Bu aşamada, güç kalitesi sorununa sahip olan 3 faz serilerinin Stockwell transformu ile zaman-frekans uzayında zaman bilgisi korunarak gerilim dalgası verisinin dönüştürülmesi ve elde edilen zaman serilerinde özellik çıkarılması sonrasında sınıflama modelini içermektedir.

2.2.1 Stockwell Transformu

Stockwell dönüşümü, diğer adıyla S-dönüşümü, zaman-frekans analizi tekniği olarak, sinyal işleme alanında kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, sinyalin hem zaman hem de frekans içeriğini aynı anda gösteren birleşik bir zaman-frekans temsilini sağlar. Short-Time Fourier Transform (STFT) and Continuous Wavelet Transform (CWT) gibi diğer zaman-frekans analizi yöntemleri gibi, Stockwell dönüşümü bir sinyali zaman içindeki frekans bileşenlerine ayırır. Ancak, bunlardan

farklı olarak Stockwell dönüşümü hem zaman hem de frekans alanlarında iyi bir yerleştirme sağlayan yüksek çözünürlüklü bir spektral analiz sağlar.

Matematiksel olarak, bir sinyal $x(t)$ verildiğinde, Stockwell dönüşümü $S_x(t, f)$ sinyalin karmaşık Gauss penceresi fonksiyonu $g(t, s)$ ile zaman alanında konvolüsyonu ve ardından Fourier dönüşümü aşağıdaki formül ile tanımlanmaktadır:

$$S_x(t, f) = \int_{-\mu}^{\mu} x(t) g(t - t, s) e^{-2ipft} dt.$$

Burada f frekansı, t zamanı temsil eder ve s Gauss penceresinin genişliğini kontrol eder. Stockwell dönüşümü, iyi bir zaman-frekans yerleştirilmesi, doğal faz bilgisi ve hesaplama verimliliği gibi birkaç istenen özelliğe sahiptir. Değişken spektral içeriğe sahip zaman içinde değişen sinyallerin analizi için uygun bir zaman-frekans temsili sağlar.

Stockwell dönüşümü, sinyal işleme, zaman serisi analizi, biyomedikal mühendislik ve jeofizik gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Özellikle hızla değişen frekans bileşenleri veya geçici olaylar içeren sinyallerin analizi için çok kullanışlıdır.

Genel olarak, Stockwell dönüşümü, değişken olmayan sinyallerin zaman-frekans yapısını analiz etmek için güçlü bir araç sağlar ve karmaşık verilerin temel dinamiklerine değerli içgörüler sağlar.

2.2.2 Özellik Geliştirme

Bu aşamada zaman serisine çevrilmiş 3 faz gerilim verisinden aşağıdaki özellikler oluşturularak sınıflama modeline girdi olarak verilmiştir:

- S matrisi ortalama değeri
- S matrisi standart sapma ve varyansı
- S matrisinden hesaplanan maksimum sapma: $\max(\text{Smatrix}) - \text{ortalama}$
- S-dönüşümüne dayalı faz grafiğinin basıklığı
- S-dönüşümüne dayalı toplam mutlak değerler grafiğinin basıklığı
- S dönüşüm tabanlı frekans-genlik grafiğinde mevcut olan tepe noktalarının sayısı
- S dönüşümüne dayalı faz grafiğinin çarpıklığı
- $\text{Toplam}(\text{abs}(\text{S-matrisi}))$
- $\text{Max}(\text{abs}(\text{S-matrisi}))$

- Medyan(abs(S-matrisi))

2.2.3 Konvolüsyonel Sinir Ağları Modeli (CNN)

Bu bölümde, ele alınan sınıflama problemini çözmek için kullanılan konvolüsyonel sinir ağı (CNN) modelinin mimarisini ve eğitim süreci detaylandırılmıştır. CNN'ler, verilerdeki mekansal hiyerarşileri ve desenleri yakalama yetenekleri sayesinde çeşitli görüntü ile ilgili görevlerde dikkate değer bir etkililik göstermiştir.

Bu çalışmada kullanılan CNN mimarisi, giriş görüntülerinden özellikleri etkili bir şekilde çıkarmak ve sınıflandırma/regresyon görevleri için ayırıcı temsiller öğrenmek için tasarlanmıştır. Mimari, çeşitli filtre boyutları ve filtre sayıları ile birkaç konvolüsyonel katman ve bu katmanları takiben mekansal boyutları küçültmek ve hesaplama karmaşıklığını azaltmak için havuzlama katmanları içerir. Genelleme sağlamak ve aşırı uyumlanmayı azaltmak için toplu normalleştirme ve bırakma katmanları dahil edilmiştir.

Sınıflama problemi için kullanılan belirli mimari aşağıda özetlenmiştir:

Giriş Katmanı: Sabit boyutlardaki giriş görüntülerini kabul eder.

Konvolüsyonel Katmanlar: Çeşitli filtre boyutları ve filtre sayılarına sahip birkaç konvolüsyonel katman. Bu katmanlar, giriş görüntülerinden özellikler çıkarmak için konvolüsyon işlemleri uygular.

Havuzlama Katmanları: Her konvolüsyonel katmandan sonra, mekansal boyutları küçültmek ve en belirgin özellikleri çıkarmak için maksimum havuzlama katmanları kullanılmıştır. Düzleştirme Katmanı: Son konvolüsyonel katmanın çıktısını bir boyutlu vektöre dönüştürmek için kullanılır ve tam bağlantılı katmanlara beslenir.

Tam Bağlantılı Katmanlar: Düzleştirme katmanını takip eden bir veya daha fazla tam bağlantılı katman, sınıflandırma/regresyon görevlerini gerçekleştirmek için kullanılır.

Çıkış Katmanı: Son çıktıyı üreterek, tahmin edilen sınıf etiketini veya regresyon değerini temsil eder.

2.2.3.1 Model Eğitimi

CNN modeli, çapraz entropi fonksiyonunu en aza indirmek için etiketlenmiş eğitim verileri ve bir optimizasyon algoritması kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim süreci aşağıdaki adımlar özetlenmiştir:

Veri Önışleme: Giriş görüntüleri, birlik sağlamak ve model performansını artırmak için önceden işleme yapılmıştır.

Model Derleme: CNN modeli, uygun bir kayıp fonksiyonu, optimize edici ve değerlendirme metriği ile derlenmiştir. Sınıflandırma görevleri için genellikle kategorik çapraz entropi kaybı ve Adam optimize edici kullanılırken, regresyon görevleri için ortalama karesel hata kaybı ve Adam optimize edici sıklıkla kullanılır.

Eğitim: Derlenen model, belirlenen sayıda dönem boyunca eğitim veri kümesinde eğitildi. Eğitim sırasında, model parametreleri geri yayılım ve gradyan inişini kullanarak iteratif olarak ayarlanarak kayıp fonksiyonunu en aza indirmek için güncellenmiştir. Doğrulama: Her dönem sonunda, modelin performansı aşırı uyumlanma için izlenerek ve hiperparametre ayarını yönlendirerek ayrı bir doğrulama veri kümesinde değerlendirilmiştir. Eğer doğrulama kaybı azalmayı bırakırsa eğitim durdurma kriterleri uygulanmıştır.

Model Değerlendirmesi: Eğitim tamamlandıktan sonra, son modelin performansı, genelleme yeteneği ve sağlamlığı değerlendirmek için görünmeyen bir test veri kümesinde değerlendirilmiştir. Öğrenme oranı, toplu boyutu, katman sayısı, filtre boyutları ve bırakma oranları gibi hiperparametreler, CNN modelinin performansını optimize etmek için ayarlanmıştır. Hiperparametre uzayını etkili bir şekilde aramak için ızgara araması, rastgele arama veya Bayesyen optimizasyon gibi teknikler kullanılmıştır.

2.2.4 Model Değerlendirmesi

Eğitilmiş CNN modelinin performansı, doğru sınıflandırma (accuracy) metriği kullanılarak değerlendirilmiştir. Sınıflandırma modelinin performansını ölçmek için kullanılan en temel metriklerden biri doğruluk metriğidir. Doğruluk, modelin doğru tahminlerinin toplam tahminlere oranını gösterir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{True Positive} + \text{False Negative Sayısı}}{\text{Toplam Tahmin Sayısı}} * 100$$

BULGULAR VE YORUMLAR

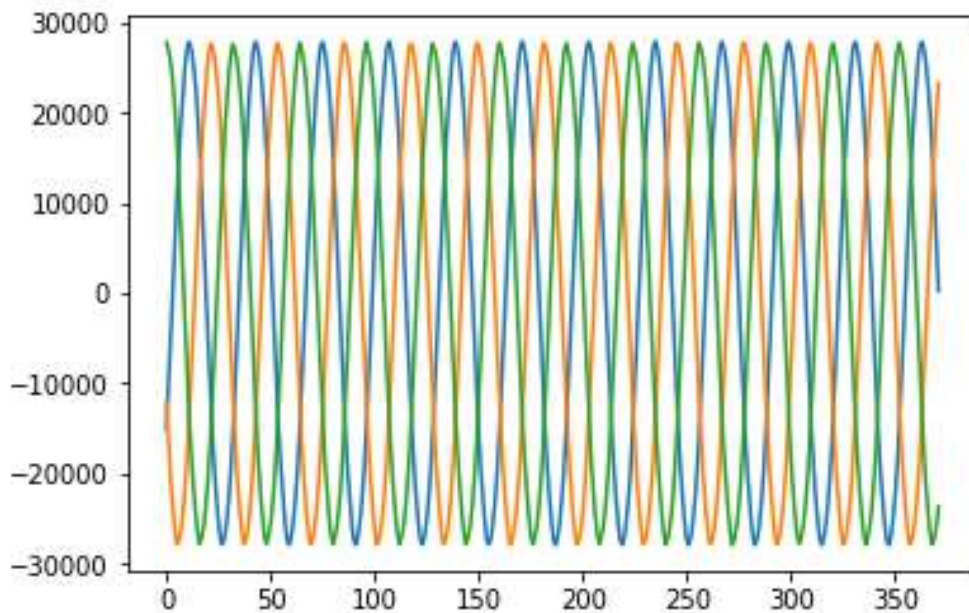
Model eğitimi sırasında toplanan gerilim serilerinde belirgin olarak karşılaşılmış 4 sınıf güç kalitesi problemi manuel olarak etiketlenmiştir. Modelin 1. Aşamasında DTW uzaklıkları

hesaplanan gerilim serilerinin K-Means modeli ile kümelenmesi ile güç kalitesi problemi mevcut olmayan seriler ayrıştırılmıştır. Bu aşama sonrasında problemliler olarak etiketlenmiş seriler modelin 2. Aşamasında öncelikle S Transform ile zaman uzayına çekilmiş ve bu serilerden modele girdi teşkil edecek özellikler oluşturulmuştur. Bu girdileri kullanan konvolüsyonel yapay sinir ağı sınıflama modeli ile sınıflama sonuçlarında manuel olarak etiketlenmiş veride doğru sınıflama sonucu (accuracy score) %94,46 olarak gerçekleşmiştir. Toplanan 711 olayın 673 tanesi doğru şekilde tahminlenmiştir (Tablo 1). Model sonucunda 1. Aşamadan gelen seriler arasında hala güç kalitesi sorununa sahip olmayan seriler de olduğu görülmüştür. Buna göre sınıflar, sorunsuz veri, harmonik sebepli gerilim bozulması, fazlar arası eşitsizlik ve gerilim çökmesi-harmonik tabanlı gerilim çökmesi olarak görülmektedir. Aşağıdaki grafikler her bir sınıftan örneği barındırmaktadır.

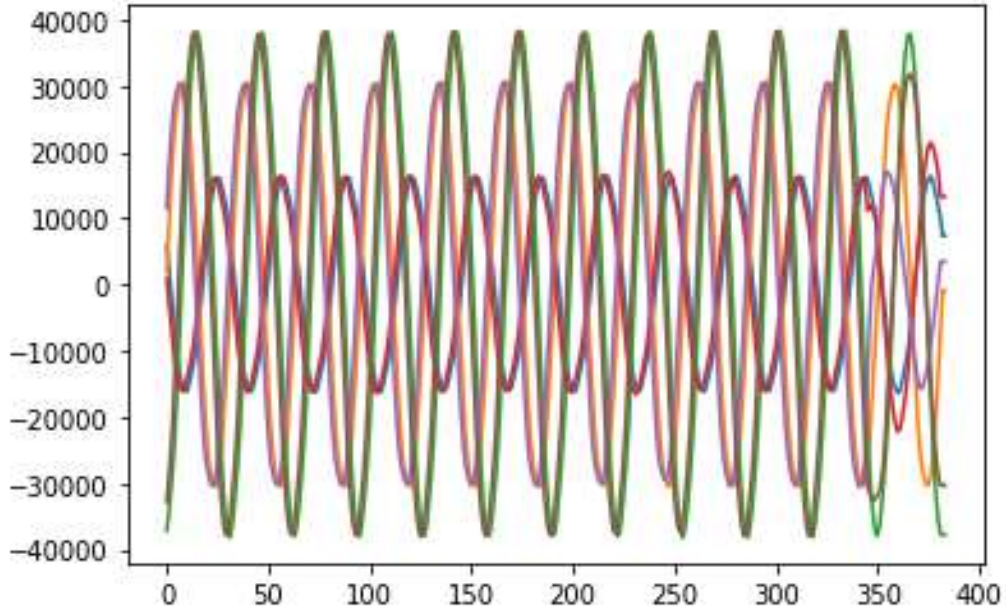
Tablo 1: Model Sonuçları

| | Gerilim Çökmesi | SagSwell | Gerilim Dengesizliği | Olaysız |
|----------------------|--------------------|----------|-------------------------|---------|
| Olay Sayısı | 102 | 400 | 139 | 70 |
| Doğru Tahmin Edilen | 96 | 382 | 125 | 70 |
| Yanlış Tahmin Edilen | 6 | 18 | 14 | 0 |

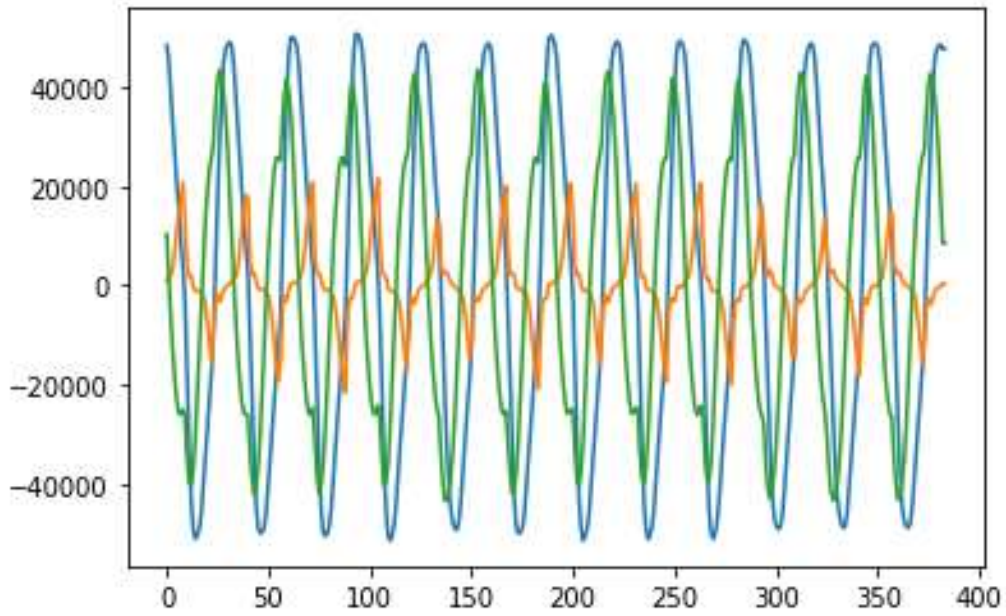
Şekil 2: Olaysız Gerilim Eğrisi Sınıfı



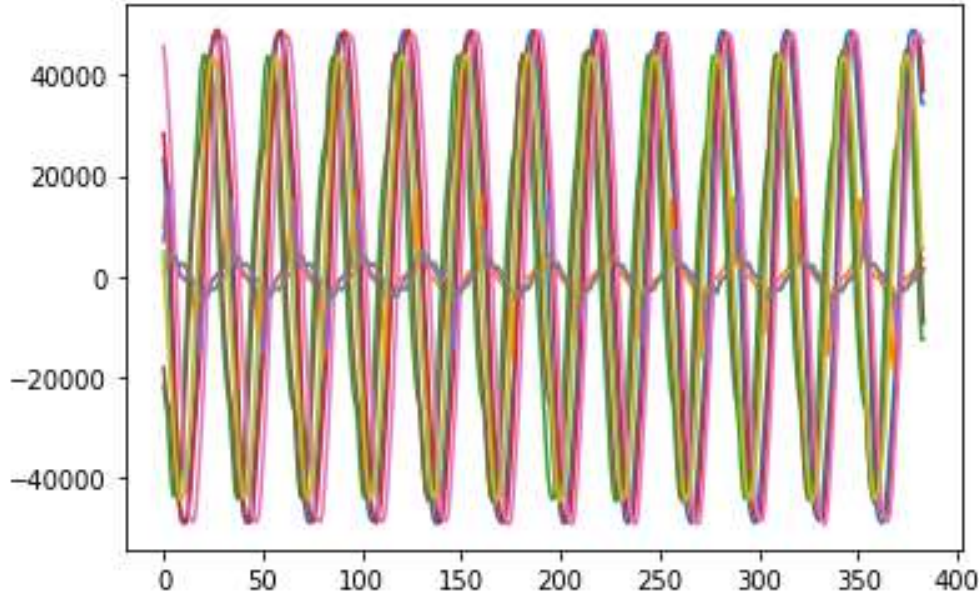
Şekil 3: Gerilim Dengesizliği



Şekil 4: Harmonik Sebepli Gerilim Bozulması



Şekil 5: Gerilim Çökmesi



SONUÇ

Bu çalışmada, güç kalitesi izleme cihazları tarafından kaydedilen güç kalitesi olaylarının sınıflandırılması için makine öğrenmesi tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, etiketsiz güç kalitesi olaylarının kümeleme yöntemi kullanılarak etiketlenmiştir. Bunu takiben girdi verilerinin ön işlenmesi ile oluşturulan yeni girdi uzayının etiketli yeni veri seti ile birlikte konvolüsyonel sinir ağı (CNN) modeliyle güç kalitesi olayları sınıflandırılmıştır. Model eğitimi sürecinde, gerilim serilerinde gözlemlenen üç farklı güç kalitesi problemi ve problemsiz olaylar manuel olarak etiketlenmiştir. İkinci aşamada, sorunlu olarak belirlenen seriler, S Transform kullanılarak zaman uzayına dönüştürülmüş ve model için giriş oluşturacak özellikler çıkarılmıştır. Bu girdileri kullanan CNN sınıflandırma modeli, manuel olarak etiketlenmiş veriye kıyasla %94,46 doğruluk oranı elde etmiştir. Kaydedilen 711 olaydan 673'ü doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Erişti, H., and Yakup Demir. "Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines." *IET generation, transmission & distribution* 6, no. 10, 2012: 968-976.
2. Li, Jinsong, Hao Liu, Dengke Wang, and Tianshu Bi. "Classification of power quality disturbance based on S-transform and convolution neural network." *Frontiers in Energy Research* 9, 2021: 708131.
3. Rodrigues, Wilson L., Fabbio AS Borges, Antonio O. de Carvalho Filho, and Ricardo de AL Rabelo. "A deep learning approach for the detection and classification of power quality disturbances with windowed signals." *SN Computer Science* 2, 2021: 1-14.
4. Abdelsalam, Abdelazeem A., Ahmed M. Hassanin, and Hany M. Hasanien. "Categorisation of power quality problems using long short-term memory networks." *IET Generation, Transmission & Distribution* 15, no. 10, 2021: 1626-1639.
6. W. Zhao, L. Shang, & J. Sun, "Power quality disturbance classification based on time-frequency domain multi-feature and decision tree", *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 4, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0139-z>
7. U. Kumar, N. Reddy, S. Daram, & V. Janamala, "Application of optimized technique for identification of location and recognition of fault in distribution system", *Helix*, vol. 10, no. 2, p. 130-135, 2020. <https://doi.org/10.29042/2020-10-2-130-135>
8. F. Jandan, S. Khokhar, S. Shaha, & F. Abbasi, "Recognition and classification of power quality disturbances by dwt-mra and svm classifier", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0100348>
9. T. Tun and G. Pillai, "Power quality event classification in distribution grids using machine learning", 2021. <https://doi.org/10.1109/upec50034.2021.9548222>
10. H. Ding, P. Liu, X. Chang, & B. Zhang, "A novel power quality comprehensive estimation model based on multi-factor variance analysis for distribution network with dg", *Processes*, vol. 11, no. 8, p. 2385, 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11082385>
11. N. Sivakumar and A. Ibrahim, "Disturbance evaluation in power system based on machine learning", *Computers Materials & Continua*, vol. 71, no. 1, p. 231-254, 2022. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.022005>

12. Lv, L., Zhang, Q., Zeng, S., & Wu, H. (2016). Traffic classification of power communication network based on improved hidden naive bayes algorithm.. <https://doi.org/10.2991/iceeecs-16.2016.188>
13. H. Shi, G. Su, J. Pan, K. Feng, & J. Zhou, "A novel microgrid power quality assessment model based on multivariate gaussian distribution and local sensitivity analysis", Iet Power Electronics, vol. 16, no. 1, p. 145-156, 2022. <https://doi.org/10.1049/pel2.12370>
14. E. Mengistu, B. Khan, Y. Qasaymeh, A. Alghamdi, M. Zubair, A. Awanet al., "Utilization of stockwell transform, support vector machine and d-statcom for the identification, classification and mitigation of power quality problems", Sustainability, vol. 15, no. 7, p. 6007, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15076007>



116: Atıklardan Hidrojen Üretimi**Ergin Özkök**

Veldo Makine ARGE A.Ş.

ÖZET

Bu çalışma, çeşitli atıkların piroliz yoluyla gazlaştırılmasını ve elde edilen sentez gazdan hidrojen gazı üretimini araştırmayı amaçlamaktadır. Projenin temel amacı, atık yönetimi ve temiz enerji üretimi konularında sürdürülebilir ve verimli çözümler geliştirmektir. Atıkların yarattığı görsel kirlilik dışında, doğal bozulma süreçlerinde yaydıkları CO₂, CH₄ ve partiküller, sera gazı emisyonlarını artırır. İklim değişikliği ve buna bağlı olarak gelişen çölleşme etkisini hızlandırır. Çalışmada, çeşitli organik atıklar (plastik, biyokütle, madeni yağlar) kullanılarak sürekli bir piroliz reaktörü işletilmiştir. Piroliz işlemi sonucu elde edilen sentez gazın bileşimi gaz kromatografisi ile analiz edilmiş, hidrojen zenginleştirme süreçleri için farklı membran teknolojileri test edilmiştir. Elde edilen veriler, piroliz işlemiyle atıklardan yüksek saflıkta hidrojen gazı elde edilebileceğini göstermektedir. Bu yöntem atıkların doğal bozulma sürecinde yaydıkları emisyonları engellediği için karbon negatif bir teknolojidir. Çeşitli atık türlerinin işlenmesi sonucunda, hidrojen gazı içeriği %40-60 aralığında değişen sentez gazları üretildi. Membran teknolojileri kullanılarak hidrojenin saflığı %95'in üzerine çıkarılmıştır. Ayrıca, piroliz süreci sırasında oluşan karbon monoksit ve karbon dioksit gazlarının, enerji üretimi ve sera gazı yönetimi gibi diğer uygulamalarda değerlendirilme potansiyeli gözlenmiştir. Bu sonuçlar, piroliz yöntemiyle atık işleme ve hidrojen üretimi arasındaki sinerjinin, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Araştırma, atık malzemelerden sürdürülebilir bir şekilde hidrojen üretimi yapılmasının mümkün olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, hem atık yönetimi problemlerine yenilikçi bir çözüm sunmakta hem de fosil yakıtların yerini alabilecek temiz enerji kaynaklarına erişim sağlamaktadır. Projede elde edilen bulgular, endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği yüksek ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji dönüşümü modeli oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık, Çevre, Hidrojen**ABSTRACT**

This study aims to investigate the gasification of various wastes through pyrolysis and the production of hydrogen gas from the resulting syngas. The primary objective of the project is to develop sustainable and efficient solutions in the fields of waste management and clean energy production. In addition to the visual pollution created by wastes, the CO₂, CH₄, and particulates they emit during natural degradation processes increase greenhouse gas emissions, accelerating the effects of climate change and subsequent desertification.

In the study, a continuous pyrolysis reactor was operated using various organic wastes (plastics, biomass, lubricating oils). The composition of the syngas obtained from the pyrolysis process was analyzed using gas chromatography, and different membrane technologies were tested for hydrogen enrichment processes. The data obtained shows that high-purity hydrogen gas can be produced from wastes through the pyrolysis process. Since this method prevents emissions released during the natural degradation of wastes, it is a carbon-negative technology.

As a result of processing various types of waste, syngas with hydrogen content ranging from 40-60% was produced. Using membrane technologies, the purity of hydrogen was increased to over 95%. Additionally, the potential for utilizing carbon monoxide and carbon dioxide gases produced during the pyrolysis process in other applications such as energy production and greenhouse gas management was observed. These results demonstrate that the synergy between waste processing and hydrogen production through the pyrolysis method can contribute to environmental sustainability. The research indicates that it is possible to produce hydrogen sustainably from waste materials. This approach provides an innovative solution to waste management problems and access to clean energy sources that can replace fossil fuels. The findings obtained in the project allow for the creation of an energy conversion model that is highly applicable on an industrial scale and environmentally sustainable.

Keywords: Environment, Hydrogen, Waste

GİRİŞ

Endüstriyel gelişim ve artan nüfus, atık yönetimi ve enerji üretimi konularında büyük zorluklar yaratmaktadır. Bu durum,, fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesine neden olmakta, küresel ısınma sorununu beraberinde getirmekte ve enerji arz güvenliği açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır (Duman ve Yanık, 2017). Dünyanın karşı karşıya olduğu en büyük çevresel sorunlardan biri, hızla artan atık miktarlarıdır. Bu atıklar, doğal çevreye büyük zararlar vermekte ve mevcut atık yönetim sistemlerinin kapasitesini zorlamaktadır. Atıkların uygunsuz şekilde bertaraf edilmesi, çevreye büyük zararlar vermekte ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle, atıkların doğru şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır (Nguyen, 2020). Atık yönetimi, modern toplumların en büyük çevresel zorluklarından biridir. Atıkların doğru şekilde yönetilmesi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de insan sağlığı açısından kritiktir. Geleneksel atık yönetimi yöntemleri arasında düzenli depolama, yakma ve geri dönüşüm bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler, özellikle düzenli depolama ve yakma, yüksek miktarda sera gazı emisyonuna neden olarak çevresel etkileri artırmaktadır. Bu yöntemlerin yerine, daha sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir (Uddin vd., 2008). Bununla birlikte, fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi, yüksek sera gazı emisyonlarına neden olarak iklim değişikliğini hızlandırmaktadır (Liu vd., 2014). Bu bağlamda, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarının geliştirilmesi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Piroliz yöntemi, organik atıkların yüksek sıcaklıkta oksijensiz ortamda termal bozunması sürecini ifade eder. Bu süreç, atıkların gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüştürülmesini sağlar ve bu ürünler enerji üretimi, kimyasal hammaddeler ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Piroliz teknolojisinin avantajları arasında düşük emisyon değerleri, enerji geri kazanımı ve geniş bir atık yelpazesinin işlenebilirliği bulunmaktadır(Duman & Yanık, 2017).

Literatürde, piroliz yönteminin atık yönetiminde etkin bir çözüm olduğu ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğu geniş çapta kabul görmektedir. Piroliz sonucu elde edilen gaz, sentez gaz olarak bilinir ve metan, hidrojen, karbon monoksit, karbon dioksit gibi çeşitli bileşenleri içerir. Sentez gazın bileşimi, kullanılan atık türüne ve piroliz koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Literatürde, çeşitli atık türlerinin piroliz yoluyla sentez gaz üretimi üzerine yapılan çalışmalar, bu yöntemin etkinliğini ve potansiyelini ortaya koymaktadır (Duman & Yanık, 2017). Ayrıca, sentez gazın hidrojen içeriğinin artırılması için çeşitli zenginleştirme yöntemleri ve teknolojileri de araştırılmaktadır. Hidrojen, düşük emisyonlu enerji üretimi ve sürdürülebilir enerji çözümleri için büyük bir potansiyele sahiptir. Hidrojen üretiminde kullanılan yöntemler arasında buhar reforming, elektroliz ve piroliz yer almaktadır. Buhar reforming, doğal gaz gibi hidrokarbonların yüksek sıcaklıkta su buharı ile reaksiyona sokulmasıyla hidrojen üretir. Elektroliz ise suyun elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrıştırılmasıdır (Nguyen et al., 2020). Hidrojen, temiz enerji üretimi için önemli bir bileşen olup, düşük emisyonlu enerji üretiminde ve yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Bu nedenle, atıklardan hidrojen üretimi, çevresel sürdürülebilirliğe ve enerji güvenliğine katkıda bulunabilecek yenilikçi bir çözüm sunmaktadır (Uddin et al., 2008). Piroliz, organik atıkların yüksek sıcaklıkta oksijensiz ortamda termal olarak parçalanmasıyla hidrojen üretiminde yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Piroliz yöntemi, özellikle atık yönetimi ile entegre edildiğinde, karbon negatif bir teknoloji olma potansiyeline sahiptir (Liu et al., 2014). Literatürde, piroliz yoluyla yüksek saflıkta hidrojen üretimi ve bu süreçte kullanılan membran teknolojileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Membran teknolojileri, sentez gazdan hidrojenin ayrıştırılması ve saflığının artırılması için etkili bir yöntemdir (Nguyen et al., 2020).

Bu çalışmanın temel amacı, çeşitli organik atıkların piroliz yoluyla gazlaştırılması ve elde edilen sentez gazdan yüksek saflıkta hidrojen gazı üretimidir. Çalışmada, plastik, biyokütle ve madeni yağlar gibi farklı organik atık türleri kullanılarak sürekli bir piroliz reaktörü işletilmiştir. Piroliz işlemi sonucu elde edilen sentez gazın bileşimi gaz kromatografisi ile analiz edilmiş, hidrojen zenginleştirme süreçleri için farklı membran teknolojileri test edilmiştir. Elde edilen veriler, piroliz işlemiyle atıklardan yüksek saflıkta hidrojen gazı elde edilebileceğini göstermektedir (Duman & Yanık, 2017). Ayrıca, piroliz süreci sırasında oluşan karbon monoksit ve karbon dioksit gazlarının, enerji üretimi ve sera gazı yönetimi gibi diğer uygulamalarda değerlendirilme potansiyeli gözlenmiştir (Nguyen et al., 2020). Çalışmanın bir diğer önemli katkısı, atık yönetimi ve enerji üretimi konularında sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine yönelik yeni bir yaklaşım sunmasıdır. Atıkların piroliz yoluyla işlenmesi, sadece atık miktarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda değerli enerji kaynaklarının geri kazanılmasını da sağlamaktadır (Uddin et al., 2008). Bu yöntem, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak, sera gazı emisyonlarını düşürmekte ve çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunmaktadır (Liu et al., 2014). Araştırma bulguları, endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği yüksek ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji dönüşümü modeli oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışma, atık malzemelerden sürdürülebilir bir şekilde hidrojen üretimi yapılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, hem atık yönetimi problemlerine yenilikçi bir çözüm sunmakta hem de fosil yakıtların yerini alabilecek temiz enerji kaynaklarına erişim sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, gelecekteki enerji politikaları ve atık yönetim stratejileri için önemli bilgiler sunmaktadır.

PIROLİZ YÖNTEMİ VE SENTEZ GAZ ÜRETİMİ

Piroliz, organik materyallerin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda termal olarak bozunması sürecidir. Bu süreçte, organik atıklar gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüştürülür (Duman & Yanik, 2017). Piroliz prosesi ön hazırlama işlemi ile başlar. Atıklar <1cm olacak şekilde, kırıcı üniteye parçalanır. Parçalanmış atıklar nemden arındırılmak üzere, atık ısı kullanan kurutma ünitesine taşınır. Kurutma ünitesinde nem oranı < %15 olacak şekilde kurutulur. > %15 nem oranı, reaktör içerisinde basıncın kontrolünü zorlaştırır ve enerji verimliliğini düşürür. Kurutulmuş atık partikülleri, daha önce istenen sıcaklığa gelmiş reaktör içerisine hava kilidinden geçerek giriş yapar. Piroliz sürecinin başlangıcında, organik atıklar yüksek sıcaklıklara maruz bırakılır. Bu sıcaklık, atığın türüne göre değişir. Sentetik bazlı atıklarda 350-500°C termal kırılma için uygunken, biyokütle atıklarında lignin yapısının zor kırılmasından dolayı bu sıcaklıklar 550-700°C arasında değişir ve işlem oksijen yokluğunda gerçekleştirilir. Oksijensiz ortam, yanma yerine termal bozunmanın gerçekleşmesini sağlar. Bu durum, piroliz ile elde edilen ürünlerin yanma sırasında oluşabilecek zararlı emisyonların önlenmesine yardımcı olur (Bridgwater, 2012). Piroliz işlemi, üç ana ürün tipi üretir: gaz, sıvı (piroliz yağı) ve katı (biyokarbon). Gaz ürünler arasında hidrojen, karbon monoksit, metan ve karbon dioksit bulunur. Bu gaz karışımına sentez gaz denir ve enerji üretiminde ve kimyasal üretim süreçlerinde kullanılabilir. Gazın içeriği de hammadde türüne göre farklılık gösterir. Atığın türü ne olursa olsun sentez gazı içerisinde yüksek oranda hidrojen ve karbon monoksit gazları bulunur. Hidrojen üretim sürecinde kullanılan temel iki gaz bunlardır. Biyokütle bazlı atıkların pirolizi ile üretilen toplam sentez gazı miktarı, atığın toplam kütlelerinin %50 si kadardır. Sentez gazının içeriğinde ise %13 hidrojen ve %24 karbon monoksit bulunur. Karbon monoksitin de su buharı ile kimyasal tepkimesinden, Hidrojen ve karbondioksit üretilir. Sıvı ürünler, genellikle biyoyakıt olarak değerlendirilebilen piroliz yağlarından oluşur. Katı ürün olan biyokarbon ise toprak iyileştirici olarak veya enerji üretiminde kullanılır (Czernik & Bridgwater, 2004). Piroliz sürecinin avantajlarından biri, geniş bir atık yelpazesinin işlenebilir olmasıdır. Plastik, biyokütle, lastik ve çeşitli endüstriyel atıklar piroliz işlemine tabi tutulan atıklardır. Bu çeşitlilik, piroliz yönteminin atık yönetiminde etkin bir çözüm olmasını sağlar. Ayrıca, piroliz süreci düşük emisyon değerleri ve enerji geri kazanımı gibi çevresel avantajlar sunar. Piroliz, atıkların doğal bozulma sürecinde yaydıkları CO₂ ve CH₄ gibi sera gazı emisyonlarını engelleyerek, çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlar (Liu et al., 2014).

DENEYSSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada, piroliz yöntemiyle hidrojen üretimi için iki farklı türde atık kullanılmıştır. Zeytin çekirdeği, biyokütle olarak seçilmiş ve piroliz reaktöründe işlenmiştir. Biyokütle atıkları, yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlidir ve zeytin çekirdeği de bu kategoriye girer. Bu atığın piroliz işlemi sonucunda sentez gazın bileşimi ve hidrojen içeriği analiz edilmiştir. Sentetik atık olarak ömrünü tamamlamış araç lastikleri kullanılmıştır. Araç lastikleri, geri dönüştürülmesi zor olan ve çevreye zarar veren atıklar arasında yer alır. Bu çalışmada, araç lastiklerinin piroliz yoluyla işlenmesi sonucunda elde edilen sentez gazın bileşimi ve hidrojen içeriği incelenmiştir. Her iki atık türü de sürekli bir piroliz reaktöründe işlenmiş ve piroliz işlemi sonucunda elde edilen sentez gazın bileşimi gaz kromatografisi ile analiz edilmiştir. Bu süreçlerin sonuçları, atıklardan yüksek saflıkta hidrojen gazı elde edilebileceğini göstermektedir.

Piroliz reaktörleri, organik maddelerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak termal bozunmaya uğrattığı cihazlardır. Bu reaktörler, biyokütle, plastik, lastik gibi çeşitli organik atıkların işlenmesi için kullanılır. Piroliz işlemi sonucunda katı (biochar), sıvı (bio-oil) ve gaz (syngas) ürünler elde edilir. Piroliz reaktörlerinin tasarımı, işleme koşulları ve kullanılan malzemeler, elde edilen ürünlerin miktarını ve kalitesini belirleyen önemli faktörlerdir. Piroliz reaktörleri genellikle, reaktör kabı, ısıtma sistemi, besleme sistemi, gaz toplama ve soğutma sistemi ile kontrol ve ölçüm sistemlerinden oluşur. Piroliz işleminin verimliliği ve elde edilen ürünlerin özellikleri, reaktörün işletme koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. İşletme koşulları, piroliz reaktöründe dikkat edilmesi gereken temel parametreleri içerir. Piroliz işlemi genellikle 300°C ile 700°C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Düşük sıcaklık pirolizi (300-500°C) daha fazla sıvı ürün (bio-oil) üretirken, yüksek sıcaklık pirolizi (500-900°C) daha fazla gaz ürün (syngas) üretir. Optimal sıcaklık, kullanılan atık türüne ve istenen nihai ürünlere bağlı olarak belirlenir. Isıtma hızı, reaktörün sıcaklığının belirli bir süre içinde ne kadar hızlı arttığını ifade eder. Yavaş ısıtma hızı, atıkların homojen bir şekilde ısınmasını sağlarken, hızlı ısıtma hızı daha ince ve homojen ürünler elde edilmesini sağlar. Yüksek ısıtma hızları genellikle daha yüksek verimde gaz ürünler üretir. Piroliz işlemi atmosferik basınçta veya düşük basınçta (vakum pirolizi) gerçekleştirilebilir. Vakum pirolizi, daha düşük sıcaklıklarda işlem yapılmasını sağlar ve ürünlerin termal bozunmasını azaltır. Atmosferik basınçta yapılan piroliz, daha yüksek sıcaklık ve basınç dayanımı gerektirir. Atıkların reaktöre beslenme hızı ve parçacık boyutu, piroliz işleminin etkinliğini etkiler. Küçük parçacık boyutları, daha homojen ısıtma ve daha yüksek verim sağlar. Besleme hızı, reaktörde optimum sıcaklık ve basınç koşullarının korunmasını sağlar. Piroliz işlemi sırasında reaktörde oluşan gazların akış hızı ve reaktörde kalma süresi (rezidans süresi), elde edilen ürünlerin bileşimini etkiler. Düşük gaz akış hızı ve uzun rezidans süresi, daha fazla katı ürün (biochar) üretirken, yüksek gaz akış hızı daha fazla gaz ürün üretir. Deney çalışmalarında, ömrünü tamamlamış lastikler için 450°C, Zeytin çekirdekleri içinde 650°C sıcaklık koşulları oluşturulmuştur. Ürünlerin parçacık boyutları 1mm olarak belirlenmiş ve reaktör içerisinde 60 dakika kalmıştır. Her iki hammadde içinde nem oranı %3'dür. Piroliz reaksiyonu vakum altında yapılmıştır. Reaktör basıncı -0,12kPa olarak belirlenmiş ve işlem boyunca sabit tutulmuştur. Reaktörde oluşan gazlar vakum ile reaktör dışına taşınarak su soğutmalı kondenselerde sıvı ürünler ayrıştırılmıştır. Gaz fazındaki ürünler gaz depolama tankına 6 Bar basınç ile sıkıştırılarak depolanmıştır. Daha sonra her iki hammadde için gaz tankından numuneler alınarak TÜBİTAK MAM laboratuvarlarında içerik ve kalorifik değer analizleri yapılmıştır.

Tablo 1a. Ölçülen Gazın Bileşimi

| Bileşen | Analiz Sonucu (% mol) |
|-----------------|-----------------------|
| Metan | 14,849 |
| Etan | 1,317 |
| Etilen | 0,560 |
| Propan | 0,315 |
| Propilen | 0,378 |
| İ-bütan | 0,028 |
| n-bütan | 0,055 |
| t-2-büten | 0,040 |
| 1-büten | 0,069 |
| iso-büten | 0,128 |
| c-2-büten | 0,031 |
| i-pentan | 0,010 |
| n-pentan | 0,124 |
| 1-3-bütadien | 0,039 |
| metil asetilen | 0,039 |
| t-2-pentene | 0,024 |
| 2-metil-2-büten | 0,032 |
| 1-pentene | 0,017 |
| c-2-pentene | 0,015 |
| n-hekzan | 0,235 |
| O ₂ | 1,473 |
| N ₂ | 4,455 |
| CO ₂ | 38,518 |
| CO | 24,072 |
| H ₂ | 13,177 |

Tablo 1 Zeytin çekirdeği sentez gazı analiz raporu

| Bileşen | Analiz Sonucu(% mol) |
|------------------------|-----------------------|
| Metan | 13,456 |
| Etan | 2,620 |
| Etilen | 2,996 |
| Propan | 1,638 |
| Propilen | 1,369 |
| metil asetilen(propin) | 0,155 |
| i-bütan | 0,542 |
| n-bütan | 0,363 |
| 1-bütan | 8,324 |
| iso-bütan | 0,297 |
| c2-bütan | 0,009 |
| n-hekzan/(C5+) | 3,070 |
| asetilen | 0,309 |
| propadien | 0,002 |
| t2-bütan | 0,250 |
| 1-3 bütadien | 0,314 |
| CO2 | 6,384 |
| N2 | 10,180 |
| O2 | 0,219 |
| CO | 2,973 |
| H2 | 44,542 |

Tablo 2 Ömrünü tamamlamış lastik sentez gazı analiz raporu

Tablo 1' de verilen verilere göre hidrojen ve karbon monoksit yüzdeleri:

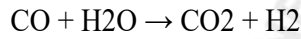
H2 yüzdesi: %13.177

CO yüzdesi: %24.072

Polymide membranlar genellikle yüksek saflıkta hidrojen ayrıştırma kapasitesine sahiptir. Ancak, ayrıştırma verimliliği genellikle %90-95 arasında değişmektedir.

Ortalama verimlilik: %93 alınmıştır.

Su buharı ile karbon monoksit reaksiyonu (Water-Gas Shift Reaction):



Her bir CO molekülü, bir H2 molekülü üretir.

Hidrojen ve karbon monoksitin mol yüzdesine göre hesaplanması:

Aşama 1: Polymide Membran ile Hidrojen Ayrıştırma

Hidrojenin membran ile ayrıştırılması:

$\%13.177 \times \%93 = \%12.255$ hidrojeni yüksek saflıkta ayrıştırılır.

Aşama 2: Su Buharı ile CO'nun Reaksiyonu

CO gazının tamamı su buharı ile reaksiyona girerse:

$\%24.072 \text{ CO} \times \%100 = \%24.072$ ek hidrojen üretimi sağlar.

Aşama 3: Toplam Hidrojen Üretimi

Membran ile ayrıştırılan hidrojen: %12.255

CO'dan elde edilen hidrojen: %24.072

Toplam hidrojen: $\%12.255 + \%24.072 = \%36.327$

Polymide membran kullanılarak ayrıştırılacak ve su buharı reaksiyonu ile elde edilecek toplam hidrojen miktarı, sentez gazın toplam mol yüzdesinin %36.327'si olacaktır. Bu, başlangıçtaki sentez gaz bileşimine dayalı olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2'de verilen verilere göre hidrojen ve karbon monoksit yüzdeleri:

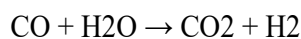
H2 yüzdesi: %44.542

CO yüzdesi: %2.973

Polymide membranlar genellikle yüksek saflıkta hidrojen ayrıştırma kapasitesine sahiptir. Ancak, ayrıştırma verimliliği genellikle %90-95 arasında değişmektedir.

Ortalama verimlilik: %93 alınmıştır.

Su buharı ile karbon monoksit reaksiyonu (Water-Gas Shift Reaction):



Her bir CO molekülü, bir H₂ molekülü üretir.

Hidrojen ve karbon monoksitin mol yüzdesine göre hesaplanması:

Aşama 1: Polymide Membran ile Hidrojen Ayırıştırma

Hidrojenin membran ile ayrıştırılması:

$\%44.542 \times \%93 = \%41.425$ hidrojeni yüksek saflıkta ayrıştırılır.

Aşama 2: Su Buharı ile CO'nun Reaksiyonu

CO gazının tamamı su buharı ile reaksiyona girerse:

$\%2.973 \text{ CO} \times \%100 = \%2.973$ ek hidrojen üretimi sağlar.

Aşama 3: Toplam Hidrojen Üretimi

Membran ile ayrıştırılan hidrojen: $\%41.425$

CO'dan elde edilen hidrojen: $\%2.973$

Toplam hidrojen: $\%41.425 + \%2.973 = \%44.398$

Polymide membran kullanılarak ayrıştırılacak ve su buharı reaksiyonu ile elde edilecek toplam hidrojen miktarı, sentez gazın toplam mol yüzdesinin $\%44.398$ 'i olacaktır. Bu, başlangıçtaki sentez gaz bileşimine dayalı olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma, zeytin çekirdeği ve ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden piroliz yoluyla sentez gazı ve bu gazdan hidrojen üretimini incelemektedir. Türkiye'de yıllık 60 milyon ton tarımsal atık ve 5 milyon ton sentetik atık bulunmaktadır. Bu raporda, zeytin çekirdeği ve ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden elde edilebilecek yıllık toplam hidrojen miktarı ve ekonomik değeri hesaplanmıştır.

Tablo 1: Zeytin Çekirdeği Pirolizi

- H₂ yüzdesi: $\%13.177$
- CO yüzdesi: $\%24.072$
- Polymide membran verimliliği: $\%93$
- Zeytin çekirdeğinden elde edilen sentez gazı, toplam zeytin çekirdeği ağırlığının $\%50$ 'sine eşittir.

Hidrojen Üretimi Hesaplamaları:

1. Polymide Membran ile Hidrojen Ayırıştırma:

- $\%13.177 \times \%93 = \%12.255$ hidrojeni yüksek saflıkta ayrıştırılır.

2. Su Buharı ile CO'nun Reaksiyonu:

- $\%24.072 \text{ CO} \times \%100 = \%24.072$ ek hidrojen üretimi sağlar.

3. Toplam Hidrojen Üretimi:

- Membran ile ayrıştırılan hidrojen: $\%12.255$
- CO'dan elde edilen hidrojen: $\%24.072$
- Toplam hidrojen: $\%12.255 + \%24.072 = \%36.327$

Tablo 2: Ömrünü Tamamlamış Araç Lastikleri Pirolizi

- H₂ yüzdesi: %44.542
- CO yüzdesi: %2.973
- Polymide membran verimliliği: %93
- Ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen sentez gazı, toplam lastik ağırlığının %20'sine eşittir.

Hidrojen Üretimi Hesaplamaları:

- 1. Polymide Membran ile Hidrojen Ayrıştırma:**
 - $\%44.542 \times \%93 = \%41.425$ hidrojeni yüksek saflıkta ayrıştırılır.
- 2. Su Buharı ile CO'nun Reaksiyonu:**
 - $\%2.973 \text{ CO} \times \%100 = \%2.973$ ek hidrojen üretimi sağlar.
- 3. Toplam Hidrojen Üretimi:**
 - Membran ile ayrıştırılan hidrojen: %41.425
 - CO'dan elde edilen hidrojen: %2.973
 - Toplam hidrojen: $\%41.425 + \%2.973 = \%44.398$

Türkiye'deki Yıllık Atık Miktarı ve Hidrojen Üretimi

- 1. Zeytin Çekirdeği (Tarımsal Atık):**
 - Yıllık tarımsal atık miktarı: 60 milyon ton
 - Sentez gaz verimi: %50
 - Hidrojen verimi: %36.327
 - Yıllık hidrojene dönüşen zeytin çekirdeği:
 - $60 \text{ milyon ton} \times \%50 = 30 \text{ milyon ton sentez gaz}$
 - $30 \text{ milyon ton} \times \%36.327 = 10.8981 \text{ milyon ton hidrojen}$
- 2. Ömrünü Tamamlamış Araç Lastikleri (Sentetik Atık):**
 - Yıllık sentetik atık miktarı: 5 milyon ton
 - Sentez gaz verimi: %20
 - Hidrojen verimi: %44.398
 - Yıllık hidrojene dönüşen lastik:
 - $5 \text{ milyon ton} \times \%20 = 1 \text{ milyon ton sentez gaz}$
 - $1 \text{ milyon ton} \times \%44.398 = 0.44398 \text{ milyon ton hidrojen}$

Toplam Yıllık Hidrojen Üretimi

- Zeytin çekirdeğinden yıllık hidrojen: 10.8981 milyon ton
- Lastiklerden yıllık hidrojen: 0.44398 milyon ton
- Toplam yıllık hidrojen üretimi: $10.8981 + 0.44398 = 11.34208$ milyon ton hidrojen

Ekonomik Değer

Hidrojenin piyasa fiyatı (temmuz 2024 itibarıyla): 1 kg hidrojen yaklaşık 6 USD'dir.

- Yıllık toplam hidrojen miktarı: 11.34208 milyon ton (11,342,080,000 kg)
- Yıllık toplam ekonomik değer: $11,342,080,000 \text{ kg} \times 6 \text{ USD/kg} = 68,052,480,000 \text{ USD}$

Türkiye'de yıllık 60 milyon ton tarımsal atık ve 5 milyon ton sentetik atıktan toplam 11.34208 milyon ton hidrojen üretilir. Bu hidrojenin yıllık ekonomik değeri yaklaşık 68.05 milyar USD'dir. Bu, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar hem de önemli bir ekonomik değer yaratır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

TARTIŞMA

Piroliz ve gazlaştırma teknolojileri, organik atıklardan hidrojen üretiminde yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu süreçlerin etkinliği, hem enerji üretimi hem de atık yönetimi açısından değerlidir. Piroliz yöntemi, organik atıkların yüksek sıcaklıkta oksijensiz ortamda termal olarak parçalanmasını ifade eder ve bu süreç, atıkların gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Gaz ürünleri arasında yer alan sentez gaz, metan, hidrojen, karbon monoksit ve karbon dioksit gibi çeşitli bileşenleri içermektedir. Sentez gazın bileşimi, kullanılan atık türüne ve piroliz koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Katalizörlerin Rolü ve Etkisi Piroliz ve gazlaştırma süreçlerinde kullanılan katalizörler, hidrojen üretiminde verimi önemli ölçüde artırabilmektedir. Özellikle Ni ve Fe bazlı katalizörler, yüksek sıcaklıklarda hidrojen üretiminde etkin sonuçlar vermektedir. Ni ve Fe yüklü biyokütle kömürleri, hidrojen üretiminde en yüksek katalitik aktiviteyi göstermiştir. Katalitik yatak sıcaklığının artırılması (500°C'den 700°C'ye) hidrojen üretimini artırmış, ancak biyokütle kömürünün termal kararlılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır. Bu, katalizörlerin termal stabilitesinin, hidrojen üretim sürecinin verimliliği için kritik bir faktör olduğunu göstermektedir.

Hidrojen Üretim Süreçlerinin Karşılaştırılması Farklı hidrojen üretim yöntemlerinin karşılaştırılması, piroliz ve gazlaştırma süreçlerinin avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymaktadır. Buhar reforming, doğal gaz gibi hidrokarbonların yüksek sıcaklıkta su buharı ile reaksiyona sokulmasıyla hidrojen üretirken, elektroliz suyun elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrıştırılmasıdır. Piroliz, organik atıkların termal olarak parçalanmasıyla hidrojen üretiminde yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemin, özellikle atık yönetimi ile entegre edildiğinde karbon negatif bir teknoloji olma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Sentez Gazın Zenginleştirilmesi ve Membran Teknolojileri Piroliz sonucu elde edilen sentez gazın hidrojen içeriğinin artırılması için çeşitli zenginleştirme yöntemleri ve teknolojileri araştırılmaktadır. Membran teknolojileri, sentez gazdan hidrojen ayrıştırılması ve saflığının artırılması için etkili bir yöntemdir. Literatürde, piroliz yoluyla yüksek saflıkta hidrojen üretimi ve bu süreçte kullanılan membran teknolojileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Membranlar, düşük enerji tüketimi ve yüksek seçicilik özellikleri sayesinde hidrojenin diğer gazlardan ayrılmasında önemli avantajlar sunar. Örneğin, Ni bazlı katalizörler kullanılarak sentez gazın hidrojen içeriği artırılabilir ve membran teknolojileri ile bu hidrojen yüksek saflıkta elde edilebilir.

Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmeler Atıklardan hidrojen üretimi, çevresel sürdürülebilirliği artırmak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Piroлиз ve gazlaştırma yöntemleri, atık yönetimi sorunlarını hafifletmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektedir. Ancak, bu teknolojilerin ekonomik olarak sürdürülebilir hale getirilmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmasına ihtiyaç vardır. Öneğin, kullanılan katalizörlerin maliyeti, üretim sürecinin enerji verimliliği ve atık işleme kapasiteleri gibi faktörler, bu teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesinde kritik rol oynamaktadır.

Gelecekteki Araştırma Yönleri Atıklardan hidrojen üretimi üzerine yapılan çalışmalar, bu alandaki potansiyel iyileştirme alanlarını da ortaya koymaktadır. Gelecekteki araştırmalar, piroliz ve gazlaştırma süreçlerinin optimizasyonuna, yeni ve daha verimli katalizörlerin geliştirilmesine ve hidrojen üretim süreçlerinin ekonomik olarak daha sürdürülebilir hale getirilmesine odaklanmalıdır. Ayrıca, hidrojen üretiminde kullanılan yenilikçi teknolojilerin, mevcut enerji altyapıları ile entegrasyonunun sağlanması da önemli bir araştırma konusudur.

SONUÇ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, modern dünyada karşılaşılan en büyük çevresel sorunlardan biridir. Fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan karbon dioksit (CO₂) ve diğer sera gazları, atmosferde birikerek gezegenin ısınmasına yol açmaktadır. Bu durum, buzulların erimesi, deniz seviyelerinin yükselmesi, ekstrem hava olaylarının artması gibi çeşitli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Atıklardan hidrojen üretimi, bu sorunların hafifletilmesinde önemli bir rol oynar. Hidrojen, yanma sırasında yalnızca su buharı ürettiği için karbon emisyonlarını azaltmada etkili bir alternatiftir. Paris Anlaşması gibi uluslararası çevre anlaşmaları, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutmayı hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşmak için ülkelerin karbon emisyonlarını azaltmaları gerekmektedir. Atıklardan hidrojen üretimi, bu çabalara katkı sağlar. Hidrojen enerjisi, yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinde, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltır. Bu, sürdürülebilir bir enerji geleceği için kritik öneme sahiptir. Dünya nüfusunun artması ve sanayileşmenin hızlanması, enerji gereksinimlerinin de artmasına neden olmaktadır. Geleneksel fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel etkileri, alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Hidrojen, enerji yoğunluğu yüksek ve çevre dostu bir enerji taşıyıcısı olarak bu gereksinimleri karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Atıklardan hidrojen üretimi, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını destekleyerek enerji güvenliğini artırır. Organik atıkların doğrudan depolama alanlarına gömülmesi, metan (CH₄) gibi güçlü sera gazlarının atmosfere salınmasına neden olur. Metan, CO₂'den yaklaşık 25 kat daha güçlü bir sera gazıdır ve iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunur. Piroлиз ve gazlaştırma gibi teknolojiler, bu atıkları değerli enerji kaynaklarına dönüştürerek, sera gazı emisyonlarını azaltır. Atıklardan elde edilen hidrojen, hem bu emisyonları azaltmada hem de enerji üretiminde kullanılır. Küresel ısınmanın etkileri, sadece iklim değişikliğiyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda ekosistemlerin bozulmasına, biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve insan sağlığının olumsuz etkilenmesine de yol açar.

Bu nedenle, sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesi ve uygulanması büyük önem taşımaktadır. Atıklardan hidrojen üretimi, karbon nötr veya karbon negatif enerji üretim süreçlerinin bir parçası olarak değerlendirilir. Bu teknolojiler, çevresel sürdürülebilirliği artırmanın yanı sıra, ekonomik kalkınmayı da destekler. Hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, gelecekte enerji sektöründe büyük dönüşümler yaratacaktır. Piroliz ve gazlaştırma teknolojilerinin optimizasyonu, daha yüksek verimlilik ve düşük maliyetle hidrojen üretimini mümkün kılar. Ayrıca, hidrojen üretiminde kullanılan katalizörlerin ve membran teknolojilerinin geliştirilmesi, süreçlerin etkinliğini artırır ve geniş ölçekli uygulamalar için uygun hale getirir. Atıklardan hidrojen üretimi, enerji üretimi ve atık yönetimi sorunlarına sürdürülebilir çözümler sunar. Bu süreçler, çevresel etkileri azaltarak, enerji güvenliğini artırarak ve ekonomik faydalar sağlayarak önemli avantajlar sunar. Gelecekte, bu teknolojilerin daha da geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, sürdürülebilir enerji sistemlerinin oluşturulmasında kritik bir rol oynayacaktır. Politika yapımcıların ve endüstri liderlerinin, bu teknolojilerin desteklenmesi ve uygulanmasına yönelik stratejiler geliştirmesi önemlidir. Atıklardan hidrojen üretimi konusunda daha fazla araştırma ve geliştirme çalışması yapılmalıdır. Bu çalışmalar, süreçlerin verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve teknolojik yenilikleri teşvik etmek için kritik öneme sahiptir. Hükümetler, atıklardan hidrojen üretimi ve diğer yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesini teşvik eden politikalar ve teşvikler oluşturmalıdır. Bu, yatırımcıları ve endüstri liderlerini bu alana yönlendirecektir. Toplumda, hidrojen enerjisinin ve atık yönetiminin önemi konusunda farkındalık artırılmalıdır. Eğitim programları ve bilinçlendirme kampanyaları, bu teknolojilerin kabul görmesini ve benimsenmesini kolaylaştıracaktır. Küresel iklim değişikliği ve enerji sorunları, uluslararası işbirliği gerektirir. Ülkeler arasında bilgi ve teknoloji paylaşımı, atıklardan hidrojen üretimi gibi yenilikçi çözümlerin yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır. Atıklardan hidrojen üretimi, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması, iklim değişikliği ile mücadelede ve yenilenebilir enerjiye geçişte önemli bir rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. doi:10.1016/j.biombioe.2011.01.048
- Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & Fuels*, 18(2), 590-598. doi:10.1021/ef034067u
- Duman, G., & Yanik, J. (2017). Two-step steam pyrolysis of biomass for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(17), 17000-17008. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.05.227.
- Liu, S., Zhu, J., Chen, M., Xin, W., Yang, Z., & Kong, L. (2014). Hydrogen production via catalytic pyrolysis of biomass in a two-stage fixed bed reactor system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(23), 13128-13135. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.06.158.
- Nguyen, V. G., Nguyen-Thi, T. X., Nguyen, P. Q. P., Tran, V. D., Agbulut, U., & Balasubramanian, D. (2020). Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(23), 12824-12835. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.03.114.
- Uddin, A., Tsuda, H., Wu, S., & Sasaoka, E. (2008). Catalytic decomposition of biomass tars with iron oxide catalysts. *Fuel*, 87(4-5), 451-459. doi:10.1016/j.fuel.2007.05.026.

117: Türkiye Kalkınma Planlarında Elektrik Enerjisi Sektörüne Yaklaşım ve Gerçekleşmelere Bakış

Mehmet Bulut

Elektrik Üretim A.Ş Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

İbrahim Öz

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye

ÖZET

Kalkınma Planı (KP) Türkiye'de 1963 yılından bu yana kamu yönetiminin ilgili kurumu olan eskiden Başbakanlığa bağlı Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) ve sonrasında Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji Ve Bütçe Başkanlığı tarafından hazırlanan ve ekonomi, sağlık, eğitim, ulaşım, sosyal güvenlik, adalet vb. konuları kapsayan, konularda iyileştirme ve gelişmeyi amaçlayan ve uygulanacak politika ve hedefleri belirleyen bir plan niteliğindedir. Ülke genelinde tasarrufu artırmak, yatırımların toplum yararına olacak şekilde, gerektirdiği önceliklerle yöneltmek ve ekonomik, sosyal ve kültürel kalkınmayı gerçekleştirmek üzere ilk olarak Birinci Beş Yıllık (1963 - 1967) Kalkınma Plânı hazırlanmıştır. Birinci Beş Yıllık Kalkınma Plânı, 16 Ekim 1962 tarihli ve 77 sayılı Uzun Vâdeli Plânın Yürürlüğe konması ve Bütünlüğünün Korunması hakkındaki Kanun hükümlerine uygun olarak Türkiye Büyük Millet Meclisi Plân Karma Konüsyonu, Cumhuriyet Senatosu ve Millet Meclisinde görüşülüp 21 Kasım 1962 tarihinde onaylanmış ve 3 Aralık 1962 tarihli ve 11272 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanmıştır. En son yeni bir yaklaşım ortaya konularak 2024-2028 yıllarını kapsayan onikinci 5 yıllık kalkınma hedeflerini içeren onikinci kalkınma planı yayınlanmıştır. Bu çalışmada Türkiye'nin kalkınma planlarında enerji konusunun nasıl ele alındığı, dönemler itibariyle hangi enerji konularına ağırlık verildiği, ön plana çıkarıldığı, hangi stratejiler ve hedeflerin ele alındığı ile sonraki dönemlerde bunların gerçekleşme durumları irdelenmiştir. Kalkınma planlarında enerji ile ilgili hedefler ve hedeflerin gerçekleştirilmesi ile ilgili bilgiler, plan raporlarından derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Kalkınma Planı, Enerji Kaynakları, Elektrik Enerjisi

GİRİŞ

Türkiye'de kalkınma süreci 1960'lı yıllardan itibaren DPT'nin hazırladığı beş yıllık planlar doğrultusunda şekillenmiştir. Bu planlarda, ekonomik gelişmede öncelik verilecek sektörler ve politikalar netleştirilerek, dönem hedefleri planlanan döneme göre daha bütünsel bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Planlı dönemle birlikte enerjinin önemi daha iyi anlaşılmış ve enerji sektörünün ulusal kalkınma hedeflerine ulaşabilmek için önem verilmesi gereken temel alanlardan biri görülmüştür. Kalkınma Planı (KP), Türkiye'de 1963 yılından bu yana kamu yönetiminin ilgili kurumu olan eskiden Başbakanlığa bağlı Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) ve sonrasında Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji Ve Bütçe Başkanlığı tarafından hazırlanan ve beş yıllık ekonomi, sağlık, eğitim, ulaşım, sosyal güvenlik, adalet vb. konuları kapsayan, bu konularda iyileştirme ve gelişmeyi amaçlayan ve uygulanacak politika ve hedefleri belirleyen bir plan niteliğindedir [1].

1960'lı yıllar sonrasında ülke genelinde tasarrufu artırmak, yatırımların toplum yararına olacak şekilde, gerektirdiği önceliklerle yöneltmek ve ekonomik, sosyal ve kültürel kalkınmayı gerçekleştirmek üzere ilk olarak Birinci Beş Yıllık (1963 - 1967) Kalkınma Plânı hazırlanmıştır. Birinci Beş Yıllık Kalkınma Plânı, 16 Ekim 1962 tarihli ve 77 sayılı Uzun Vâdeli Plânın Yürürlüğe konması ve Bütünlüğünün Korunması hakkındaki Kanun hükümlerine uygun olarak Türkiye Büyük Millet Meclisi Plân Karma Konüşyonu, Cumhuriyet Senatosu ve Millet Meclisinde görüşülüp 21 Kasım 1962 tarihinde onaylanmış ve 3 Aralık 1962 tarihli ve 11272 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanmıştır. Bu planlar çerçevesinde; en son yayınlanan onikinci kalkınma planında yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. 2024-2028 yılları arasındaki onikinci 5 yıllık kalkınma hedeflerini içeren planın enerji bölümünün amacı, '2053 net sıfır emisyon hedefini esas alarak' başlamakta, planda nükleer enerjiyi daha fazla kullanmak, enerji verimliliğini artırmak, yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirerek kendine yeterli olmak gibi birçok hedef yer almıştır.

Bu çalışmada şimdiye kadar toplam 12 kez yayınlanan kalkınma planları enerji sektörü açısından incelenmiştir. Bu anlamda Türkiye'nin kalkınma planlarında enerji konusunun nasıl ele alındığı, dönemler itibarıyla hangi enerji konularına ağırlık verildiği, ön plana çıkarıldığı, hangi stratejiler ve hedeflerin ele alındığı ile sonraki dönemlerde bunların gerçekleşme durumları irdelenmiştir. Kalkınma planlarında enerji ile ilgili hedefler ve hedeflerin gerçekleştirilmesi ile ilgili bilgiler, plan raporlarından derlenmiştir.

YÖNTEM

Türkiye'nin yayınlanmaya başlanan Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1963-1967) ile birlikte 15 yıllık bir perspektif planı devreye konulmuş, plan genelinde İkinci Dünya Savaşı sonrasında Batı Avrupa ülkelerinde uygulamaya konan "yol gösterici plan" anlayışını benimsemiştir [2]. Enerji konusu bu dönemde de önemli bir yer tutmuştu. Bu dönemde enerji konusu, Türkiye'nin kalkınma hedefleri doğrultusunda ele alınmış ve enerji sektörüne yönelik temel adımlar atılmıştır. Yerli enerji üretimi ve verimliliği, bu plan döneminde öncelikli konular arasında yer almıştır. Türkiye'nin sonraki kalkınma planlarında da enerji konusu, farklı dönemlerde çeşitli stratejiler ve hedeflerle ele alınmıştır. Bu anlamda, planlarda Enerji ihtiyacının karşılanmasında öncelikli olarak ele alınan kaynak ve gerçekleşme açısından, KP dönemlerinin kaynak bazında bir aşağıdaki şekilde bir sınıflama yapılabileceği değerlendirilmiş ve şimdiye kadar yayınlanan kalkınma planları 4 ana dönem altında incelenmiştir.

Tablo 1. Türkiye Cumhuriyeti hükümetleri tarafından yayınlanan Kalkınma Planları

| | |
|---|--|
| 1960-1980 Hidrolik Dönemi | 1. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1963-1967) 2. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1968-1972) 3. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1973-1977) |
| 1980-2000 Kömür Dönemi | 4. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1979-1983) 5. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1985-1989) 6. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1990-1994) 7. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1996-2000) |
| 2001-2018 Doğalgaz + İthal Kömür | 8. Uzun Vadeli Strateji ve Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2001-2005) 9. Kalkınma Planı (2007-2013) 10. Kalkınma Planı (2014-2018) |
| 2019-2028 Yenilenebilir Enerji ve Nükleer Dönemi | 11. Kalkınma Planı (2019-2023) 12. <u>Kalkınma Planı (2024-2028)</u> |

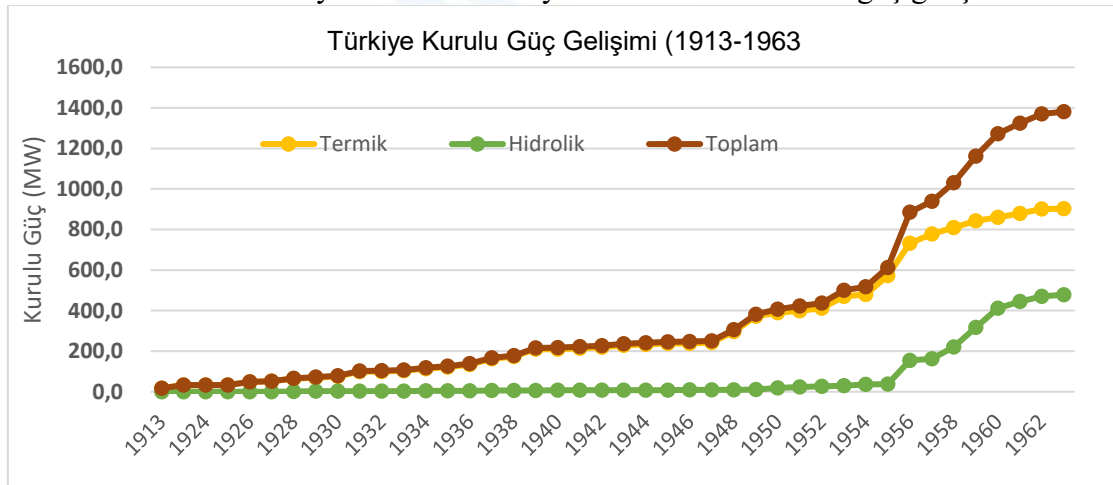
BULGULAR

Türkiye'de elektrik enerjisinin kullanımı, 12 Aralık 1888'de açılan İstanbul Haliç Tersanesi'nde kurulan fabrikada elektrik üretimi ile başlamıştır. Türkiye'nin ilk enerji santrali 1902 yılında Tarsus'ta küçük su türbini şeklinde 2 kW'lık hidroelektrik santral olarak kurulmuştur. Büyük çapta kurulan ilk enerji santrali, 14 Şubat 1914'te İstanbul Silahtarağa'da kurulan 15 MW gücündeki termik santraldir.

İstanbul ve çevresinin artan elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla 1948 yılında Çatalağzı Termik Santrali işletmeye alınmış ve 1952 yılında 154 kV iletim hattıyla elektrik İstanbul'a taşınmıştır [3]. 1950'li yıllara gelindiğinde Türkiye'nin kurulu gücü 407,8 MW'a, yıllık elektrik üretimi ise 500 milyon kWh'a ulaştı. 1956 yılında Türkiye'de elektrik sektöründe büyük bir hamle yapılarak, Adana'da Seyhan Barajı ve HES, Ankara'da Sarıyar Barajı ve HES, Kütahya'da Tunçbilek Termik Santrali olmak üzere üç büyük enerji santrali işletmeye açıldı. 1958 yılında Aydın'da Kemer Barajı ve HES, 1959 yılında Kırşehir'de Hirfanlı Barajı ve HES, 1960 yılında Manisa'da Demirköprü Barajı ve HES hidroelektrik santralleri işletmeye alınmıştır.

Türkiye'de ilk kalkınma planının yayınlandığı, 1960'lı yıllara gelindiğinde, 1962 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin elektrik kurulu güç kapasitesi toplam 1371 MW değerinde olup bunun 901 MW'ı termik santrallerinden ve 470 MW'ı da hidroelektrik santrallerden oluşmaktadır (Şekil 1). Büyük ölçekli olarak Çatalağzı Termik Santrali, Tunçbilek Termik Santrali ve Seyhan HES, Sarıyar HES, Kemer Barajı HES, Hirfanlı Barajı HES, Demirköprü HES hidroelektrik santralleri devreye alınmıştır.

Grafik 1: Türkiye'de 1913-1963 yılları arasındaki kurulu güç gelişimi



Türkiye'de kalkınma planlarında, enerji sektöründeki yavaşlama ve eksikliklerin sanayi sektöründeki gelişmeleri etkileyerek büyüme hedeflerine ulaşmayı zayıflatabileceği hususlarından yola çıkılarak hedefler belirlenmiştir. Kalkınma planlarında 1980 senesine kadar, enerji sektörü, sanayi sektörü ile birlikte ele alınmış, enerji tüketimi doğrudan sanayideki gelişme ile eşdeğer tutulmuştur.

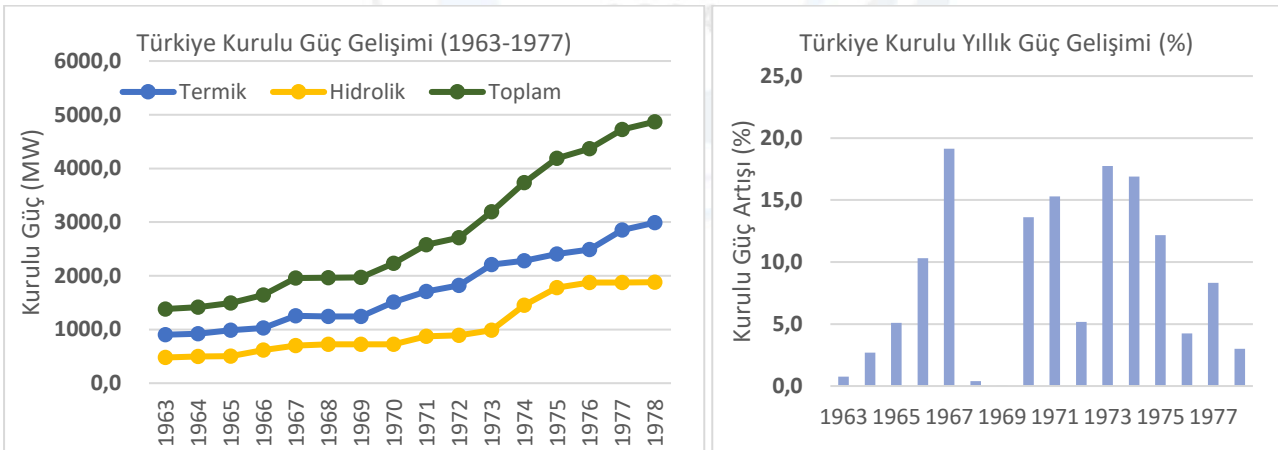
Türkiye'nin 1980-2000 yılları arasında piyasa ekonomisini tercih etmesiyle özel sektör de enerji piyasasına dahil olmuş ve elektrik üretiminde rol oynamaya başlamıştır. 2000'li yıllar Türkiye'nin enerji alanının serbest piyasa faaliyetlerine açıldığı, başta elektrik ve doğal gaz olmak üzere özel sektörün piyasaya girebilmesi için kurumsal çerçevenin oluşturulduğu, EPDK'nın da Enerji piyasasındaki faaliyetlerin koordinasyonunu sağlamak üzere kurulduğu yıllardır.

Ekonomik büyümeye dayalı bir kalkınma yaklaşımının hakim olduğu Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılmasındaki temel motivasyonun, enerjide bağımlılığın azaltılması ve enerji arz güvenliğinin sağlanması olmuştur. Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında kaynak potansiyeli çok güçlü bir ülke olarak önümüze çıkmaktadır. Nitekim 2000'li yıllarda bu potansiyel kullanılmaya başlanmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimindeki payı her geçen gün artış göstermiştir. Talebin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması, bu yenilenebilir kaynakların geliştirilebilir potansiyeli hakkında güçlü bir fikir vermektedir. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının durumuna bakıldığında en büyük potansiyelin ve ilerlemenin güneş enerjisinde olduğu görülmektedir.

3.1 KALKINMA PLANLARI 1960 – 1980 DÖNEMİ

Türkiye kalkınma planlarının 1960-1980 yıllar arasındaki elektrik kurulu kapasite gelişimine bakıldığında, birinci plan döneminde yıllar bazında artış göstererek 1967 yılında yüzde 20 artış göstermesine rağmen, ikinci ve üçüncü dönemlerde yıllara göre farklılıklar göstermiştir [4]. Ancak üç dönemi kapsayan 1960-1980 arası dönemde kurulu kapasitesi 2,6 kat artış göstermiştir (Grafik 1).

Grafik 2: Türkiye’de 1913-1963 yılları arasındaki kurulu güç gelişimi ve artış hızı



3.1.1 Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1963-1967) – 534 Sayfa

1963 yılından itibaren beş yıllık dönemi içeren plan, Türkiye'nin gelecek 15 yılına yönelik hedefleri de içermektedir. Enerji konusu, planda ayrı bir başlık altında ele alınmış, odun, tezek ve tarım atıkları gibi ticari olmayan enerji kaynaklarının kullanımı azaltılmalı, yerli enerji üretimine ağırlık verilmeli, kömür, linyit, petrol ürünleri ve hidroelektrik üretimi artırılması hedefleri konulmuştur. Planda; Türkiye’de 1935 de maden ve elektrik gibi sınırlı bir alanda çalışmak üzere Etibank kurulduğu ve planın hazırlandığı 1962’de Türkiye’de bugün nüfusun yüzde 30,5 i elektrikten yararlanmakta olduğu, nüfus artışıyla gittikçe büyüyen kütlelerin ihtiyaçlarının karşılanması ve yaşama seviyelerinin yükseltilmesinin şart olduğu belirtilmiştir [5].

İlk kalkınma planında, yurdumuzun hidrolik enerji potansiyeli büyük olduğu, kullanılabilir hidrolik potansiyeli yılda 53 milyar kwh olarak hesaplanmıştır. Türkiye’de o günün şartlarında hazırlanan hidrolik potansiyelinin, günümüz verileriyle değerlendirildiğinde; 2019 yılında 89 Milyar kWh ile rekor kılınmıştır, sonrasında 2020 yılında 78 milyar kWh üretim gerçekleşmiş ve önceki ve sonraki yıllarda 70 Milyar kWh üretimin üstüne çıkılamamıştır. Planın yazıldığı 1962 yılı verilerine göre, kurulu kapasite 766 MW olup elektrik üretimi 3050 milyon kWh saat olarak gerçekleşmiş, plan dönemi sonunda 1381 MW ve 6539 milyon kWh’a ulaşması hedeflenmiştir (Tablo 2, 3).

Tablo 2. Elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına dağılımı

| | Gerçekleşme milyon kWh Üretim | Proje Üretim milyon kWh Kapasite |
|-----------------|-------------------------------------|--|
| HİDROLİK | | |
| Biriktirmeli | 1 073 | 1 374 |
| Akarsu | 203 | 388 |
| TERMİK | | |
| Kömür | 1 486 | 2 700 |
| Akaryakıt | 245 | 420 |
| Ötekiler | 43 | 12 |
| TOPLAM | 3 050 | 4 894 |

Kaynak : 1.BYKP

Tablo 3. Elektrik enerji talep tahminleri

| Yıllar | (Milyon Kw.h.) | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------|---------|--------------|---------|------------------|---------|-----------------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | Kuz. Batı sistemi | | Batı sistemi | | Çukurova sistemi | | Antalva sistemi | | Sistem | | Toplam | |
| | Güç MW | En. En. | Güç MW | En. En. | Güç MW | En. En. | Güç MW | En. En. | Güç MW | En. En. | Güç MW | En. En. |
| 1962 | 445 | 2360 | 76 | 353 | 40 | 182 | 22 | 109 | 178 | 546 | 766 | 3550 |
| 1963 | 510 | 2663 | 90 | 423 | 45 | 207 | 23 | 157 | 187 | 561 | 855 | 4011 |
| 1967 | 800 | 4200 | 157 | 768 | 100 | 456 | 32 | 192 | 292 | 923 | 1381 | 6539 |

Kaynak : 1.BYKP

Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planında, Fırat Nehri üzerinde 980 MW gücünde ve 4,5 milyar kWh. yıllık enerji üretim kapasitesinde Keban Hidroelektrik Santrali de dâhil olmak üzere 1900 MW’lık hidrolik ve termik santralin yapılması hedefkonulmuştur. Plana göre, yüksek gerilimli şebekeye plân döneminde 9 bin Km. hat eklenecektir. Planda, Elektrik işleri bir elden yönltilmesi gerektiği, bunu sağlamak üzere Türkiye Elektrik Kurumu’ nun hemen kurularak, bütün tesisler bu Kuruma bağlanacağı belirtilmiştir.

3.1.2 İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1968-1972) – 665 Sayfa

İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı döneminde enerji ihtiyacının karşılanması için nükleer enerji kaynaklarının araştırılmaya başlandığı ve nükleer santral kurulmasının yararlı olacağı değerlendirildiği görülmektedir. Planda elektrik üretimine özel bir önem verilmiş, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin artırılması çabası ön plana çıkmıştır. Planda, 1966 yılında ele alınan projelerin tamamlanmasıyla elektrikli köy sayısı 693 olacağı, kurulacak baraj hidro elektrik santralleri, fabrikalar ve enerji hatlarının metal konstrüksiyon kısımları yurt içinde üretileceği belirtilmiştir [6]. Planda, ortaya çıkacak elektrik talebinin, öncelikle hidroelektrik santrallerden karşılanacağı “Enerji ihtiyacının karşılanmasında öncelik su kaynaklarının geliştirilmesine verilecektir.” ifadesiyle belirtilmiştir.

Plan Öncesi Gerçekleşme:

Birinci Beş Yıllık Plan dönemi başlarında, mevcut fazla kapasite ve yağış durumunun olumlu etkisi dolayısıyla büyük üretim kapasiteleri eklenilmeden elektrik enerjisi talebi artışı belirli bir sınır içinde karşılanabilmiştir. Ancak Plan dönemi sonunda yeni kapasiteler devreye girdiği halde 1968 - 1969 yıllarında talebin karşılanmasında sıkıntı çekilecektir. 1962 - 1963 yıllarında sırası ile 1448 ve 1480 MW olan alınabilir net güç 1967 de 2186 MW a yükselmektedir. Birinci Beş Yıllık Planın kömür madenciliği için öngördüğü üretim hedeflerine ulaşılmıştır. Süratle gelişen imalât sanayii sektörünün bol ve ucuz enerjiye olan ihtiyacı ortadadır. Ayrıca şehirleşme enerji talebi artışlarını daha da hızlandırmaktadır.

Plan Hedefleri :

Kömür, petrol ve hidrolik enerji yanında tabii gazda dünya memleketlerinin enerji dengelerinde önemli bir yer almıştır. Türkiye'de henüz üretime elverişli tabii gaz rezervine raslanmamıştır. Bu konudaki aramalara İkinci Beş Yıllık Plan döneminde ağırlık verilecektir. **Bu arada tabii gazın, geniş üretim imkânlarına sahip komşu ülkelerden ithali üzerinde durulacaktır.**

Elektrik enerjisi talebinin karşılanmasında darboğaz yaratmamak için, üretim, iletim ve dağıtım imkânları mevcut talep seviyesinin üzerinde olacak şekilde geliştirilecektir. Enterkonnekte şebekenin hızla geliştirilmesi esas olacaktır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında öncelik su kaynaklarının geliştirilmesine verilecektir. Nükleer enerji kaynaklarından faydalanma imkânları araştırılacak ve nükleer enerji santralleri kurulmasına çalışılacaktır. Sanayi yeraltı kaynaklarından sağlanan ham madde ve enerji ihtiyacı öncelikle yerli üretimle karşılanacaktır. Bu konuda mevcut enerji kaynaklarından en yüksek verimi sağlayacak tedbirler alınırken, meselâ, **nükleer enerji gibi geleceğin enerji kaynaklarından da faydalanma imkânları araştırılacaktır.**

Planda, elektrik üretiminde dönem sonunda yüzde 14 talep artışı olacağı tahmini yapılmıştır (Tablo 4)

Tablo 4. Plan dönemi Elektrik enerji talep hedefleri ve tahminleri

| | TABLO : 360 — Elektrik Talep ve Üretimi | | | | (Milyon Kw.h.) | |
|----------------------------|---|-------|-------|--------|----------------------------|-------------------|
| | 1962 | 1963 | 1967 | 1972 | Endeks 1972 1967=100 | Yıllık artış % |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| Talep | 3 059 | 2 406 | 5 255 | 10 100 | 192 | 14 |
| İç ihtiyaç ve şebeke kaybı | 500 | 577 | 995 | 1 750 | 176 | 12,8 |
| Brüt üretim | 3 559 | 3 983 | 6 250 | 11 850 | 190 | 13,9 |

Kaynak : 2.BYKP

Birinci Beş Yıllık Plan dönemi başında taşkömürü eş değeri olarak toplam 22 milyon ton olan enerji tüketimi dönem sonunda 30 milyon tona çıkmıştır ve İkinci plan dönemi sonunda toplam enerji tüketiminin 42,5 milyon tona çıkacağı tahmin edilmiştir (Tablo 5). Hızla yükselen talebi karşılamak için petrol ürünlerinin İkinci Beş Yıllık Plan döneminde daha fazla kullanılması gerekeceği tahmin olunmaktadır .

Tablo 5. Plan dönemi elektrik enerji talep hedefleri ve tahminleri

TABLO : 356 — Muhtelif Enerji Kaynaklarının Tüketim Tahminleri

| | (Taşkömürü eş değerli olarak) (Bin ton) | | | | | | | |
|------|---|--------|-----------------|-----------------|-------|-------|-----------|--------|
| | Taş K. | Linyit | Petrol ürünleri | Hidrolik enerji | Oğun | Tezek | Diğerleri | Toplam |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 1962 | 3 983 | 1 996 | 3 571 | 562 | 6 521 | 5 365 | — | 21 998 |
| 1967 | 5 000 | 3 500 | 9 000 | 1 000 | 6 700 | 5 400 | — | 30 600 |
| 1972 | 6 000 | 5 600 | 15 700 | 2 750 | 5 000 | 4 000 | 3 500 | 42 550 |

Kaynak : 2.BYKP

Planda, elektrik sektöründe organizasyon bozukluğu ve koordinasyon noksanlığının önemli bir problem olarak devam ettiği, **Türk Elektrik Kurumu'nun** kurulmasının kanun aşamasında olduğu, kurulduktan kısa bir süre sonra bu sorunun çözümlenmesinde olumlu etkileri alacağı beklendiği belirtilmiştir.

3.1.3 Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı (1973-1977) -1080 Sayfa

Plan, Uzun Dönemli Kalkınma ve Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planının Temel Hedefleri ve Stratejisi olarak belirtilmiştir. Bu plan döneminde, hedefler daha ayrıntılı olarak ortaya konulmuş ve plan daha kapsamlı olarak hazırlanmıştır. Enerji ihtiyacının karşılanması için yerli enerji kaynaklarına ağırlık verileceği, nükleer enerji kaynaklarından faydalanma imkânları araştırılacağı planda yer almaktadır [7]. Yatırım programına alınarak, **prototip, eğitim amaçlı nükleer santralin yapım faaliyetlerine** başlanacağı hedefler arasına konulmuştur. Ayrıca uzun dönemde enerji kaynaklarını geliştirme programı çerçevesinde uranyum ve toryum'un kullanma olanakları ortaya konulmaya çalışılacağı vurgulanmıştır.

Plan Öncesi Gerçekleşme:

Türkiye, geçen 10 yıllık dönem içinde esas hedefi sağlayarak yüzde 7 ortalama kalkınma hızını gerçekleştirmiştir. Gerçekleştiremediğimiz ve önemli ölçüde geri kaldığımız hedef, sanayide yılda yüzde 12 artış sağlamaktır. Elektrik üretimi 10 milyar kw/saatten 125 milyar kw/saate çıkarılacaktır.

Elektrik enerjisi iletim tesisleri, plan hedeflerine uygun olarak gerçekleştiği halde, üretim tesislerinin gecikmesi, sanayileşmenin ihtiyacı olan enerji talebinin karşılanmasında gerçek bir darboğaz olmuştur. Türkiye'de fert başına birincil enerji tüketimi, petrol eş değeri olarak 1962 yılında 453 Kg. dan 1972 yılında 620 Kg. a ulaşmıştır (Kilo Eşdeğer Petrol –KEP). Fert başına elektrik enerjisi tüketimi ise 1962 de 118 Kwh dan 1972 de 294 kWh a yükselmiştir.

1972 yılı sonunda elektrikli köy sayısı 4300'e ulaşacaktır. Elektrik enerjisi üretimi ise plan döneminde yılda ortalama yüzde 12.0 artarak 1972 de 11 000 GWh'a ulaşmış, yıllık üretim düzeyleri Plan hedeflerinin ortalama yüzde 5 gerisinde kalmıştır . Elektrik enerjisi üretiminin artış hızı 1955-1960 yılları arasında yüzde 12 olmuş, 1960-1961 yıllarında ise yüzde 7 ye kadar düşmüştür. **Planlı dönemde elektrik üretimi, yüzde 95 dolayında gerçekleşmiş** yıllık ortalama artış hızı ise yüzde 12,0 olmuştur (Tablo 6).

Tablo 6. Plan dönemi öncesi gerçekleştirmeler

| | PUANT GÜÇ | | | ENERJİ | | | Elektrik enerjisi Plan hedefi Gwh |
|----------|-----------|-----------------------|-------|--------|-----------------------|-------|---|
| | MW | Ortalama yıllık artış | | Gwh | Ortalama yıllık artış | | |
| | | Miktar Mw | Yüzde | | Miktar Gwh | Yüzde | |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | |
| 1962 | 725 | — | — | 3 560 | — | — | — |
| 1967 | 1 241 | 103 | 11,4 | 6 217 | 531 | 11,8 | 6 540 |
| 1972 (T) | 1 982 | 148 | 9,8 | 11 000 | 957 | 12,1 | 11 850 |

Kaynak : Türkiye Elektrik Kurumu

Kaynak : 3.BYKP

Elektrik enerjisinin üretim kaynaklarına göre dağılımı yıldan yıla büyük değişimler göstermiş, ancak toplam üretim içindeki hidrolik enerji payı planlı dönemin başında ve sonunda aynı kalmış, bu alandaki plan hedefleri gerçekleştirilememiştir. (Tablo 7).

Tablo 7. Plan dönemi öncesi gerçekleştirmeler

| Yıllar | Taşkömürlü | | Linyit | | Akaryakıt | | Diğer yakıtlar | | Hidrolik | | Toplam | |
|---------|------------|-------|--------|-------|-----------|-------|----------------|-------|----------|-------|--------|-------|
| | Enerji | Yüzde | Enerji | Yüzde | Enerji | Yüzde | Enerji | Yüzde | Enerji | Yüzde | Enerji | Yüzde |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) |
| 1962 | 1 520 | 42,7 | 600 | 16,8 | 271 | 7,6 | 45 | 1,3 | 1 124 | 31,6 | 3 560 | 100,0 |
| 1967 | 1 102 | 17,6 | 1 021 | 16,6 | 1 539 | 25,1 | 173 | 2,7 | 2 382 | 38,0 | 6 217 | 100,0 |
| 1972(T) | 1 500 | 13,6 | 1 500 | 13,6 | 4 378 | 39,8 | 225 | 2,0 | 3 397 | 31,0 | 11 000 | 100,0 |

Kaynak : Devlet Planlama Teşkilatı ve Türkiye Elektrik Kurumu
(T) : Tahmin

Kaynak : 3.BYKP

Uzun Dönemde Plan Gelişme Hedefleri (1972 -1995):

Hızlı sanayileşmenin gereği olarak 1995 yılına kadar uzanan, perspektif dönemde, gerek genel enerji gerek elektrik enerjisi tüketiminin hızla artması beklenmektedir.

1. Öncelikle öz kaynaklardan yararlanılacaktır.
2. Hidrolik aleyhine bozulan termik/hidrolik denge düzeltilecektir
3. Enerjinin devamlılığı, güvenilirliği ve ucuzluğu sağlanacaktır.

Sanayileşmenin ve yükselen yaşama düzeyinin gerektirdiği elektrik enerjisi ihtiyacının zamanında, kararlı ve güvenilir bir şekilde sağlanması için 1312 sayılı Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) Kanunu çerçevesinde gerekli çalışmalar hızlandırılacaktır.

Türkiye Elektrik Kurumu'nun nükleer teknolojiye girişi sağlanacak, ve nükleer enerji uzun dönem elektrik enerjisi üretiminde yurt içi kömür, petrol ve hidrolik kaynakların ihtilaçları ekonomik şekilde karşılayamadığı dönemde işletmeye alınacak tarzda planlanacaktır. Üçüncü Plan döneminde tesisine başlanacak olan eğitim amaçlı protip nükleer santral, uzun dönemde nükleer teknolojiye girişi sağlamak için nükleer enerji santrallerinin planlama, projelendirme ve tesisinde yararlar sağlayacak ayrıca elektrik enerjisi üretecektir.

Planlandıkları zamanlarda işletmeye açılacak elektrik enerjisi üretim tesislerinin kapasitesi, Üçüncü Plan döneminde 2293 MW güç ve 11.932 GWh ortalama enerji ilâvesiyle, alınabilir güç 4756 M'a, ortalama enerji 22.466 GWh'a firm enerji (güvenilir enerji) 20,742 GWh'a çıkacaktır.

Tablo 8. Enerji sektörü uzun dönemi gelişme perspektifleri

| TABLO : 435 — Enerji Sektörü Uzun Dönem Gelişme Perspektifleri | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| ANA MALLAR | 1972 | 1977 | 1982 | 1987 | 1992 | 1995 |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| I — GENEL ENERJİ | | | | | | |
| Toplam enerji tüketimi (Petrol eşdeğeri) (Bin ton) | 23 250 | 36 555 | 53 600 | 78 000 | 105 000 | 125 000 |
| Fert başına enerji tüketimi (Petrol eşdeğeri) (Kg. / Kişi) | 620 | 858 | 1 100 | 1 405 | 1 688 | 1 896 |
| II — ELEKTRİK ENERJİSİ | | | | | | |
| Puvant güç (Mw) | 1 982 | 3 650 | 6 384 | 10 720 | 17 000 | 22 400 |
| Enerji (Gwh) | 11 000 | 20 330 | 35 430 | 59 500 | 95 000 | 125 000 |
| Enerji / Kişi (Kwh) | 294 | 447 | 728 | 1 090 | 1 527 | 1 896 |
| Ortalama yıllık enerji artışı (Yüzde) | | 13,1 | 11,8 | 10,9 | 9,7 | 9,6 |

Kaynak : 3.BYKP

Elektrik enerjisi alt sektöründe İkinci Plan döneminde yapımına başlanan,

- Hopa 2, Seyitömer 2, Gökçekaya 1, 2, 3, Çıldır ve Kadıncık 2 ünitelerinin 1973 yılında;
- Keban 1, 2, 3, 4, ünitelerinin 1974 yılında;
- Seyitömer 3, Keban 5, 6, ünitelerinin 1976 yılında;
- Tunçbilek 2, Elbistan - Afşin 1, ve Hasan Uğurlu 1, 2, ünitelerinin 1977 yılında servise girmesi gerekmektedir.

Dördüncü ve Beşinci Plan dönemlerinin ihtiyaçları için;

- Elbistan - Afşin 2, 3, 4, Soma 2,
- Aslantaş, Oymapınar, Karakaya, Altınkaya ve Karababa ünite ve santralleri gibi büyük projeler yanında, beş adet küçük hidroelektrik santralın yapımına Üçüncü Plan döneminde başlanacaktır.
- Dicle Nehri hidrolik potansiyelinden istifade imkânları araştırılacaktır

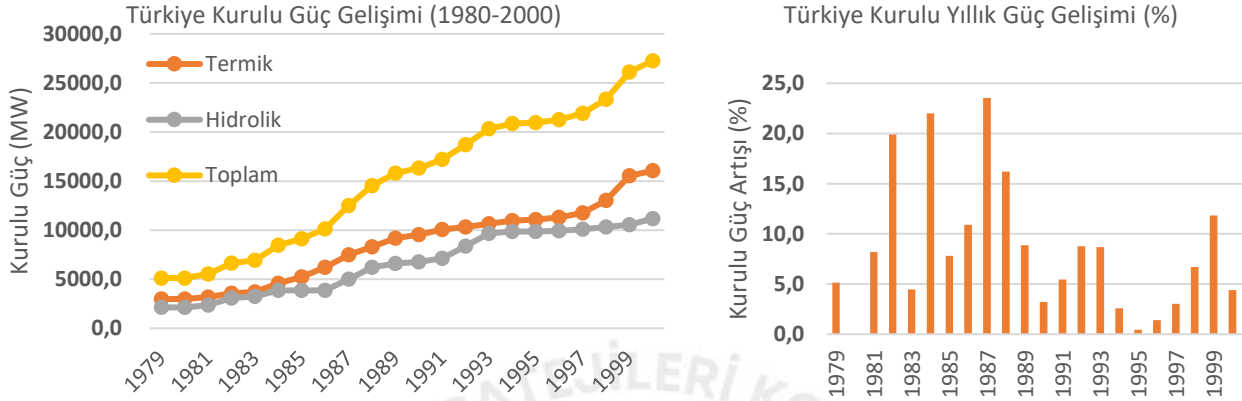
Planda, birincil enerji kaynaklarından linyit üretimi enerji talebine bağlı olarak büyük bir artış göstermektedir. Halen tespit edilmiş geniş kömür kaynaklarına göre, on yıl sonra 40-50 milyon ton düzeyine çıkarmanın mümkün olduğu belirtilmiştir. Bugün ile kıyaslama açısından, 2022 yılında Türkiye’de toplam tüvenan kömür üretimi; 102,09 milyon ton linyit, 1,49 milyon ton asfaltit, 1,79 milyon ton taş kömürü olmak üzere toplam 105,37 milyon ton olarak gerçekleşmiştir.

Türkiye’de fert başına ortalama elektrik enerjisi tüketimi, 1961, 1962 ve 1969 yıllarında sırasıyla 41, 118 ve 219 kWh/kişi olarak gerçekleşmiş olup, Elektrik enerjisi üretiminin gelecek onbeş yılda ortalama yüzde 12 dolayında artması ve 1987’de fert başına elektrik üretiminin 1090 kWh dolayında olması hedef alınmış, 1995 yılında elektrik enerjisi üretimi de aynı değerde 1890 kWh/kişi’ye ulaşmış olacağı öngörülmüştür.

3.2 KALKINMA PLANLARI 1980 – 2000 DÖNEMİ

Türkiye kalkınma planlarının 1980-2000 yılları arasındaki elektrik kurulu kapasite gelişimine bakıldığında, birinci plan döneminde yıllar bazında artış göstererek 1982, 1984 ve 1984 yıllarında yüzde 20 ve üzeri artış göstermiştir, 1995 yılında ise yirmi yıl içerisindeki en düşük değer olarak 500 MW lık bir artış meydana gelmiştir. Her üç dönemi kapsayan 1980-2000 arası dönemde kurulu kapasitesi de 4,3 kat artış göstermiştir (Grafik 3).

Grafik 3: Türkiye’de 1980-2000 yılları arasındaki kurulu güç gelişimi ve artış hızı



3.2.1 Dördüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı (1979-1983) – 711 Sayfa

Bu dönemin başında, enerji politikasının temel gündemi, elektrik arzında oluşan açığın giderilmesi için kaynak arayışına yönelmesi olmuştur. Enerji yatırımlarında, yerli enerji kaynaklarına dayalı üretim birimlerinin kurulmasına öncelik verileceği hedefi ile plan döneminde, elektrik enerjisi üretiminde su ve kömür kaynakları en yüksek düzeyde değerlendirileceği planlanmıştır. Bu doğrultuda elektrik arzındaki açık sorununun giderilmesinde başvurulan ilk kaynak yerli linyit kömürü olmuştur. 1980’li yıllarda linyit rezervlerine verilen önem artmış ve bu rezervlerin devlet tarafından işletilmesi gündeme gelmiştir. Taşkömürü çalışmalarını yürütmek üzere sadece bu konu ile görevlendirilen Türkiye Taş Kömürü Kurumu (TTK) kurulmuştur. Planda, nükleer enerji santralleri yapımı ve nükleer enerji girdisinin kendi doğal kaynaklarımızdan sağlanmasını amaçlayan çalışmalar hızlandırılacağı vurgulanmıştır [8].

Plan Öncesi Gerçekleşmeler :III. Plan dönemi süresince öngörülen fiziki hedeflere ulaşılamamış, Birincil enerji kaynaklarından su ve kömür kaynaklarında planlanan yatırımlarda önemli gecikmeler olmuştur. Başta elektrik olmak üzere enerji sektörü önemli bir darboğaz olarak ortaya çıkmıştır.

Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi III. Plan döneminde yılda ortalama yüzde 12,7 oranında büyüyerek 1977 yılında 20,5 bin GWh’a ulaşmıştır. Üçüncü Plan dönemi içinde Bulgaristan’la enerji bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bulgaristan’dan alınan enerji ile birlikte, ülkede 1977 yılı toplam brüt elektrik enerji arzı Plan hedefini aşarak 21 056 GWh olmuştur. Böylece Üçüncü Plan döneminde yılda ortalama yüzde 13,3 oranında elektrik enerjisi talep artışı sağlanmış olmaktadır.

III. Plan döneminin ilk iki yılında elektrik enerjisi üretimindeki artış hızı yavaş olmuş, ancak Keban Hidrolik Santralının işletmeye girmesinden sonra, 1975 yılından başlayarak son üç yılda üretim artışları ortalama yüzde 15,0 düzeyine yükselmiştir.

Akaryakıtın toplam elektrik üretimindeki payı, hidrolik ve linyitin paylarındaki artışlara bağlı olarak 1977 yılında yüzde 33,4 düzeyine inmiştir. 1977 yılı sonunda Türkiye elektrik üretim tesislerinin kurulu gücü 4 556 MW’a ulaşmış, bunun 4 466 MW’ını enterkonnekte sisteme bağlı santraller oluşturmuştur. Kurulu gücün 3 587 MW’lık bölümü (yaklaşık yüzde 80’i) Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) tarafından, 325,8 MW’ı da imtiyazlı şirketlerce işletilmiştir.

Tablo 9. Programa alınan ve inşaatına başlanan elektrik üretim santralleri

TABLO : 206 — Elektrik Enerjisi Üretimi ve Puant Gücü Gerçekleşme Değerleri

| Yıl | MW | PUANT GÜÇ | | | ENERJİ | | | Plan Hedefleri (Gwh) | Kişi Başına Elektrik Tüketimi (Kwh) |
|------|-------|-------------|-------|------------|--------------|-------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| | | Miktar (MW) | Yüzde | Mil. (Gwh) | Miktar (Gwh) | Yüzde | Ortalama Yıllık Artış | | |
| 1962 | 725 | — | — | 3 560 | — | — | — | 118 | |
| 1967 | 1 241 | 103 | 11,4 | 6 217 | 531 | 11,8 | 6 540 | 195 | |
| 1972 | 1 951 | 710 | | 11 242 | 1 005 | 12,6 | 11 850 | 310 | |
| 1977 | 3 376 | 1 425 | 11,6 | 21 056 (1) | 1 963 | 13,3 | 20 330 | 510 | |

Kaynak : 4.BYKP

Keban hidroelektrik santralının işletmeye girmesiyle Türkiye ulusal enterkonnekte sisteminin ana gerilimi 380 KV. olmuş ve 380 KV'luk iletim hatlarının uzunluğu 2529 km. yi bulmuştur. Ulusal sistem Van, Hakkâri dışındaki bütün il merkezlerine ulaşmıştır. Türkiye'de elektrik enerjisi üretimi III. Plan döneminde yılda ortalama yüzde 12,7 oranında büyüyerek 1977 yılında 20,5 bin GWh'a ulaşmıştır. Kişi başına elektrik enerjisi tüketimi 1972'de 303 KWh'dan 1977 yılında 510 KWh'a çıkmıştır. Kişi başına birincil enerji tüketimi petrol eşdeğeri olarak 1972 yılında 611 kg'dan 1977'de 798 kg'a yükselmiştir (Tablo 9),

Planda, elektrik üretiminin zamanında, yeterli ve istenilen nitelikte sağlanamamasının bir önemli nedeni de **planlanan üretim tesislerinin zamanında devreye sokulmaması** olarak gösterilmiştir. (Tablo 10).

Plan Hedefleri :

Enerji üretiminde öncelikle öz kaynaklardan yararlanılacaktır. **Termik/hidrolik dengesinin, hidrolik üretim kaynakları yönünde gelişmesine özen gösterilecektir. Elektrik enerjisi üretiminin petrole dayalı olan oran hızla düşürülecektir; su ve kömür kaynaklarımızı bu amaçla en yüksek düzeyde değerlendirici yatırımlara öncelik verilecektir. Yerel küçük su kaynakları da bu yönde değerlendirilecektir.**

Tablo 10. Programa alınan ve inşaatına başlanan elektrik üretim santralleri

TABLO : 208 — İnşaatı Devam Eden Başlıca Elektrik Üretim Tesislerinin Programa Giriş ve Gerçekleşme Durumları

| Santraller | Programa alınışta | | | Son durum | | Üretim | |
|--------------------------|-------------------|----------------|--------------|---------------|--------------|----------|---------|
| | Kurulu güç MW | Başlama tarihi | Bitiş tarihi | Kurulu güç MW | Bitiş tarihi | Ort. Gwh | Güv Gwh |
| 1. — Hidrolik santraller | | | | | | | |
| Oymapınar | 240 | 1967 | 1972 | 540 | 1982 | 1.620 | 412 |
| Aslantaş | 85 | 1969 | 1974 | 138 | 1981 | 769 | 360 |
| Hasan Uğurlu | 400 | 1968 | 1973 | 250 | 1979 | 900 | 820 |
| Köklüce | 30 | 1973 | 1979 | 90 | 1980 | 584 | 576 |
| Karakaya | 1.500 | 1971 | 1977 | 1.800 | 1983-85 | 7.354 | 6.029 |
| Toplam | 2.255 | | | 2.818 | | 11.027 | 8.197 |
| 2. — Termik santraller | | | | | | | |
| Çayırhan | 150 | 1974 | 1977 | 300 | 1981 | 1.800 | 1.800 |
| Afşin - Elbistan (A) | 600 | 1972 | 1977 | 1.360 | 1980-82 | 7.800 | 7.800 |
| Kangal | 150 | 1974 | 1978 | 300 | 1982 | 1.800 | 1.800 |
| Y. Çatalağzı | 150 | 1974 | 1978 | 150 | 1982 | 900 | 900 |
| Yatağan | 300 | 1975 | 1978 | 420 | 1980 | 2.520 | 2.520 |
| Soma (B) | 150 | 1972 | 1976 | 330 | 1980 | 1.980 | 1.980 |
| Toplam | 1.500 | | | 2.860 | | 16.800 | 16.800 |
| TOPLAM | 3.755 | | | 5.678 | | 27.827 | 24.997 |

Kaynak : 4.BYKP

IV. Plan döneminde yılda ortalama yüzde 17,0 oranında artması öngörülen birincil enerji kaynaklarında en hızlı üretim gerçekleşmesi linyitte görülecektir. Linyit üretim değeri 1978'de 15 milyon Ton, 1983'te 31,8 milyar liraya (51,6 Milyon Ton) çıkarılacaktır. Bu gelişme sonunda **linyit üretimi 1983 yılında toplam enerji üretimi içinde yüzde 39,4 ile en önemli payı oluşturacaktır.**

IV. Plan dönemi sonunda, dönem içinde işletmeye açılacak elektrik enerjisi üretim tesislerinin kapasitesi 5007 MW kurulu güç ve 23 068 Gwh ortalama enerji eklenmesiyle, toplam kurulu güç 9 657 MW'a, ortalama, enerji 46 500 GWh ve firm enerji 49 466 GWh'a çıkacaktır. Yurt içi tesislerin üretimi 1978'de 22150 GWh dolayında iken, yüzde 13,9 artışla **1983 yılında 42400 GWh'ya yükselecektir.** IV. Plan döneminde Bulgaristan bağlantısından ve tesis aşamasındaki Sovyetler Birliği bağlantısından yapılacak elektrik enerjisi dışalımını yılda yaklaşık 2 200 GWh. olacaktır.

IV. Plan dönemi sonunda, 1978 yılında 22750 GWh elektrik enerjisi üretiminin 1983 yılı sonunda ortalama yıllık yüzde 14,4 lık artışla 44 600 GWh değerine ulaşması hedefi konulmuştur. Bu dönemde puant gücün de 3800 MW mertebesinden 7600 MW mertebesine ulaşacağı öngörülmüştür.

Planda nükleer, küçük hidroelektrik santraller ve güneş enerjisinde yararlanılması ile ilgili aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir: *Nükleer enerji santralleri yapımı ve nükleer enerji girdisinin kendi doğal kaynaklarımızdan sağlanmasını amaçlayan çalışmalar hızlandırılacaktır. Plan döneminde etütleri bitirilen yeni hidrolik santrallerin yapımına başlanacak ve saptanacak «Ana planı» çerçevesinde ikinci nükleer santralın etütleri ile yer seçimi sonuçlandırılacaktır.*

*Köy elektrifikasyonunda lokal enerji kaynaklarından özellikle küçük hidro elektrik santrallerinden yararlanma biçimine önem verilecek ve bu santrallerin komple yerli imalatına teşvik ve öncelik tanınacaktır. Öte yandan, gelecek plan dönemlerinin gereksinimlerini karşılamak üzere **Dördüncü** Uygun yörelerde güneş enerjisinden yararlanma olanakları üzerinde durulacaktır.*

3.2.2 Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1985-1989) – 224 Sayfa

Planda, enerji darboğazının hafifletilmesi amacıyla birincil enerji kaynaklarının artan enerji talebini karşılayacak şekilde geliştirilmesi, ekonomik olarak işletilebilirliği belirlenen kaynakların süratle devreye sokulmaları hedefe konulmuş, enerji tüketiminde ekonomik olmak kaydıyla yerli kaynak kullanımına ve ithal kaynaklı ucuz primer enerjiye öncelik verilmesi, elektrik enerjisi darboğazının aşılması için kısa dönemde düşük kalorili linyitlere dayalı termik santrallerle, uzun dönemde hidrolik kaynaklara ağırlık verilmesi kararlaştırılmıştır [9].

Plan döneminde, Enerji üretiminin artırılmasında güvenilir ve ucuz kaynaklara öncelik verileceği, **yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları** geliştirileceği, enerji darboğazının aşılmasında uzun dönemde hidrolik kaynaklar ve ithal primer enerji kaynakları ağırlık taşıyacağı, bu üretim artışına geçmiş plan dönemlerinde başlayan termik ve hidrolik santrallerin V. Plan döneminde tamamlanması ile erişilecek ve plan dönemi sonunda elektrik enerjisi bir darboğaz olmaktan çıkacağı öngörülmüştür.

*Bilinen kömür sahalarında üretimin optimal düzeye ulaştırılması için bunların teknik işletme projeleri tamamlanacak, yatırımlara öncelik verilecektir. **Ülkede enerji kaynakları rezervi içinde önemli bir paya sahip olan linyitlerin, enerji açığının kapatılmasında öncelikle değerlendirilmekte ve büyük bir bölümünün santrallarda kullanılması planlanmaktadır.***

Nükleer enerji tesislerine gerekli hammaddenin yurt içi kaynaklardan sağlanabilmesi için arama çalışmaları artırılacak, mevcut rezervlerin kesin potansiyelleri nitelikleriyle birlikte tespit edilecektir.

Enerji üretiminin artırılmasında güvenilir ve ucuz kaynaklara öncelik verilirken ,yeni ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, jeotermal, biyogaz başta olmak üzere) kısa sürede yararlanmak üzere gerekli girişimler desteklenecektir; her türlü yerli gelişmiş mamulün satın alınabilmesinde destek sağlanacaktır. Jeotermal enerji kaynaklarının geliştirilmesine öncelik verilecektir. Sanayiye enerji tasarrufuna dönük yatırımlar teşvik edilecektir.

V. Plan döneminin enerji sektörünün iki büyük projesi Atatürk Barajı ve Nükleer santral olduğu vurgulanmıştır.

Plan Öncesi Gerçekleşme ve Plan Dönemi Hedefleri:

IV. Plan döneminde ortalama yüzde 7,3 oranında artan elektrik enerjisi kurulu gücünün V. Plan döneminde yüzde 10,4 oranında artması, üretimdeki yüzde 4,7 artış hızının ise yüzde 11,2'lik bir seviyeye yükselmesi öngörülmektedir. Talepte Dördüncü Plan dönemindeki yüzde 5,2'lik artışa karşı, Beşinci Plan döneminde yüzde 9,7 oranında artış tahmin edilmiştir. Enerji tüketiminde ekonomik olmak kaydıyla yerli kaynak kullanımına ve ithal kaynaklı primer enerjiye öncelik verilecektir. Ticarî olmayan kaynakların payının ise dönem başındaki yüzde 22,2 değerinden dönem sonunda yüzde 15'e düşmesi beklenmektedir.

V. Plan döneminde birincil enerji üretiminin yılda ortalama yüzde 7,7 artması öngörülmektedir. Genel enerji üretimindeki bu gelişmede en önemli katkıyı yılda ortalama yüzde 17,8 ile linyit sağlayacaktır. Bunların dışında henüz düşük oranda değerlendirilmekte olan doğal gazın Plan dönemi sonunda üretiminin 710 milyon m³'e ulaşacağı tahmin edilmektedir. Elektrik enerjisi darboğazının aşılması için kısa dönemde düşük kalorili linyitlere dayalı termik santrallerle uzun dönemde hidrolik kaynaklara ağırlık verilmesi sağlanacaktır. Taşkömürü ve linyit tüketimindeki payının ise yüzde 24'den dönem sonunda yüzde 29'a yükseleceği tahmin edilmektedir (Tablo 11).

Tablo 11. Program dönem öncesi gerçekleşme ve plan dönemi hedefleri

| | TABLO : 67 — BİRİNCİL ENERJİ TÜKETİMİNDE IV. PLAN GERÇEKLEŞME VE V. PLAN HEDEFLERİ | | | | | |
|--|--|--------------|-------------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| | IV. Plan Gerçekleşme | | Yıllık ortalama % artış | V. Plan Hedefi | | |
| | 1978 | 1983 | | 1984 | 1989 | Yıllık ortalama % artış |
| Taşkömürü (Bin ton) | 4634 | 5258 | 2,6 | 5400 | 8300 | 9,0 |
| Linyit (Bin ton) | 13522 | 20730 | 8,9 | 22870 | 51885 | 17,8 |
| Petrol Ürünleri (Bin ton) | 16070 | 15788 | — 0,3 | 16160 | 22600 | 6,9 |
| Doğal Gaz (Milyon m ³) | 22 | 8 | —18,3 | 8 | 710 | 245,3 |
| Hidrolik Enerji (Gwh) | 9365 | 11354 | 3,9 | 12185 | 22400 | 12,9 |
| Jeotermal Enerji (Gwh) | — | — | — | 57 | 90 | 9,6 |
| Elektrik Enerjisi İthal (Gwh) | 621 | 2223 | 28,9 | 2190 | — | — |
| Oğun (Bin Ton) (1) | 15248 | 17086 | 2,3 | 17256 | 17815 | 0,6 |
| Hayvan ve Bitki Atıkları (Bin ton) (1) | 12620 | 15541 | 4,3 | 14766 | 13730 | 1,4 |
| Güneş Enerjisi (Bin TEP) | — | — | — | 1 | 2 | —14,9 |
| TOPLAM (Bin TEP) | 33992 | 37721 | 2,1 | 38563 | 54571 | 7,2 |

Kaynak : 5.BYKaynak

V. Plan dönemi sonunda, inşaatları devam eden santralların zamanında devreye girmesi halinde elektrik enerjisi kurulu gücü 13.000 MW'a, ortalama üretim kapasitesi 60.000 GWh'a ulaşabilecektir. Beşinci Plan döneminde ülkemizin en büyük hidroelektrik tesisi olan Atatürk Barajı yapımı sürdürülecek, Karakaya ve Altınkaya Hidroelektrik ve Afşin-Elbistan Termik Santrali bütün üniteleriyle işletmeye alınacaktır. Elektrik enerjisi yatırımlarının temel girdilerinden biri olan büyük güçlü türbin ve jeneratör yatırımına başlanacaktır.

Tablo 12. Elektrik enerjisi kuruluş ve üretimde dönem öncesi gerçekleşme plan dönemi hedefleri

TABLO : 74 — ELEKTRİK ENERJİSİ KURULU GÜÇ, ÜRETİM VE TALEBİNDE
IV. PLAN GERÇEKLEŞME VE V. PLAN HEDEFLERİ

| | IV. Plan Gerçekleşme | | Yıllık Ortalama % Artış | V. Plan Hedefi | | Yıllık Ortalama % Artış |
|-------------------------|----------------------------|---------|-------------------------|----------------|---------|-------------------------|
| | 1978 | 1983 | | 1984 | 1989 | |
| | TOPLAM KURULU GÜÇ (MW) (1) | 4868,7 | 6935,1 | 7,3 | 7928,7 | 13000,0 |
| Termik | 2987,9 | 3695,8 | 4,3 | 4040,8 | 6110,0 | 8,6 |
| Hidrolik | 1880,8 | 3239,3 | 11,5 | 3887,9 | 6890,0 | 12,1 |
| TALEP (Gwh) | 23670,0 | 30470,6 | 5,2 | 31990,0 | 50700,0 | 9,7 |
| ÜRETİM (Gwh) | 21726,1 | 27320,5 | 4,7 | 29800,0 | 50700,0 | 11,2 |
| Termik | 12361,3 | 15988,4 | 5,3 | 17615,0 | 28300,0 | 10,0 |
| Hidrolik | 9364,8 | 11332,1 | 3,9 | 12185,0 | 22400,0 | 12,9 |
| İTHALAT (Gwh) | 621,0 | 2223,1 | 29,1 | 2190,0 | — | — |
| ARZ (Gwh) | 22347,1 | 29543,6 | 5,7 | 31990,0 | 50700,0 | 9,7 |
| Kısıntı - Kesinti (Gwh) | 1322,9 | 927,0 | -6,9 | — | — | — |

(1) 1978 ve 1983 yılları için fihri, 1984 ve 1989 yılları için yürürlükte olan projelerin zamanında tamamlanması durumunda ulaşılacak kurulu güç rakamları alınmıştır.

Kaynak : 5.BYKP

IV. Plan döneminde ortalama yüzde 7,3 oranında artan elektrik enerjisi kurulu gücünün V. Plan döneminde yüzde 10,4 oranında artması, üretimdeki yüzde 4,7 artış hızının ise yüzde 11,2'lik bir seviyeye yükselmesi öngörülmektedir (Tablo 12).

V. Plan dönemi sonunda, inşaatları devam eden santralların zamanında devreye girmesi halinde **elektrik enerjisi kurulu gücü 13.000 MW'a**, ortalama üretim kapasitesi 60.000 GWh'a ulaşabilecektir. 1984'de 29.800 GWh dolayında gerçekleşecek elektrik üretiminin 1989 yılında 50.700 GWh'a çıkarılması hedef alınmıştır. Bu sebeple, Plan döneminde, elektrik, gaz - su toplam üretimi yıllık yüzde 11,2 oranında artacaktır.

VI. Beşinci Plan döneminde ülkemizin en büyük hidroelektrik tesisi olan Atatürk Barajı yapımı sürdürülecek, Karakaya ve Altınkaya Hidroelektrik ve Afşin-Elbistan Termik Santrali bütün üniteleriyle işletmeye alınacaktır.

3.2.3 Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı (1990-1994)

Plan döneminde, başta hidrolik enerji olmak üzere, jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından daha büyük oranlarda yararlanılabilmesi için gerekli tedbirler alınacağı, jeotermal enerjiden daha fazla yararlanılması için gerekli yasal ve idari düzenlemeler yapılacağı, çeşitlendirilen enerji kaynakları arasında linyit kömürünün payı göz önünde tutularak linyit aramalarına devam edileceği vurgulanmıştır [10]. Elektrik sektöründe kamu ve özel kesim firmalarının bir arada faaliyet gösterebileceği yeni bir yapılaşmaya gidilmiş ve plan döneminde, 1993 yılında TEK, TEAŞ ve TEDAŞ olmak üzere ikiye bölünmüştür.

Plan döneminde Atatürk Hidroelektrik Santrali ile ithal kömüre dayalı bir termik işletmeye alınması hedeflenmiştir. Nükleer enerjinin uzun dönemde sektördeki önemi dikkate alınarak, nükleer enerji teknolojisine geçiş için Plan döneminde çalışmaların başlatılacağı belirtilmiştir.

Plan Öncesi Gerçekleşme ve Plan Dönemi Hedefleri:

Beşin plan döneminde, 1984 yılı sonunda 8.459 MW olan elektrik santralleri kurulu gücü, yıllık ortalama yüzde 1 4,3'lük bir artış hızıyla 1988 yılı sonunda 14.429 MW'a; 1984 yılında 30,6 milyar kWh civarında gerçekleşen elektrik üretim değeri ise yıllık yüzde 11,9'luk bir artış hızıyla 1988 yılında 48,0 milyar kWh'a ulaşmıştır.

Linyit üretiminde bu dönemde önemli artışlar olmuş, 1984'de 26,3 milyon ton olan yıllık üretim, yılda ortalama yüzde 9,7 oranında bir artış ile 1988'de 38,2 milyon tona çıkmıştır

1984 yılı sonunda elektriği olan köy sayısı 25.747, telefonu olan köy sayısı 12.166 iken, 1988 yılı sonunda elektriksiz ve telefonsuz köy kalmamıştır.

1988 yılında 906 kg petrol eşdeğeri olan kişi başına birincil enerji tüketim değerinin 1994 yılı sonunda 1.215 kg. petrol eşdeğeri olarak gerçekleşmesi hedef alınmaktadır. 1988 yılında 893 kWh olan kişi başına brüt elektrik kullanımının ise, Plan dönemi sonunda 1.407 kWh'e ulaşması öngörülmektedir.

1988 yılında 906 kg petrol eşdeğeri olan kişi başına birincil enerji tüketim değeri, 1994 yılı sonunda 1.215 kg petrol eşdeğeri olarak gerçekleşecektir.

Plan döneminde elektrik santralleri kurulu gücünün, yıllık ortalama yüzde 7,9 civarında bir artış göstermesi ve dönem sonunda 22.650 MW'a ulaşması beklenmektedir. Bu güç artışına paralel olarak santrallerin ortalama üretim kapasitesi de yüzde 8,1'lik bir artışla 1994 yılı sonunda 107,8 milyar kvvh'a yükselecektir.

1994 yılında 88,5 milyar kWh seviyesine ulaşması beklenen talep, yüzde 21,8 gibi yüksek bir üretim yedeği ile karşılanabilecektir. Üretimin yüzde 40'ı hidrolik, yüzde 60'ı termik santrallerden sağlanacaktır..

Planda uzun dönem elektrik talebi için tahminler yapılmış ve plan dönemi başlangıcından itibaren 20 yıllık dönemi kapsayan ve ortalama yüzde 5 ile 7,5 arasında değişen alternatif büyüme hedefleri esas alınarak yapılan elektrik talep çalışması, ülke elektrik talebinin 1995 yılında 80 ile 105 milyar kWh, 2000 yılında 110 ile 165 milyar kWh ve 2010 yılında 200 ile 400 milyar kWh arasında değişen değerlere yükseleceği öngörülmüştür.

3.2.4 Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1996-2000)

Planda, altıncı plan döneminde, elektrik talebinin öngörülen düzeyde gerçekleşmemesi ve elektrik üretiminde hidrolik santrallara öncelik verilmesi nedeniyle santral kaynaklı linyit talebinde beklenen artış gerçekleşmemiş ve linyit üretiminde kapasite kullanım oranları düşük düzeylerde kaldığı vurgulanmıştır.

Planda, son dönemlerde sektörde, büyüyen nüfusun ve gelişen ekonominin ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik olarak yapılması gereken yatırımlarda yetersiz kalınmıştır. 1990 yılı sonrası gerçekleştirilen yatırımlar, ihtiyaçlar iki katına çıkmasına rağmen, 1977-1987 arası dönemde gerçekleştirilen yatırımların yarısı düzeyine indiği belirtilmiştir [11]. Plan döneminde yeni ve büyük kapasiteli santral projelerine başlanacaktır. Enerji kaynaklarının üretimine dönük madencilik yatırımlarına ağırlık verilecek, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması ve nükleer teknolojinin kısa sürede ülkeye transferi ve adaptasyonu üzerinde önemle durulacağı belirtilmiştir.

Kayıpların azaltılması ve şebekelerin iyileştirilmesi hedefleri doğrultusunda dağıtım ve şebeke yatırımlarına önem verilmeye devam edilecektir.

Sektörde kamu ve özel kesim şirketlerinin bir arada faaliyet gösterebileceği bir yapı oluşturulamamıştır.

Plan Öncesi Gerçekleşme ve Plan Dönemi Hedefleri:

Birincil enerji ve elektrik tüketim değerlerinde son kırk yıldır önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu dönemde birincil enerji tüketimi yıllık ortalama yüzde 5,2, elektrik tüketimi yüzde 11 civarında artış göstermiştir.

VI'ncı Plan döneminde birincil enerji üretimi yılda yüzde 3,2 oranında artarak dönem sonunda 32,6 milyon ton petrol eşdeğerine yükselmiştir. Üretimde en önemli gelişmeler hidrolik enerji ve petrolde izlenmektedir. 1994 sonu itibarıyla toplam birincil enerji tüketimi 64,0 milyon ton petrol eşdeğerine ulaşmıştır. Yaklaşık yüzde 49 oranında ithal kaynağa dayalı sektör tüketiminde en büyük kalemi yüzde 40'luk payla petrol ürünleri oluşturmaktadır.

1980'li yıllarda linyit madenciliğine yönelik yatırımlara ağırlık verilerek üretim kapasitesi 1994 yılı itibarıyla 80 milyon ton/yıl'a ulaştırılmıştır.

1994 sonu itibarıyla elektrik santrallarının kurulu gücü 20.857 MW'a, üretim kapasitesi ise 101 milyar kVWh'e ulaşmıştır. 1994 yılı itibarıyla 78 milyar kWh'e yaklaşan talep yüksek bir yedekle ve kesintisiz olarak karşılanabilmiştir. Ancak hızlı artışını sürdüren elektrik talebinin önümüzdeki yıllarda da kesintisiz ve emniyetli bir şekilde karşılanabilmesi için yatırımlarda sürekliliğin sağlanması zorunlu görülmektedir.

Plan döneminde hedef alınan ekonomik büyüme ve nüfus gelişimi beklentileri çerçevesinde toplam enerji talebinin yıllık ortalama yüzde 5,3 oranında artış göstereceği ve 2000 yılında 85,8 milyon ton petrol eşdeğerine ulaşacağı tahmin edilmektedir.

Alternatif büyüme senaryolarına dayalı uzun dönemli elektrik talep çalışmaları, talebin 2000 yılında 120-130 milyar kWh ve 2010 yılında 240-270 milyar kWh arası değerlere ulaşacağını göstermektedir. Hızla artan talebe zamanında cevap verebilecek şekilde elektrik enerjisi yatırımlarına önem verilecektir.

Elektrik talebinin Plan döneminde yılda ortalama yüzde 8 dolayında bir artışla dönem sonunda 122 milyar kVWh'e ulaşması beklenmektedir. Bu talebi yüzde 13'lük bir yedekle karşılamak üzere, Plan döneminde 6.650 MW ilave yapılarak 2000 yılında santralların kurulu gücününün 27.930 MVV'a, üretim kapasitesinin ise 138 milyar kWh'e yükseleceği tahmin edilmektedir.

*Bu gelişmelerle 2000 yılında kişi başına toplam enerji tüketimi 1.285 kilogram petrol eşdeğerine, **kişi başına elektrik tüketimi ise 1.825 kWh'e ulaşacaktır** (Tablo 12).*

Tablo 13. Birincil Enerji ve Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketiminde Gelişmeler

| | Birim | 1989 | 1994 | 1995 | 2000 | Yıllık Ortalama Artış (%) | |
|--------------------------|-------|-------------|-------------|---------------|---------|---------------------------|----------|
| | | Gerçekleşme | Gerçekleşme | Gerç. Tahmini | Tahmin | VI Plan | VII Plan |
| BİRİNCİL ENERJİ | | | | | | | |
| ÜRETİM | BTEP | 27 827 | 32 553 | 33 955 | 40 885 | 3,2 | 3,8 |
| TÜKETİM | BTEP | 52 149 | 63 982 | 66 200 | 85 800 | 4,2 | 5,3 |
| Kişi Başına Tüketim | KEP | 948 | 1 057 | 1 074 | 1 284 | 2,2 | 3,6 |
| ELEKTRİK ENERJİSİ | | | | | | | |
| KURULU GÜÇ | | | | | | | |
| Termik | MW | 15 806 | 20 857 | 21 277 | 27 930 | 5,7 | 5,6 |
| Hidrolik | MW | 9 209 | 10 993 | 11 413 | 15 770 | 3,6 | 6,7 |
| Hidrolik | MW | 6 597 | 9 864 | 9 864 | 12 160 | 8,4 | 4,3 |
| ÜRETİM | | | | | | | |
| Termik | GWh | 52 043 | 78 256 | 84 100 | 122 000 | 8,5 | 7,7 |
| Termik | GWh | 34 103 | 47 681 | 51 400 | 83 000 | 6,9 | 10,1 |
| Hidrolik | GWh | 17 940 | 30 575 | 32 700 | 39 000 | 11,3 | 3,6 |
| İTHALAT (İHRACAT) | | | | | | | |
| | GWh | 559 | (539) | (500) | - | - | - |
| TÜKETİM | | | | | | | |
| Kişi Başına Tüketim | GWh | 52 602 | 77 717 | 83 500 | 122 000 | 8,1 | 7,9 |
| Kişi Başına Tüketim | kWh | 956 | 1 284 | 1 356 | 1 825 | 6,1 | 6,1 |

Kaynak : 7.BYKP

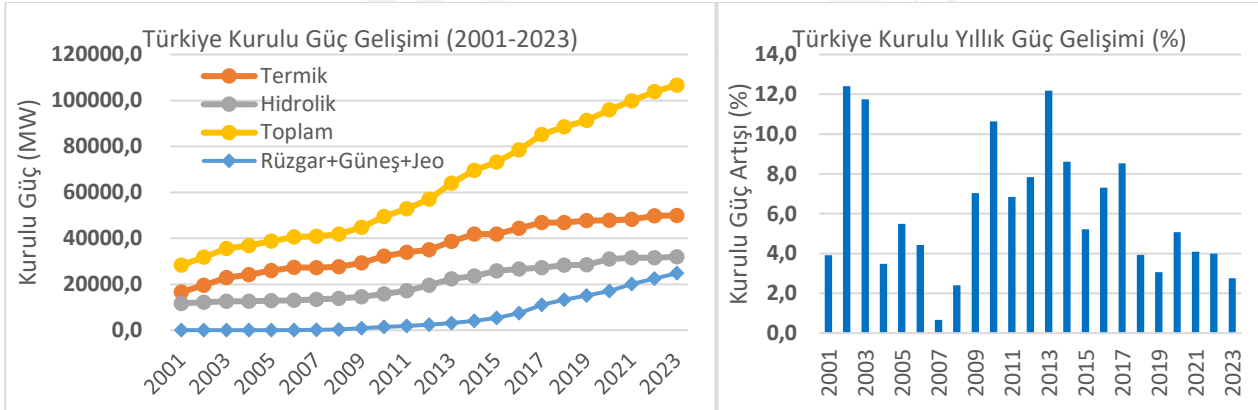
BTEP : Bin ton petrol eşdeğeri ; KEP : Kilogram petrol eşdeğeri ; GWh : Milyon kilovatsaat

Not : 2000 yılı tahminlerinde, Plan dönemi için GSYİH'de öngörülen yüzde 5-6,6 büyüme aralığı içinde yüzde 6'lık ortalama büyüme esas alınmıştır.

3.3. KALKINMA PLANLARI 2000 – 2018 DÖNEMİ

Türkiye kalkınma planlarının 2001-2023 yılları arasındaki elektrik kurulu kapasite gelişimine bakıldığında, yıllar bazında 2002, 2003 ve 2013 yıllarında yüzde 12 üzeri artış göstermiştir, Üç plan dönemini kapsayan 2001-2023 arası dönemde kurulu güç kapasitesi de yaklaşık 3 kat artış göstermiştir (Grafik 4).

Grafik 4: Türkiye’de 2000-2023 yılları arasındaki kurulu güç gelişimi ve artış hızı



3.3.1 Uzun Vadeli Strateji ve Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2001-2005)

Planlı kalkınma döneminde, birincil enerji ve elektrik tüketiminde önemli artışlar kaydedildiği, enerji kaynakları açısından zengin olmayan ülkemizde, bu alanda halen yüzde 62 düzeyinde bulunan dışa bağımlılığın, tüketim gelişirken zaman içinde artacağı vurgulanmış, 1980’li yılların ortasında, dünyadaki gelişmelere paralel olarak ülkemizde de enerji yatırımlarını artırmak amacıyla elektrik sektörünün özel kesime açılması gerekli görülmüş, Yap-İşlet ve Yap-İşlet-Devret gibi farklı modellerle gündeme getirilen yeni santral projeleri planlandığı gibi yürütülemediği, özel kesim şirketlerince yapılması beklenen projeler nedeniyle de kamu proje paketi geliştirilememiş, kamu yatırımlarında da yetersiz kaldığı belirtilmiştir [12]. Planda, elektrik üretimi için termik, hidrolik, nükleer, yenilenebilir gibi alternatif üretim kaynak ve teknolojileri bulunduğu, Türkiye’deki **nükleer enerji** hammaddelerinin aranmasına yönelik çalışmalara devam edileceği, Jeotermal enerjinin aranması, üretilmesi ve işletilmesi konusundaki çalışmaların sonuçlandırılacağı dile getirilmiştir.

VII. Plan döneminin son yıllarında içine girilen ve VIII. Plan döneminin ilk yıllarında sürmesi beklenen enerji yetersizliğinin temel nedeni ise geçmiş on yıllık yatırım uygulamasından kaynaklandığı yarıca vurgulanmıştır.

Doğanın korunması amacı dikkate alınarak, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi, yaygınlaştırılması ve tüketimde daha büyük oranlarda yer alması için tedbirler alınacaktır. Böylece yerli fosil kaynakların yanı sıra yenilenebilir enerji kaynakları da katılarak ülke enerji potansiyelinin en üst derecede kullanıma sokulması sağlanacaktır. Nükleer enerjinin uzun dönem gelişim planları üzerinde önemle durulacaktır.

Planda, yakıt ve elektrik talebinin kesintisiz, güvenli ve uygun maliyetlerle karşılanabilmesi için enerji yatırımlarının planlı ve istikrarlı bir şekilde sürdürülmesi gerekmektedir olduğu, bu çerçevede, elektrik ve doğal gaz sektörlerinde etkin ve işleyen bir piyasanın oluşturulması için gerekli yeni yasal düzenlemelere gidileceği belirtilmiş ve bu dönemde EPDK kurulmuştur.

Plan Öncesi Gerçekleşme ve Plan Dönemi Hedefleri:

VII. Plan döneminde birincil enerji tüketimi, yılda ortalama yüzde 4,5 oranında artışla dönem sonunda 78,8 milyon ton petrol eşdeğerine yükselirken, elektrik enerjisi tüketimi yılda ortalama yüzde 8,2 oranında artışla 126,8 milyar kWh'e ulaşacaktır. Böylece dönem öncesi gerçekleşme olarak, 2000 yılı sonu itibarıyla kişi başına birincil enerji tüketimi 1.206 kilogram petrol eşdeğerine (kep), kişi başına elektrik arzı ise 1.940 kWh'e yükselecektir. Bu değerler, kişi başına 1.500 kep ve 2.200 kWh düzeyinde olan dünya birincil enerji ve elektrik tüketimleri ortalamalarının halen altında bulunmaktadır.

Yatırımı süren ve 2000 yılı içinde işletmeye girecek santrallerle VII. Plan dönemi sonunda kurulu güç 27.391 MW'a, üretim kapasitesi 146,4 milyar kWh'e, füli üretim 124,2 milyar kWh'e ve 2 milyar kWh net ithalatla toplam elektrik tüketimi 126,8 milyar kWh'e ulaşacaktır. Sistemde kurulu güç yedeği açısından yeterli bir düzeye ulaşılmakla birlikte, hidrolik santrallerden ancak yüzde 70 düzeyinde enerji alınabilmesi bir sorun olarak gündemde bulunmaktadır. Elektrik alt sektöründe, VII. Plan döneminin ilk dört yılında santraller kurulu gücüne 5.165 MW, üretim kapasitesine 34,3 milyar kWh ilave yapılmıştır.

1999 yılı sonu itibarıyla kişi başına birincil enerji tüketimi 1.158 kilogram petrol eşdeğerine (kep), kişi başına elektrik arzı ise 1.840 kilovatsaate (kWh) yükselmiştir. Buna rağmen bu değerler, halen kişi başına 1.500 kep ve 2.200 kWh düzeyinde olan dünya birincil ve elektrik tüketim ortalamalarının altında bulunmaktadır.

VIII. Plan döneminde birincil enerji talebinin, amaçlanan ekonomik büyüme hızı paralelinde, yılda ortalama yüzde 6,1 oranında artış göstermesi beklenmektedir. Böylece, dönem sonunda toplam birincil enerji tüketimi 106 milyon tep'e, **kişi başına birincil enerji tüketimi ise 1.506 kep'e**

ulaşacaktır. Planda, yapılan çalışmalarda 1999 yılında 118,5 milyar kWh olan elektrik tüketiminin, 2005 yılında 195 milyar kWh ve 2010 yılında 285 milyar kWh'e ulaşacağını gösterdiği belirtilmiştir.

Tablo 14. Birincil Enerji ve Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketiminde Gelişmeler

| | Birim | 1995 | 1999 | 2000 | 2005 | Yıllık Ortalama Artış (%) | |
|--------------------------|-------|-------------|-------------|--------------|---------|---------------------------|-----------|
| | | Gerçekleşme | Gerçekleşme | Gerç.Tahmini | Tahmin | VII.Plan | VIII.Plan |
| BİRİNCİL ENERJİ | | | | | | | |
| ÜRETİM | BTEP | 26.320 | 28.133 | 28.134 | 29.825 | 1,3 | 1,2 |
| TÜKETİM | BTEP | 63.148 | 74.560 | 78.780 | 105.970 | 4,5 | 6,1 |
| Kişi Başına Tüketim | KEP | 1.045 | 1.158 | 1.206 | 1.506 | 2,9 | 4,5 |
| ELEKTRİK ENERJİSİ | | | | | | | |
| KURULU GÜÇ | MW | 20.952 | 26.117 | 27.391 | 42.783 | 5,5 | 9,3 |
| Termik | MW | 11.074 | 15.546 | 16.219 | 27.311 | 7,9 | 11,0 |
| Hidrolik ve Diğer | MW | 9.878 | 10.571 | 11.172 | 15.473 | 2,5 | 6,7 |
| ÜRETİM | GWh | 86.247 | 116.440 | 124.200 | 193.900 | 7,6 | 9,3 |
| Termik | GWh | 50.620 | 81.646 | 92.860 | 145.250 | 12,9 | 9,4 |
| Hidrolik ve Diğer | GWh | 35.627 | 34.794 | 31.340 | 48.650 | (2,5) | 9,2 |
| İTHALAT | GWh | - | 2330 | 3000 | 2200 | | |
| İHRACAT | GWh | 696 | 285 | 400 | 1000 | | |
| TÜKETİM | GWh | 85.645 | 118.485 | 126.800 | 195.100 | 8,2 | 9,0 |
| Kişi Başına Tüketim | kWh | 1.417 | 1.840 | 1.941 | 2.773 | 6,5 | 7,4 |

BTEP: Bin ton petrol eşdeğeri ; KEP: Kilogram petrol eşdeğeri ; GWh: Milyon kilovatsaat

Kaynak : 8.BYKP

VIII. Plan döneminde ülke elektrik talebinin, yılda ortalama yüzde 9 oranında artış göstermesi ve toplam elektrik tüketiminin dönem sonunda 195,1 milyar kWh'e, kişi başına elektrik tüketiminin ise 2.773 kWh'e ulaşması beklenmektedir. Dönem sonunda elektrik santralleri kurulu gücünün, 15.392 MW artışla 42.783 MW'a, santraller üretim kapasitesinin ise 234 milyar kWh'e ulaşması beklenmektedir. Böylece Plan dönemi sonunda sistem kurulu güç yedeği yüzde 37, üretim kapasite yedeği ise yüzde 20 civarında olacaktır.

3.3.2 Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı (2007-2013)

Dokuzuncu Kalkınma Planı, AB'ye üyelik sürecine katkı sağlayacak temel strateji dokümanı olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle Plan dönemi AB mali takvimi dikkate alınarak 2007-2013 yıllarını kapsayacak şekilde 7 yıllık olarak belirlenmiştir. AB'ye üyelik, ülkemizin sahip olduğu tarihsel birikim, ekonomik potansiyel, kültürel zenginlik, genç nüfus yapısı ve **enerji terminali konumu gibi nedenlerle**, hem Birliğin hem de Türkiye'nin gelişmesi yolunda önemli bir sinerji oluşturacağı vurgulanmıştır [13].

Plan öncesi dönemde, Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi içindeki payını yükseltmek amacıyla 5346 sayılı **Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun** bu dönemde yasalaştığı, ancak hazırlıkları tamamlanan **Enerji Verimliliği Kanunu** çıkarılmadığı belirtilmiştir.

Planda, arz güvenliğinin artırılması amacıyla birincil enerji kaynakları bazında dengeli bir kaynak çeşitlendirmesine ve orijin ülke farklılaştırmasına gidileceği, **üretim sistemi içinde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payının azami ölçüde yükseltilmesi hedeflenmiştir**.

Elektrik arzında sağlıklı bir çeşitlendirme yaratmak için elektrik üretim kaynakları arasına nükleer enerji dahil edilmesi, elektrikli makineler sanayiinde mevzuata uygun üretim ve Ar-Ge faaliyetlerinin artırılmasını teminen sektör kuruluşlarının katkısıyla **yüksek gerilim kısa devre güç laboratuvarı** kurulması planlanmıştır. Plan dönemi sonuna gelindiğinde özelleştirme işlemleri sonucunda kamunun, elektrik üretimi, doğalgaz piyasası, kömür ve diğer maden işletmeciliğindeki payının azalması hedeflenmektedir.

Plan Öncesi Dönemde Gelişmeler ve Plan Dönemi Hedefleri :

VIII. Plan döneminde, birincil enerji tüketimi yıllık ortalama yüzde 2,8 oranında bir artışla 2005 yılı sonu itibarıyla 92,5 milyon ton petrol eşdeğerine (mtep), elektrik enerjisi tüketimi ise yıllık ortalama yüzde 4,6 oranında bir artışla 160,8 milyar kWh'e ulaşmıştır. Ekonominin istikrar kazandığı ve 2001 krizinin etkilerinin hafiflediği 2003 sonrası dönemde ise bu artışlar daha belirgindir. Bu dönemde birincil enerji tüketimi yıllık ortalama yüzde 5,7, elektrik tüketimi ise yüzde 6,7 oranında büyümüştür.

VIII. Plan döneminde, 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ve 4646 sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu ile bu sektörler rekabete açılmış ve piyasanın düzenlenmesi amacıyla Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) teşkil edilmiştir.

Tablo 15. Enerji Hedefleri

| | 2006 | 2013 |
|--------------------------------|---------|---------|
| Birincil Enerji Talebi (BTEP) | 96.560 | 147.400 |
| Elektrik Enerjisi Talebi (GWh) | 171.450 | 295.500 |

Plan döneminde birincil enerji talebinde, ekonomik ve sosyal kalkınmayla orantılı olarak yıllık ortalama yüzde 6,2 oranında artış öngörülmektedir.

Dokuzuncu Kalkınma Planı döneminde elektrik talebinin, ağırlıklı olarak sanayi üretim ve hizmetler sektöründeki gelişmelere paralel olarak, yılda ortalama yüzde 8,1 oranında artış göstereceği tahmin edilmektedir (Tablo 15).

3.3.3 Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı (2014-2018)

Planda, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için küresel ölçekte başlayan yeni büyüme modeli arayışlarıyla birlikte “yeşil büyüme” kavramına değinilmiş, üretim ve hizmetlerde yenilenebilir enerji, ekoverimlilik, temiz üretim teknolojileri gibi çevre dostu uygulamaların destekleneceği, çevre dostu yeni ürünlerin geliştirilmesi ve markalaşmasının teşvik edileceği belirtilerek, çevreye duyarlı ekonomik büyümeyi sağlayan yeni iş alanları, Ar-Ge ve yenilikçilik desteklenecek denilmiştir [14].

Enerji ithalatının toplam ithalatımızın yaklaşık dörtte birini oluşturması nedeniyle, Enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmaya yönelik alternatif politikalar oluşturulması, bu kapsamda, arz tarafında linyit başta olmak üzere yerli kaynakların daha fazla değerlendirilmesi, nükleer enerjinin elektrik üretimi amacıyla kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının yükseltilmesi önem taşıdığı vurgulanmıştır.

Elektrik ve doğal gaz piyasalarının serbestleştirilmesine yönelik önemli adımlar atılmış, özel sektörün piyasa payları yükselmiştir. Enerji arz güvenliğinin artırılması amacıyla **yenilenebilir enerji üretiminin desteklenmesine devam edilmiş, yerli kömür kaynakları** elektrik üretimi amacıyla özel sektöre açılmış, nükleer santral yapımıyla ilgili çalışmalara başlanmış, enerji verimliliğini artırmaya yönelik düzenlemeler yapılarak çeşitli programlar uygulamaya konulmuştur.

Yenilenebilir enerjinin ekonomiye katkısını en üst seviyeye çıkarmak için ekipmanlarda yerli imalat düzeyi artırılacak ve özgün teknolojiler geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Linyit haricinde fosil yakıtlar bakımından zengin rezervlere sahip olmayan Türkiye'nin enerji arzındaki dış bağımlılığı önemli ölçüde devam ettiği, bu bağımlılığı azaltmak için, yerli kaynakların enerji üretiminde mümkün olan en yüksek oranda değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Birincil enerji kaynakları bazında dengeli bir kaynak çeşitlendirmesine ve orijin ülke farklılaştırmasına gidilecek, üretim sistemi içinde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı azami ölçüde yükseltilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik üretiminin sistem güvenliğini riske atmadan şebekeye entegrasyonu amacıyla gerekli yatırımlar gerçekleştirilecektir.

Elektrik ticaretinin sağlanması amacıyla Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri Birliği (ENTSO-E) sistemine deneme senkron paralel bağlantısı gerçekleştirilerek, ülkemiz ile Bulgaristan ve Yunanistan arasında elektrik alışverişi başlatılmıştır.

Plan Öncesi Dönemde Gelişmeler ve Plan Dönemi Hedefleri :

Plan öncesi dönemde; Birincil enerji tüketimi 2007-2011 döneminde yıllık ortalama yüzde 2,8, elektrik enerjisi tüketimi 2007-2012 döneminde yıllık ortalama yüzde 5,6 oranında artmıştır.

Plan dönemi öncesinde, 2007-2012 döneminde, 2006 yılında yüzde 20,7 olan enerji ithalatının toplam ithalat içerisindeki payı 2012 yılında yüzde 25,4'e yükselmiştir. Söz konusu dönemde dalgalı bir seyir izleyen ithalat fiyatları yıllık ortalama olarak yüzde 5,1 oranında artış göstermiştir. Dokuzuncu Kalkınma Planı döneminde Türkiye'nin enerji tüketimi büyümeye devam etmiş, ancak yaşanan küresel krizin olumsuz etkileri nedeniyle enerji tüketimindeki artış beklenenin altında gerçekleşmiştir. Birincil enerji tüketimi 2007-2011 döneminde yıllık ortalama yüzde 2,8, elektrik enerjisi tüketimi ise 2007-2012 döneminde yıllık ortalama yüzde 5,6 artmıştır.

Dokuzuncu Kalkınma Planı dönemi, enerji sektöründe serbestleştirme politikası çerçevesinde piyasalaşma sürecinin hızlandığı bir dönem olmuştur. Enerji yatırımlarına ilgisi artan özel sektörün elektrik enerjisi kurulu güç içerisindeki payı 2006 yılı sonundaki yüzde 41,5'den 2012 yılı sonu itibarıyla yüzde 56,6'ya, elektrik üretimindeki payı ise yüzde 51,9'dan yüzde 62'ye yükselmiştir.

Enerji arz güvenliğinin sağlanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine yönelik teşvik sistemi iyileştirilerek yerli ekipman imalatı desteklenmiş, yerli kömür sahaları elektrik üretimi amacıyla özel sektöre açılmıştır.

Akkuyu NGS'nin ilk ünitesinin Plan dönemi içinde inşası büyük oranda tamamlanacaktır. 4.800 MW gücünde Akkuyu Nükleer Güç Santralinin (NGS) yapımı için Rusya Federasyonu ile anlaşma imzalanmıştır. Ayrıca, Sinop'ta 4.480 MW gücünde ikinci bir NGS'nin kurulması için Japonya ile anlaşma imzalanmıştır. Sinop'ta ikinci bir NGS'nin ilk ünitesinin inşasına başlanacaktır. Plan döneminde 5.000 MW'lık üçüncü bir NGS'nin saha belirleme, ön fizibilite ve yatırım hazırlıklarına başlanacaktır.

Yerli kömür kaynakları özel sektör eliyle yüksek verimli ve çevre dostu teknolojiler kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülecektir. Aşın-Elbistan havzası linyit rezervleri elektrik üretimi için değerlendirilecektir. Küçük rezervli kömür yataklarının bölgesel enerji üretim tesislerinde değerlendirilmesi sağlanacaktır.

Tablo 16. Onuncu KP'nda Birincil Enerji ve Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketim Öngörülleri

| | 2006 | 2012 ¹ | 2013 | 2018 |
|--|---------|-------------------|---------|---------|
| Birincil Enerji Talebi (BTEP) | 99.642 | 119.302 | 123.600 | 154.000 |
| Elektrik Enerjisi Talebi (GWh) | 174.637 | 241.949 | 255.000 | 341.000 |
| Kişi Başı Birincil Enerji Tüketimi (TEP/kişi) | 1,44 | 1,59 | 1,62 | 1,92 |
| Kişi Başı Elektrik Enerjisi Tüketimi (kWh/kişi) | 2.517 | 3.231 | 3.351 | 4.241 |
| Doğal Gazın Elektrik Üretimindeki Payı (%) | 45,8 | 43,2 | 43,0 | 41,0 |
| Yenilenebilir Kaynakların Elektrik Üretimindeki Payı (%) | 25,3 | 27,0 | 27,7 | 29,0 |
| Elektrik Kurulu Gücü (MW) | 40.565 | 57.058 | 58.500 | 78.000 |
| Enerji Yoğunluğu (TEP/1000 Dolar) ² | 0,288 | 0,276 | 0,272 | 0,243 |

Kaynak: 2006 ve 2012 yılı verileri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TEİAŞ'a aittir. 2013 ve 2018 yılı verileri Onuncu Kalkınma Planı tahminleridir.

Not: TEP: Ton Eşdeğer Petrol, BTEP: Bin TEP, GWh: Milyon kilowatt-saat

(1) 2012 yılına ilişkin elektrikle ilgili veriler gerçekleşme değerleri olup, birincil enerji ve enerji yoğunluğuyla ilgili veriler gerçekleşme tahminleridir.

(2) İklim etkisinden arındırılmış 2000 yılı dolar fiyatlarıyla

Kaynak : 10.BYKP

Türkiye ekonomisinin yüksek ve istikrarlı büyüebilmesi için mümkün olan bütün yerli kaynakların enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi öncelikli husus olduğu ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınmanın temini açısından önem taşıdığı belirtilerek, planda “Yerli Kaynaklara Dayalı Enerji Üretim Programı” yürürlüğe konulmuş, Bu programla yerli kaynakların enerji üretimindeki payının artırılması suretiyle enerjide dışa bağımlılığın azaltılması amaçlanmıştır.

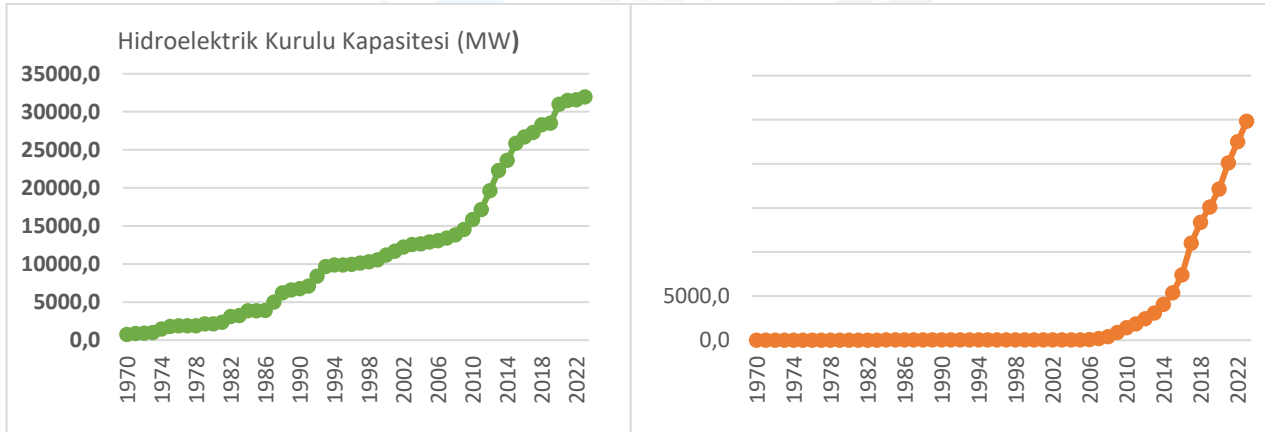
Program Hedefleri olarak,

- 2011 yılı sonunda birincil enerji üretiminin yüzde 28 olan yurtiçi ve yurtdışı petrol ve doğal gaz çıkarımları dâhil yerli kaynak payının, 2018 sonunda yüzde 35'e yükseltilmesi
- 2012 yılında yaklaşık 39 milyar kWh olarak gerçekleşen linyit kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin 2018 yılında 60 milyar kWh'e çıkarılması
- Plan döneminde 10.000 MW'lık ilave hidrolik kapasitenin devreye alınması, öngörülmüştür.

3.4 KALKINMA PLANLARI 2019 – 2028 DÖNEMİ

Son dönem kalkınma planları dönemi, deyim yerinde ise Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi açısından bir sıçrama yaşanmıştır. Kısa dönem içerisinde rüzgar ve güneş enerji santrallerinin kurulu kapasitei 10.000 MW mertebesinde üstüne çıkmıştır (Grafik 5)

Grafik 5: Türkiye'de 2000-2023 yılları arasındaki Hidro ve YEK kurulu güç gelişimi



3.4.1 On Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2019-2023) :

Onbirinci KP hedeflerine göre, enerjide dışa bağımlılığın ve cari açığın azaltılmasını teminen, yerli kaynakların daha fazla kullanılması amacıyla, başta linyit olmak üzere, jeotermal ve kaya gazı gibi yüksek potansiyeli bulunan yerli kaynaklara yönelik arama, üretim ve Ar-Ge faaliyetleri artırılabacaktır. Linyit rezervlerimizin çevre standartlarına uygun şekilde elektrik enerjisi üretiminde kullanımı artırılabacaktır. Kamu elindeki linyit sahalarının elektrik üretimi suretiyle ekonomiye kazandırılması sağlanarak, elektrik üretiminde ithal kaynaklara bağımlılık azaltılacak ve istihdama katkı sağlanacaktır. Temiz kömür teknolojilerine ilişkin Ar-Ge projeleri desteklenecektir [15].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi artırılacak, yenilenebilir enerji üretiminin şebekeye güvenli bir şekilde entegrasyonunun sağlanması amacıyla gerekli planlama ve yatırımlar gerçekleştirilecektir. Kendi elektrik ihtiyacını karşılamak amaçlı lisanssız güneş enerjisi santrali ile rüzgâr enerjisi santrali uygulamalarının yaygınlaştırılması sağlanacaktır. Elektrik şebekelerinin ve sistemlerinin daha da güçlendirilmesi ve esnek hale getirilmesi sağlanacaktır.

YEKA benzeri modeller sayesinde yenilenebilir kaynakların elektrik enerjisi üretiminde daha yoğun bir şekilde kullanılması sağlanacaktır. Yenilenebilir enerji üretim tesislerinin şebekeye entegrasyonu ve buna ilişkin teknik yardım projeleri hayata geçirilecektir. Artan yenilenebilir enerjinin şebeke üzerinde oluşturduğu kısıtların bertaraf edilmesi amacıyla, pompaj depolamalı HES'ler dâhil olmak üzere enerji depolama sistemleri tesis edilecektir.

Nükleer Güç Santralleri (NGS) elektrik enerjisi üretim portföyüne dâhil edilecek, nükleer enerjinin elektrik enerjisi üretimindeki payının artırılmasına ilişkin çalışmalar sürdürülecek ve kurumsal kapasite güçlendirilecektir. Nükleer Santrallerin kurulumunda ihtiyaç duyulacak çok yüksek ısıya dayanıklı kompozit malzemeleri yerli üretimden tedarik edebilen firmalar desteklenecektir.

Akkuyu NGS'nin ilk ünitesinin inşaatı 2023 yılında tamamlanacak ve elektrik enerjisi üretimine başlanacaktır. Akkuyu NGS'ye ek olarak, iki NGS'nin daha kurulumuna yönelik çalışmalara devam edilecektir. NGS'lerde teknoloji transferi sayesinde nükleer teknolojide dışa bağımlılığı azaltacak önlemler alınacaktır.

Ar-Ge çalışmaları sonucu ortaya çıkan prototipleri test etmek ve ticarileştirmek amacıyla piyasaya sürülecek olan ürünlerin gerekli testlerin yapılabileceği bağımsız akredite Uluslararası Yüksek Güç ve Yüksek Gerilim Deney Laboratuvarı kurulacaktır.

Elektrikli otomotiv üretimine yönelik batarya yatırımı yapılacaktır.

Bu ve sonraki açıklanan planlar, Türkiye'nin enerji politikalarını şekillendirmiş ve enerji alanında çeşitli adımların atılmasına yol açmıştır. Yerli enerji kaynaklarına yatırım yapmak ve enerji verimliliğini artırmak, sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemlidir. Onbirinci Kalkınma planında enerji hedefleri Tablo 17'de verildiği şekilde belirlenmiştir. Planda dönem sonunda elektrik kurulu kapasitesinin 109,47 GW öngörülmüş ve dönem sonunda hedeflenen sonuçlara yakınlığı görülmektedir. Nitekim Şekil 2'de görüleceği üzere Türkiye'nin elektrik enerjisinde toplam kurulu güç kapasitesi, 2023 yılı sonu itibarıyla 106,67 GW'a yükselmiştir.

On birinci Kalkınma Planı dönemi sonunda, Enerji Sektörü Hedeflerinde elektrik kurulu gücünde 106,740 MW düzeyi ile hedefe yaklaşıırken, elektrik enerjisi talebinin beklenen altında kaldığı ve kişi başı elektrik üretiminin istenen düzeyde artmadığı görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payında %38,8 hedeflenirken 2022'de yüzde 42,4 ile konulan hedefin üstüne çıkmıştır.

Öte yandan ülkemiz enerji talebi ekonomik gelişmeye bağlı olarak artış göstermektedir. Birincil enerji tüketimimiz 2018-2021 döneminde yıllık ortalama yüzde 3,5 artış gösterirken elektrik enerjisi talebi ise 2018-2022 döneminde yıllık ortalama yüzde 2,1 artmıştır. Elektrik piyasasında serbestleşme süreciyle özel sektörün elektrik üretimindeki payı yüzde 86 seviyesine yaklaşmıştır. 2018 yılında yüzde 16,5 olan yerli kömürden üretilen elektriğin toplam elektrik üretimindeki payı 2022 yılında yüzde 15,7 seviyesinde gerçekleşirken, aynı dönemde yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı yüzde 32,4'ten yüzde 42,4'e çıkmıştır.

Tablo 17. On Birinci KP’nda Birincil Enerji ve Elektrik Enerjisi Öngörülürü

| | 2018 ¹ | 2023 |
|--|-------------------|---------|
| Birincil Enerji Talebi (BTEP) | 147.955 | 174.279 |
| Elektrik Enerjisi Talebi (TWh) | 303,3 | 375,8 |
| Kişi Başı Birincil Enerji Tüketimi (TEP/Kişi) | 1,81 | 2,01 |
| Kişi Başı Elektrik Enerjisi Tüketimi (kWh/Kişi) | 3.698 | 4.324 |
| Doğal Gazın Elektrik Üretimindeki Payı (%) | 29,85 | 20,7 |
| Yenilenebilir Kaynakların Elektrik Üretimindeki Payı (%) | 32,5 | 38,8 |
| Yerli Kaynaklardan Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarı (TWh) | 150,0 | 219,5 |
| Elektrik Kurulu Gücü (MW) | 88.551 | 109.474 |

Kaynak: 2018 yılı verileri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TEİAŞ’a aittir. 2023 yılı verileri On Birinci Kalkınma Planı tahminleridir.

Not: TEP: Ton Eşdeğer Petrol, BTEP: Bin TEP, kWh: Kilowatt-saat, TWh: Milyar Kilowatt-saat, MW: Megawatt.

(1) Elektrik kurulu gücü haricindeki 2018 yılı verileri gerçekleşme tahminleridir.

Kaynak : 11.BYKP

Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanılması amacıyla toplam 5.850 MW kapasiteli güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihale süreçleri tamamlanmıştır. Enerji arz güvenliğinin artırılması amacıyla yenilenebilir enerji üretiminin desteklenmesi, yerli kömür kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı ve doğal gaz yeraltı depolama kapasitesinin artırılmasına yönelik çalışmalara devam edilmiştir. 2018 yılında temeli atılan Akkuyu Nükleer Güç Santrali (NGS)’nde dört ünitenin inşaat süreci devam etmekte olup yeni nükleer santrallerin kurulmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

Plan Öncesi Dönemde Gelişmeler ve Plan Dönemi Hedefleri :

Enerji arz güvenliğinin artırılması amacıyla yenilenebilir enerji üretiminin desteklenmesi, yerli kömür kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı ve doğal gaz yeraltı depolama kapasitesinin artırılmasına yönelik çalışmalara devam edilmiştir.

Ülkemizde gelişen ekonomisiyle enerji talebinde dünyada üst sıralarda yer almaktadır. Birincil enerji tüketimimiz 2014-2017 döneminde yıllık ortalama yüzde 6,4 artış gösterirken, elektrik enerjisi talebi ise 2014-2018 döneminde yıllık ortalama yüzde 3,9 artmıştır.

Elektrik piyasasında serbestleşme süreciyle özel sektörün elektrik üretimindeki payı yüzde 85 seviyesine yaklaşmıştır. 2013 yılında yüzde 28,9 olan yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı 2018 yılında yüzde 32,5’e çıkmış, aynı dönemde yerli kömürden üretilen elektriğin payı yüzde 12,6’dan yüzde 14,9’a yükselmiştir.

2017 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli ve etkin kullanılması ile üretim tesislerinde kullanılan ekipmanın yurt içinde üretilmesi amacıyla toplam 2.000 MW kapasiteli rüzgâr ve güneş Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihaleleri tamamlanmıştır.

2018 yılında Akkuyu Nükleer Santralinin temeli atılmış, ayrıca yeni nükleer santrallerin kurulmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

Madencilikte önemli bir yeri olan linyit kömürüne yönelik arama faaliyetleri sonucunda, 2013 yılında 14,1 milyar ton olan görünür linyit kömürü rezervi 2018 yılı itibarıyla 18,9 milyar tona çıkarılmıştır.

3.4.2 On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)

En son yayınlanan beş yıllık on ikinci kalkınma planında bütünsel bir yaklaşım ortaya konulmuş ve Enerjide Yeşil Dönüşüm alanında temel hedefler olarak: 2053 Net Sıfır Emisyon hedefine uygun politikalar geliştirilmeyi, karbon ayak izi minimize edilecek ve yenilenebilir enerji kullanımı teşvik edilmesini öngörmektedir. Net Sıfır Emisyon Hedefinde ise 2053’e doğru ilerlerken, karbon ayak izini minimize etmek ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmek amacıyla politikalar geliştirilecektir [16].

Türkiye'nin geleceğini şekillendiren önemli bir yol haritası olarak sunulmuştur.. Bu plan, 2053 vizyonu doğrultusunda belirlenen hedeflerine ulaşma yolunda gerçekleştirmeyi amaçlayan ve sürdürülebilir ve kapsayıcı büyümeyi hedefleyen bütüncül bir yaklaşımı içermektedir. Enerji sektörüne odaklandığımızda, aşağıdaki hedefler ve amaçlar önemlidir: Plan, enerji üretiminde yerli kaynakların daha fazla kullanılmasını hedef olarak koymakta ve bu hedef ile enerji güvenliğini artırırken ithal doğal gaz gibi kaynakların payını azaltmayı amaçlamaktadır. Planda yerli batarya depolama kapasitesi içinde hedef belirlenmiştir. İlk kez, kalkınma planında yerli batarya depolama teknolojilerine odaklanılmış ve enerji depolama alanında yerli kapasitenin artırılmasını hedeflemiştir.

Planda Türkiye'nin yenilenebilir enerji, elektrifikasyon, enerji verimliliği, yeşil hidrojen ve enerji depolama yatırımları 2053 yılı net sıfır emisyon hedefi için kritik rol oynayacağı belirtilmiştir. Ayrıca Akkuyu NGS'ye ilave yeni nükleer santraller ve yerli küçük modüler reaktörler (SMR)'le elektrik üretimi artırılarak nükleer enerjinin ülkemizde kullanımı yaygınlaşacaktır. Ülkemiz yerli ve yenilenebilir kaynaklarıyla arz güvenliğini sağlamış bir ülke konumuna geleceği vurgulanmıştır.

Yenilenebilir enerji, elektrifikasyon, enerji verimliliği, yeşil hidrojen ve enerji depolama yatırımları 2053 yılı net sıfır emisyon hedefi için kritik rol oynayacaktır. 2053 net sıfır emisyon hedefinin ülkemiz enerji dengesi ve kömür politikalarının geleceğini etkileyeceği değerlendirilmektedir.

Nükleer enerji, elektrik üretim portföyüne dâhil edilecek, nükleer teknolojilerin kurulumu ve yerleştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülecektir. Akkuyu Nükleer Güç Santrali (NGS) bütün üniteleri ile elektrik üretimine başlayacaktır. Nükleer santral kurulu gücünün artırılmasına yönelik çalışmalara devam edilecektir. Küçük modüler reaktörler, füzyon teknolojileri ve ileri nesil reaktörler gibi yeni teknolojilere yönelik çalışmalar yapılacaktır. Nükleer atıkların güvenli bir şekilde bertarafı için atık tesisi kurulmasına yönelik çalışmalar yürütülecektir.

Yenilenebilir Enerji Kaynakları Hedefi olarak 2053 yılı net sıfır emisyon hedefi kapsamında artan elektrifikasyonun daha temiz kaynaklarla karşılanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi artırılacak ve şebekeye entegrasyonu sağlanacaktır. Yerli aksam yükümlülüğü olan yeni Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihaleleri yapılacak, deniz üstü YEKA projeleri geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülecektir.

Kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan üretimin şebeke üzerinde oluşturduğu olumsuz etkilerin azaltılması amacıyla elektrik şebekelerinin esnekliği artırılacaktır. Pompaj depolamalı HES'ler de dâhil olmak üzere enerji depolama sistemleri tesis edilecektir.

*Enerjide dönüşümün temelinde fosil kaynakların yerini yenilenebilir kaynaklara bırakması bulunmaktadır. Yenilenebilir kaynakların 2025 yılında kömürü geride bırakarak küresel elektrik üretimini karşılamadaki en büyük kaynak olacağı tahmin edilmektedir. Diğer taraftan kesintili bir yapıya sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte **şebeke esnekliğinin artırılması** kritik önem arz etmekte, bu kapsamda enerji depolama sistemleri ön plana çıkmaktadır.*

Nükleer enerji yatırımlarına yönelimler yeniden artma eğilimindedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını nükleer enerjiyle destekleme politikası kapsamında pek çok ülke hâlihazırda var olan santrallerini yeniden aktifleştirme ve yenilerini inşa etme yönünde kararlar almaktadır. Bu çerçevede, mikro, küçük ve yeni nesil reaktörlerin geliştirilmesi öne çıkmaktadır.

Hidrojen teknolojileri enerji dönüşümünde bir diğer önemli unsur olarak öne çıkmaya başlamıştır. Günümüzde büyük çoğunlukla fosil kaynaklardan elde edilen hidrojenin kullanımının ulaşım, ısı ihtiyacı ve elektrik üretimi gibi çeşitli alanlarda yaygınlaşacağı ve özellikle net sıfır emisyon hedefleri çerçevesinde yeşil hidrojen üretiminin daha önemli hale geleceği öngörülmektedir.

Kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan üretimin şebeke üzerinde oluşturduğu olumsuz etkilerin azaltılması amacıyla elektrik şebekelerinin esnekliği arttırılacaktır. Pompaj depolamalı HES'ler de dâhil olmak üzere enerji depolama sistemleri tesis edilecektir. Ülkemizin enerji teknolojileri alanındaki yetenekleri ve rekabetçiliği arttırılacak, ihracat potansiyeli güçlendirilecektir. Yenilenebilir, nükleer, enerji depolama ve hidrojen teknolojilerinde mevcut durumdaki yerli üretim kabiliyetimize ilişkin envanter çalışması yapılacak ve yol haritası belirlenecektir. Kritik ve katma değerli ekipmanların yerli olarak üretilmesi desteklenecek, yerli ürünlerin geliştirilmesine ilişkin Ar-Ge ve Ür-Ge faaliyetleri yürütülecek ve **pilot tesisler** hayata geçirilecektir.

Başta yeşil hidrojen olmak üzere hidrojen teknolojilerinin ve altyapısının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılacak ve ihtiyaç duyulan alanlarda uluslararası işbirlikleri desteklenecektir. Hidrojenin teknik ve ekonomik açıdan kullanılabilirliğine ilişkin sektörel analizler yapılacaktır. Yeşil hidrojen üretiminin sağlanabilmesi için yerli elektrolizör geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılacaktır. Hidrojenin taşınmasına ve depolanmasına yönelik Ar-Ge çalışmaları sürdürülecektir.

Plan Öncesi Dönemde Gelişmeler ve Plan Dönemi Hedefleri :

Birincil enerji tüketimimiz 2018-2021 döneminde yıllık ortalama yüzde 3,5 artış gösterirken elektrik enerjisi talebi ise 2018-2022 döneminde yıllık ortalama yüzde 2,1 artmıştır. Elektrik piyasasında serbestleşme süreciyle özel sektörün elektrik üretimindeki payı yüzde 86 seviyesine yaklaşmıştır.

Plan öncesi dönemde ; 2018 yılında yüzde 16,5 olan yerli kömürden üretilen elektriğin toplam elektrik üretimindeki payı 2022 yılında yüzde 15,7 seviyesinde gerçekleşirken, aynı dönemde yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı yüzde 32,4'ten yüzde 42,4'e çıkmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanılması amacıyla toplam 5.850 MW kapasiteli güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihale süreçleri tamamlanmıştır.

On ikinci Kalkınma Planında, **kişi başı elektrik tüketimi 4700 kWh** olarak hedeflenmiştir. Plan dönemi sonunda yenilenebilir enerji kaynakların elektrik üretimindeki payı %50 olarak hedeflenmiş ve rüzgar, güneş kurulu gücü hedefi yaklaşık 50 000 MW olarak belirlenmiştir (Tablo 18).

Tablo 18. On ikinci KP’nda Birincil Enerji ve Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketim Öngörülleri

| | 2022 | 2023 | 2028 |
|--|----------------------|---------|---------|
| Birincil Enerji Talebi (BTEP) | 159.500 ¹ | 165.350 | 190.000 |
| Kişi Başı Birincil Enerji Tüketimi (TEP/Kişi) | 1,87 ² | 1,90 | 2,0 |
| Elektrik Enerjisi Talebi (TWh) | 331 | 325 | 430 |
| Kişi Başı Elektrik Enerjisi Tüketimi (kWh/Kişi) | 3.883 | 3.780 | 4.700 |
| Elektrik Kurulu Gücü (MW) | 103.809 | 106.800 | 136.000 |
| Rüzgâr Kurulu Gücü (MW) | 11.396 | 11.700 | 18.000 |
| Güneş Kurulu Gücü (MW) | 9.425 | 11.350 | 30.000 |
| Yerli Kaynaklardan Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarı (TWh) | 190,4 | 176,0 | 270,0 |
| Yenilenebilir Kaynakların Elektrik Üretimindeki Payı (%) | 42,4 | 40 | 50 |
| Doğal Gazın Elektrik Üretimindeki Payı (%) | 22,9 | 23 | 15 |
| Yer Altı Doğal Gaz Depolama Kapasitesi (Milyar m ³) | 5,8 | 5,8 | 13 |
| Enerji Verimliliğinden Sağlanan Tasarruf Miktarı ² (BTEP) | - | - | 4.500 |
| Batarya Depolama Kapasitesi (MW) | 0 | 0 | 5.000 |

Kaynak: 2022 yılı verileri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile TEİAŞ'a aittir. 2023 yılı verileri gerçekleştirme tahmini olup 2028 yılı verileri On İkinci Kalkınma Planı hedefleridir.
Not: TEP: Ton Eşdeğer Petrol, BTEP: Bin TEP, kWh: Kilovatt-saat, TWh: Milyar Kilovatt-saat, MW: Megawatt.
(1) 2022 yılısonu tahminidir.
(2) Plan dönemi boyunca sağlanacak toplam tasarruf miktarını ifade etmektedir.

Kaynak : 12.BYKP

2018 yılında temeli atılan Akkuyu Nükleer Güç Santrali (NGS)’nde dört ünitenin inşaat süreci devam etmekte olup yeni nükleer santrallerin kurulmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca Akkuyu NGS’ye ilave yeni nükleer santraller ve yerli küçük modüler reaktörler (SMR)’le elektrik üretimi artırılarak nükleer enerjinin ülkemizde kullanımı yaygınlaşacaktır. Ülkemiz yerli ve yenilenebilir kaynaklarıyla arz güvenliğini sağlamış bir ülke konumuna gelecektir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Kalkınma Planları Türkiye’nin enerji politikalarını şekillendirmekle beraber aynı zamanda enerji alanında çeşitli adımların atılmasını sağlayarak ekonomik büyümeyi tetiklemiştir. Planlarda Enerji talebinin güvenilir ve sürekli biçimde düşük maliyetle karşılanması için gerekli önlemler alınması öncelik hedef olmuştur. Türkiye’nin Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1963-1967), 15 yıllık bir perspektif planının ilk dilimi olarak hazırlanmıştı. Bu plan, İkinci Dünya Savaşı sonrasında Batı Avrupa ülkelerinde uygulamaya konan “yol gösterici plan” anlayışını benimsemiştir. Enerji konusu bu dönemde de önemli bir yer tutmuştur. 1996-2000 yıllarını kapsayan VII. Plan döneminde ise özel sektörün işletme hakkı devri, yap-işlet ve yap-işlet devret yöntemleriyle enerji sektörüne girişine yönelik uygulamalara devam edilmiştir. VII. Plan dönemi içinde birincil enerji tüketimi yılda ortalama yüzde 4,5 oranında büyümüştür. Aynı dönemde birincil enerji üretiminde yıllık yüzde 1,3 oranında bir büyüme sağlanmış, birincil enerji üretimi 26,3 milyon ton petrol eşdeğerinden 28,1 milyon ton petrol eşdeğerine ulaşmıştır. Elektrik sektöründe, VII. Plan döneminin ilk dört yılında kurulu santral gücüne 5.165 MW, üretim kapasitesine 34,3 milyar kWh ilave yapılmıştır. Türkiye’nin en son yayınlanan On İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2024-2028), bütüncül bir yaklaşım sergilemekte, ‘2053 net sıfır emisyon hedefini esas alarak’ başlamakta, planda nükleer enerjiyi daha fazla kullanmak, enerji verimliliğini artırmak, yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirerek kendine yeterli olmak gibi birçok hedef yer almaktadır. Planda, ‘Enerji arz güvenliğinin sağlanması kapsamında çevresel etkiler azami ölçüde göz önünde bulundurularak yerli kömürün kullanımına devam edilecektir’ kararı yer almakta olup mevcut kömür yakıtlı santrallerde rehabilitasyon yapılarak, iyileştirmeler sağlanacağı, rezervlerin temiz kömür teknolojileriyle kullanılması için Ar-Ge çalışmalarının yapılması planlandığı belirtilmiştir. 12. Kalkınma Planı’nda, Kişi başına düşen elektrik tüketimini altı yılda yüzde 25 oranında artırılması öngörülmüştür. Enerjide Dijital Dönüşüm alanında temel hedefler olarak: Enerji ve ulaşım alanında uluslararası rekabet gücünün artırılması, mevcut altyapının güçlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefler, Türkiye’nin enerji sektöründe güçlenmesini ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemesini sağlamayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak, Türkiye’nin kalkınma planlarında, yaşam standardını doğrudan etkileyen elektrik enerjisi üretiminin yerli kaynaklardan sağlanması öncelikli olarak hedef alınmış, son yıllarda elektrik enerjisinin kalitesinin artırılması, çevresel etkilerini en aza indirmek amacıyla yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının devreye alınmasına önem verildiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Beş yıllık kalkınma planı dönemleri, www.ekodialog.com/Turkiye-iktisat-tarihi/birinci-bes-yillik-kalkinma-donemi.html
- [2]. B. Teneke ODUNCU, Enerji Ve Kalkınma İlişkisi: Türkiye Örneği, Hacettepe Üniversitesi SBE, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi AD, Doktora Tezi. 2020
- [3]. V. Engin, U. Gülsoy, İstanbul'un Aydınlatılmasında Elektrik Dönemi, <https://istanbultarihi.ist/357-istanbulun-aydinlatilmasinda-elektrik-donemi>, Cilt 9.
- [4]. Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri, Teiaş Genel Müdürlüğü, <https://www.teias.gov.tr>
- [5]. Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1963-1967), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 01.07.2024)
- [6]. İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1968-1972), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 01.07.2024)
- [7]. Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı (1973-1977), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 01.07.2024)
- [8]. Dördüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı (1979-1983), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 05.07.2024)
- [9]. Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1985-1989), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 05.07.2024)
- [10]. Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı (1990-1994), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 05.07.2024)
- [11]. Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1996-2000), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 08.07.2024)
- [12]. Uzun Vadeli Strateji ve Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2001-2005), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 08.07.2024)
- [13]. Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 08.07.2024)
- [14]. Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 12.07.2024)
- [15]. On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 12.07.2024)
- [16]. On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028), Kalkınma Planları - T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, <https://www.sbb.gov.tr/> (Erişim tarihi 12.07.2024)

121: Mikro Şebeke Tasarımı ile Şebeke Esnekliği ve Analizi**Ece Aksoy**

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi,

Kardelen Kamaşlı, Tugay Eren Güzelyol

Ar-Ge Yöneticiliği, Teknoloji ve Ar-Ge Müdürlüğü, Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş

Özge Sarın, Mertkan Dilışen

Stratejik Planlama Yöneticiliği, Yatırım ve Planlama Müdürlüğü, Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş

ÖZET

Ülkemizde ve dünyada artan sanayileşme ve nüfusun etkisiyle hızla artan enerji arzı ve tüketimi, enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik konusunda önemli endişelere yol açmaktadır. Geleneksel enerji sistemleri bu talebi karşılamakta güçlük çekmekte ve sık sık kesinti ile dengesizliklere neden olmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak öne çıkan mikro şebekeler, yerel düzeyde enerji üretimi ve dağıtımını sağlayan otonom sistemlerdir. Güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve enerji depolama sistemleri gibi dağıtık enerji kaynaklarıyla entegre çalışan mikro şebekeler, şebeke esnekliğini artırmaktadır. Şebeke esnekliği; elektrik şebekesinin değişen talep ve arza uyum sağlama yeteneği olup, enerjinin üretildiği, tüketildiği, depolandığı ve tüm paydaşlar arasında ticaretinin yapılabildiği bir şebeke modelinin oluşturulmasına olanak tanır.

Mikro şebekelerin yerel enerji üretimi ve tüketimini optimize ederek şebeke yükünü dengeleme potansiyeli, GDZ Elektrik Dağıtım AŞ' nin Çeşme İlçesi, Ilıca bölgesindeki çalışmalarıyla analiz edilmiştir. Bu bölgenin karakteristiğinin turizm alanı olması ve nüfusunda yaz ayları özelinde ciddi artışlar olması sebebi ile enerji tedarikinde problemler meydana gelebilmektedir. Özellikle puant dönemlerinde enerji talebindeki ani yükselişler gerilim düşümlerine ve arızalara sebep olmaktadır. Mikro şebeke tasarımı ve analizi kapsamında, Çeşme İlçesi, Ilıca bölgesindeki 6,794 km uzunluğundaki iletken üzerinde DIGSILENT PF programı kullanılarak modelleme ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, mevcut şebekenin belirli noktalarında yaşanan yüklenme problemlerinin olduğunu göstermektedir. Planlanan elektrikli araç şarj istasyonlarının şebekeye entegrasyonu ile birlikte yapılan analiz çalışmaları sonucunda trafo merkezlerinde % 10-30, Çeşme İlçesinde ise %5 oranında yük artışına neden olacağı hesaplanmıştır. Bu, mevcut şebekenin kapasite sınırlarını zorlayarak gerilim düşümleri ve ekipmanlarda aşırı ısınmalara yol açabilir, ekipman ömrünü kısaltabilir ve kesintilere sebep olabilir. Diğer yandan, güneş enerjisi santrali ve enerji depolama sisteminin entegrasyonu senaryosunda, trafo merkezlerindeki yüklenme ortalama %10, Çeşme İlçesinde ise %5 oranında azalmıştır. Bu durum şebeke üzerindeki gerilim düşümlerini ve aşırı yüklenmeleri azaltarak, ekipman ömrünü uzatabilir ve kesinti risklerini minimize edebilir.

Anahtar Sözcükler: Enerji Depolama, Mikro Şebeke, Optimizasyon, Şebeke Esnekliği, Şebeke Yönetimi

GİRİŞ

Enerji, modern toplumların temel yapı taşlarından biri olarak, sanayi devriminden bu yana sürekli bir evrim geçirmiştir. Sanayileşme ve teknolojik ilerlemelerle birlikte, artan enerji talebi, enerji üretim ve dağıtım altyapılarının sürekli olarak gelişimini zorunlu kılmıştır. Günümüzde, enerji talebindeki yükseliş hem ulusal hem de küresel düzeyde enerji sistemlerinin daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir hale getirilmesi gerekliliğini beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, enerji sistemlerinin temel yapı taşlarını oluşturan dağıtım şebekeleri, enerji kaynaklarının üretim noktalarından tüketiciye ulaşımını sağlarken, aynı zamanda sistemin verimliliği ve güvenliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Enerji arzındaki artış ve değişen talep dinamikleri, enerji sistemlerinde köklü dönüşümleri ve yenilikçi çözümleri gündeme getirmiştir. Küresel çapta, bu dönüşümler, enerji altyapılarının artan talebi karşılayacak ve çevresel etkileri azaltacak şekilde yeniden yapılandırılmasını içermektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde, enerji sistemlerinin esnekliğini artırmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek amacıyla çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu çerçevede, mikro şebekeler önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmiş enerji üretim ağlarında elektrik güç kaynağının güvenilirliğini ve kalitesini artırmanın bir yolu, dağıtılmış üretim, enerji depolama ve enerji yönetiminin mikro şebekeler ve dağıtım ağları düzeyinde entegrasyonudur. Dağıtılmış üretimin faydaları, iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması, enerji kaynaklarının daha etkin kullanılması, inşaat sürelerinin kısaltılması ve farklı voltaj seviyelerinde üretim imkanıdır. Bu entegrasyon, güç kaynaklarının daha esnek ve ölçeklenebilir olmasını sağlar, böylece şebeke esnekliğini artırır ve güvenilirliği sağlamada önemli bir rol oynar. Mikro şebekeler ve dağıtım ağları düzeyinde dağıtılmış üretimin, enerji depolamanın ve etkin enerji yönetiminin bir araya getirilmesi, enerji sisteminin verimliliğini artırırken çevresel etkiyi azaltmaya da yardımcı olabilir. Yeni teknolojilerin uygulanması, özellikle güç elektroniği arayüzünün ve modern kontrol teorisinin gelişmesiyle birlikte mikro şebeke kavramı ortaya çıkmıştır. Mikro şebeke, birçok modern güç teknolojisini kullanan, gaz türbinleri, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, yakıt hücreleri, enerji depolama cihazlarını bir araya getiren ve kullanıcı tarafına doğrudan bağlanan daha küçük, bağımsız ve merkezi olmayan bir sistemdir [1].

Mikro şebeke, mevcut ağ ile paralel olarak, sistem operatörünün denetleyebildiği bir varlık olarak çalışabilir. Ayrıca, mikro şebeke, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu mümkün kılan esnek ve verimli bir elektrik ağını destekler. Bununla birlikte, yerel güç kaynaklarının kullanılması, mevcut şebeke üzerindeki yükü azaltır ve iletim ile dağıtım kayıplarını azaltarak elektrik dağıtım sisteminin verimliliğini artırır [2].

Dağıtım şebekeleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu konusunda yapılan çok çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bununla birlikte dağıtım şebekesi oluşturulması ile hatlardaki enerji kayıplarının azaltılması ve gerilim profilleri üzerine yapılan çalışmalarda incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla ilişkili güç kalitesi sorunlarını ele alan bir çalışmada, enerji depolama

birimlerinin konumlandırılması incelenmiş ve bunun sistem performansına olan etkisi değerlendirilmiştir [3]. Diğer bir çalışmada, mikro şebekeler için hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimal planlanması ve tasarımı üzerine yapılan araştırmada, Dağıtılmış Enerji Kaynakları Müşteri Benimseme Modeli (DER-CAM) kullanılmış ve sistemin performansı incelenmiştir. Bu model, dağıtılmış enerji kaynaklarının (DER'ler) en uygun boyut, tür ve çalışma programlarını belirleyerek sistemin verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Brookhaven Ulusal Laboratuvarı (BNL) kampüsü, çalışmanın etkinliğini göstermek için bir örnek olarak seçilmiştir. Araştırma, mikro şebekelerde yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımı konusunda önemli bulgulara ulaşmıştır [4]. Enerji talebinin arzı aştığı durumlarda, elektrik şebekesinin kararlılığı bozulur ve kesintiler meydana gelebilir. Bu durum, güç akışının kesilmesiyle büyük bir sorun oluşturur. Akıllı mikro şebeke sistemlerinin kullanımı, bu tür durumların önlenmesinde kritik bir rol oynar. Elektrik şebekesinin kararlılığının bozulduğu durumlarda, akıllı şebekeye bağlı depolama birimleri devreye alınarak bu sorunlarla başa çıkılabilir [5]. Örnek bir çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla tasarlanan hibrit mikro şebeke sistemlerinin teknik yönlerini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Güneş panelleri, rüzgâr türbini, mikro hidroelektrik santral, yakıt hücresi ve bataryadan oluşan bu sistem, elektrik ihtiyacını karşılamak için bir araya getirilmiştir. Yapılan simülasyonlar ve analizler, sistemdeki yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanıldığını ve enerji talebinin sürekli olarak karşılandığını göstermektedir. Ayrıca, enerji yönetimi stratejisinin, sistemdeki birimlerin durumunu gerçek zamanlı olarak izlemek ve enerji akışını optimize etmek için geliştirilen bir bilgisayar programıyla desteklendiği belirtilmektedir. Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla tasarlanan hibrit mikro şebeke sistemlerinin, elektrik arz güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır [6]. Benzer bir RES entegrasyonu çalışmasında, dağıtım genişletme planlaması için yeni bir model önermektedir. Bu model, dağıtılabilir dağıtılmış üretim birimlerinin (DG) kurulumunu kullanarak yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) entegrasyonunu kolaylaştırmayı hedeflemektedir. Yapılan analizler, esneklik odaklı maliyetlerin dikkate alındığı durumlarda, DG birimlerinin net yük artış oranlarını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, farklı artış maliyetlerinin etkisinin incelendiği bir duyarlılık analizi de sunulmuştur. Sonuçlar, artan maliyetlerin, DG birimlerinin daha etkin kullanılmasını teşvik ederek net yük eğrilerini dengeli hale getirebileceğini vurgulamaktadır. Bu model, gelecekteki enerji sistemlerinin planlanması için değerli bir araç olabilir [7].

Başka bir çalışmada ise EA şarjlarının dağıtım şebekesi güvenilirliği, gerilim düşümü ve güç kaybı gibi etkilerini temel alarak EA şarjlarının optimal konumda olması gerektiği önerilmiş ve bu optimizasyonu sağlamak için evrimsel hesaplama metodu benimsenmiştir [8]. Bununla birlikte, EA'ların günlük yük eğrisi üzerinde mevsimlerin etkilerini hesaba katmış ve EA şarjının şebeke entegrasyonuna getirdiği zorlukların kış aylarında değil, yaz aylarında daha fazla olduğunu ortaya koymuştur [9]. EA şarjlarının yoğun olduğu bölgelerde, çok sayıda eş zamanlı EA şarjının arızalanması veya servis harici kalması gibi durumların kaçınılmaz olacağı öngörülmektedir.. Bu durumda gerilim düşümlerinin

artması ve harmoniklerin oluşmasına neden olabilir [10]. EA şarjlarıyla birlikte oluşacak olan yük talebinde güç sisteminin dengesini etkileyen önemli faktörlerden biri de şebeke hattının genel olarak nasıl çalıştığıdır [11]. Şarj istasyonlarının şebeke sistemine olan etkilerini azaltmak için, şebeke sisteminin esnek bir şekilde çalışabilmesi ve yük aktarımlarının yapılması gerekmektedir [12]. EA sayılarının artması ve piyasada rekabet edebilmeleri için, dağıtım şebekesine entegrasyonundaki sorunların çözüme kavuşturulması önemlidir [13]. Ancak, EA şarjlarının şebekedeki kullanımı, olası aşırı harmoniklerle güç sisteminde potansiyel bir sorun oluşturabilir [14]. Aşırı harmonik akım bozulmasıyla ilişkili EA şarj sistemleri, ikincil dağıtım hatları ve transformatör değerlerinde düşüslere veya hizmet kalitesi sorunlarına yol açabilir [15]. Literatürde bazı çalışmalarda da ifade edildiği üzere, şarj istasyonlarının optimize edilmesi, dağıtım sisteminin daha güvenli, istikrarlı ve ekonomik bir şekilde işlemesi açısından önemli bir etkiye sahiptir [16].

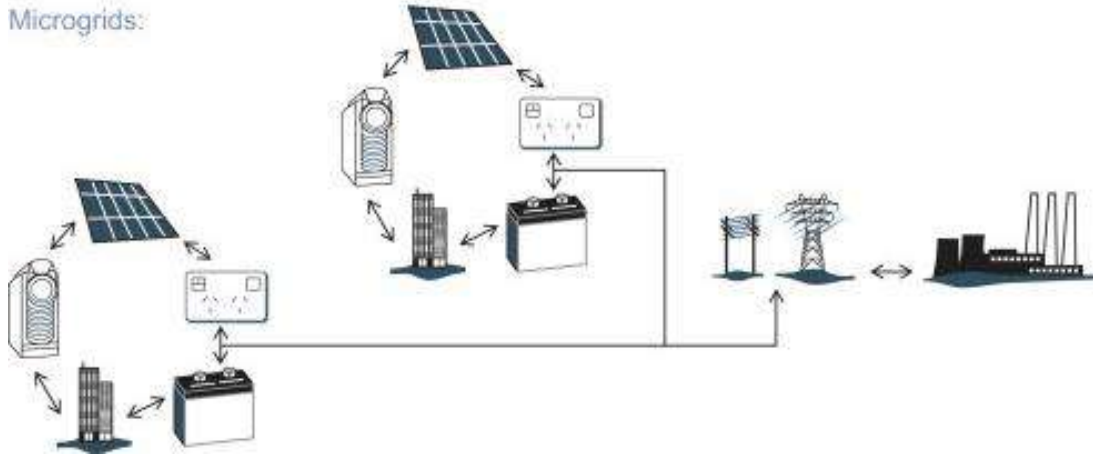
Bu çalışmada simülasyonlar, DIgSILENT PowerFactory programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, mikro şebeke oluşumuna şarj istasyonları ve depolama sistemlerinin eklenmesi planlanmıştır. Çeşme-İlica (İzmir) bölgesindeki gerçek veriler temel alınarak, planlanan şarj istasyonlarının güç sistemine olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistem operatöründen elde edilen veriler doğrultusunda, şarj istasyonlarının kurulması planlanan belirli noktaların şebeke varlıkları üzerinde potansiyel değişimleri tablo ve grafiklerle detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Ayrıca, çalışmada kullanılan dağıtım sistemi DIgSILENT PowerFactory ortamında simülasyon yapılarak analiz edilmiştir. Senaryoların sonuçları BULGULAR bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Elde edilen kapsamlı sonuçlar ise SONUÇLAR bölümünde detaylı bir şekilde incelenmiş ve sunulmuştur. Bu çalışma, pilot bölgeye özgü zorluklarla başa çıkabilmek için veriye dayalı kararlar alınmasını içeren stratejik yaklaşımları içermektedir.

1.1 Mikro Şebeke

Mikro şebeke, belirli bir coğrafi alanda, yerel düzeyde enerji üretimi, tüketimi, depolaması ve yönetimini sağlayan hem bağımsız hem de ana enerji şebekesiyle entegre olarak çalışabilen otonom bir enerji sistemidir. Bu sistem, rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, küçük hidroelektrik santraller, jeotermal enerji, biyokütle ve biyogaz gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek yerel enerji arzını optimize eder. Mikro şebekeler, enerji arzındaki kesintilere karşı dayanıklılığı artırarak yerel enerji ihtiyaçlarını karşılar ve çevresel sürdürülebilirliği destekler. Ayrıca, enerji geçişleri sırasında güç kalitesini dengeleyerek güvenilir bir enerji beslemesi sağlar ve kesintiler sırasında bağımsız olarak otomatik çalışabilme yeteneğine sahiptir. Mikro şebekeler, gelişmiş enerji yönetim sistemleri, depolama çözümleri ve kontrol teknolojileri ile donatılmış olup, enerji güvenliğini ve verimliliğini artıran kritik altyapılardır.

Şekil 1. Mikro-şebekeler içeren ana şebeke modeli



Kaynak: Glenn Platt, Adam Berry,, David Cornforth, Chapter 8 - What Role for Microgrids?, Editor(s): Fereidoon P. Sioshansi, Smart Grid, Academic Press, 2012

Mikro Şebekenin Temel Bileşenleri

Enerji Üretim Kaynakları

Mikro şebekeler genellikle yenilenebilir enerji kaynakları (güneş panelleri, rüzgar türbinleri, biyokütle enerjisi), fosil yakıtlı jeneratörler ve yakıt hücreleri gibi çeşitli enerji üretim kaynaklarını içerir. Bu kaynaklar, mikro şebekenin enerji ihtiyacını karşılamak için birlikte çalışır. Yenilenebilir enerji kaynakları, karbon ayak izini azaltarak çevresel sürdürülebilirliği artırır.

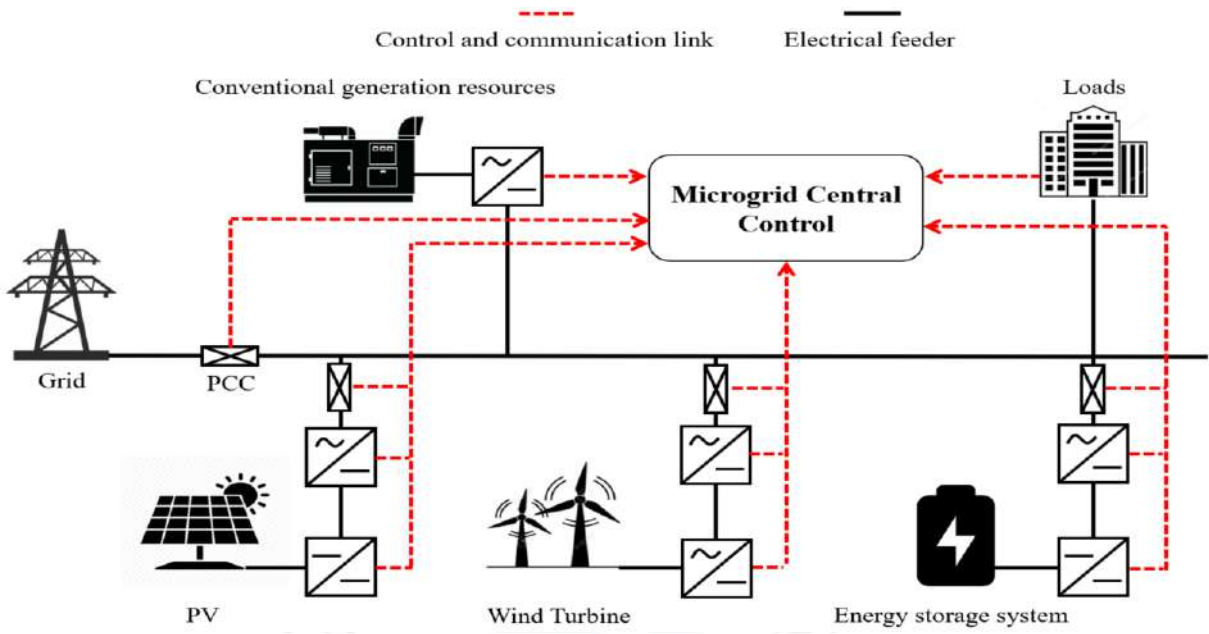
Enerji Depolama Sistemleri

Bataryalar, süper kapasitörler ve pompalı hidroelektrik depolama gibi enerji depolama sistemleri, mikro şebekenin enerji dengesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Bu sistemler, enerji üretiminin talebi karşılayamadığı zamanlarda devreye girerek enerji kesintilerini önler ve şebekenin güvenilirliğini artırır. Depolama sistemleri ayrıca, enerji üretiminin talebin üzerinde olduğu zamanlarda fazla enerjiyi depolayarak verimliliği maksimize eder.

Enerji Yönetim Sistemi (EMS)

EMS, mikro şebekenin enerji üretim, depolama ve tüketim bileşenlerini entegre ederek, enerji akışını optimize eder. Akıllı algoritmalar ve yazılımlar kullanarak, talep yanıtı stratejileri uygular ve şebeke esnekliğini artırır. EMS ayrıca, enerji maliyetlerini düşürmek ve sistem performansını artırmak için gerçek zamanlı veri analizi yapar.

Şekil 2. Mikro-şebekede enerji yönetim sisteminin şematik gösterimi



Kaynak: <https://www.mdpi.com>

1.2 Elektrikli Araç Şarj İstasyonları

Elektrikli araç şarj istasyonları, elektrikli araçların bataryalarını yeniden şarj etmek için kullanılan özel donanımlardır. Bu istasyonlar genellikle üç ana bileşenden oluşur: güç kaynağı ünitesi, şarj ünitesi ve bağlantı kablosu. Güç kaynağı ünitesi, elektrik şebekesinden gelen enerjiyi alır ve bu enerjiyi araç bataryasına uygun bir biçimde dönüştürür. Şarj ünitesi, şarj işlemini kontrol eden ve düzenleyen bir elektronik devredir. Bu ünite, araçla iletişim kurarak bataryanın durumu hakkında bilgi alır ve şarj sürecini optimize eder. Bağlantı kablosu ise aracın şarj portuna bağlanarak enerjinin transferini sağlar. Şarj istasyonları, AC (alternatif akım) ve DC (doğru akım) olmak üzere iki ana tipe ayrılır. AC şarj istasyonları genellikle evlerde ve ticari alanlarda kullanılırken, DC hızlı şarj istasyonları yüksek güçlü şarj sağlamak için otoyollarda ve dinlenme tesislerinde yaygın olarak bulunur.

Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Dağıtım Şebekesi Üzerindeki Etkisi

Elektrikli araç şarj istasyonları, elektrik şebekesi üzerinde önemli etkiler yaratabilir, özellikle de şebekenin kapasitesinin sınırlı olduğu bölgelerde. Şarj istasyonları, özellikle yüksek güçlü DC hızlı şarj üniteleri, enerji talebinde ani artışlara neden olabilir. Bu ani yüklenmeler, şebekenin dengesi üzerinde stres yaratabilir ve gerilim düşümlerine yol açabilir. Özellikle akşam saatlerinde, evlerde ve iş yerlerinde elektrik talebinin zaten yüksek olduğu zamanlarda, çok sayıda aracın aynı anda şarj edilmesi şebekenin aşırı yüklenmesine sebep olabilir. Bu durum, enerji kalitesini düşürebilir ve aşırı yüklenme riskini artırabilir. Şebeke operatörleri, bu tür etkileri hafifletmek için akıllı şebeke teknolojilerini, enerji depolama sistemlerini ve yük dengeleme stratejilerini kullanmalıdır.

1.3 DIgSILENT PowerFactory (PF)

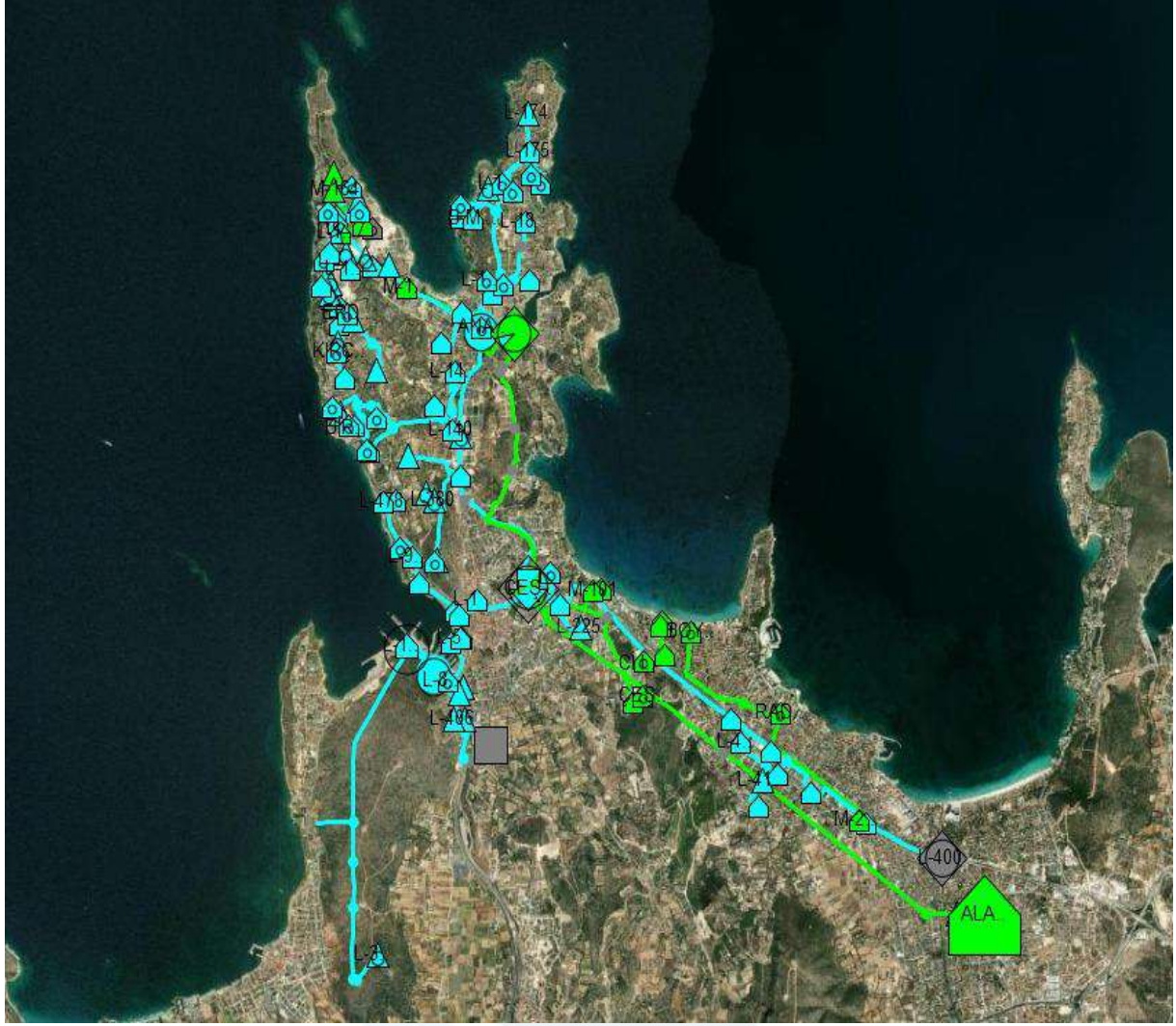
DIgSILENT PowerFactory, elektrik mühendisleri, şebeke operatörleri ve araştırmacılar için gelişmiş modelleme, analiz ve simülasyon yetenekleri sunan güçlü bir yazılım paketidir. Yazılım, basit radyal dağıtım sistemlerinden karmaşık çok bağlantılı AC ve DC iletim şebekelerine kadar çeşitli elektrik şebeke topolojilerini modelleyebilir. Kısa devre analizi, sistemdeki kısa devre akımlarını değerlendirirken, yük akışı analizi gerilim profilleri ve güç kayıplarını hesaplar. Dinamik kararlılık analizi, şebekenin geçici rejimlerini ve sistem kararlılığını değerlendirir. Elektroharmolik analiz, şebekedeki harmonik bozulmaları belirler. Gerçek zamanlı simülasyonlar, şebekenin gerçek hayattaki davranışlarını öngörerek operatörlere kritik kararlar almada yardımcı olur.

YÖNTEM

2.1 Sistem Tasarımı

Pilot bölge üzerindeki mikro şebekenin tasarımı, güneş enerji santrali (GES), şarj istasyonları ve depolama sistemleri gibi bileşenlerin entegrasyonunu içerir. Bu tasarım, Çeşme gibi punt dönemler ile ciddi yük farklarının yaşandığı, mevsimsel tüketim talebinin değişkenlik gösterdiği bölgenin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanır. Ayrıca, elektrikli araç şarj istasyonlarının stratejik yerleşimleri ve enerji depolama sistemlerinin kapasitesi gibi faktörleri de dikkate alır. Sistem tasarımının hedefi, pilot bölgede enerji tedarikinin güvenilirliği ve enerji tedarik sürekliliğini artırarak; sürdürülebilir bir enerji modeli oluşturulması ile birlikte geleceğe yönelik bir enerji altyapısı sağlamaktır. Tasarım sürecinde, Çeşme-Ilıca bölgesine ilişkin enerji talebi ve arzı verileri DIgSILENT Power Factory sistemi üzerinden alınmıştır. Sistem üzerine veriler, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS, GIS) ve Otomatik Sayaç Okuma Sistemi (OSOS, AMRS) üzerinden aktarılmaktadır. Aktarılan verilerin doğruluğu ve kullanılabilirliğine ilişkin detaylı çalışmalar Stratejik Planlama Yöneticiliği tarafından gerçekleştirilmektedir. Toplanan bu veriler, bölgenin mevcut enerji tüketim desenini, mevsimsel ve günlük enerji talebi dalgalanmalarını ve bölgedeki şebeke kapasitesi ile sınırlamalarını belirlemek amacıyla detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

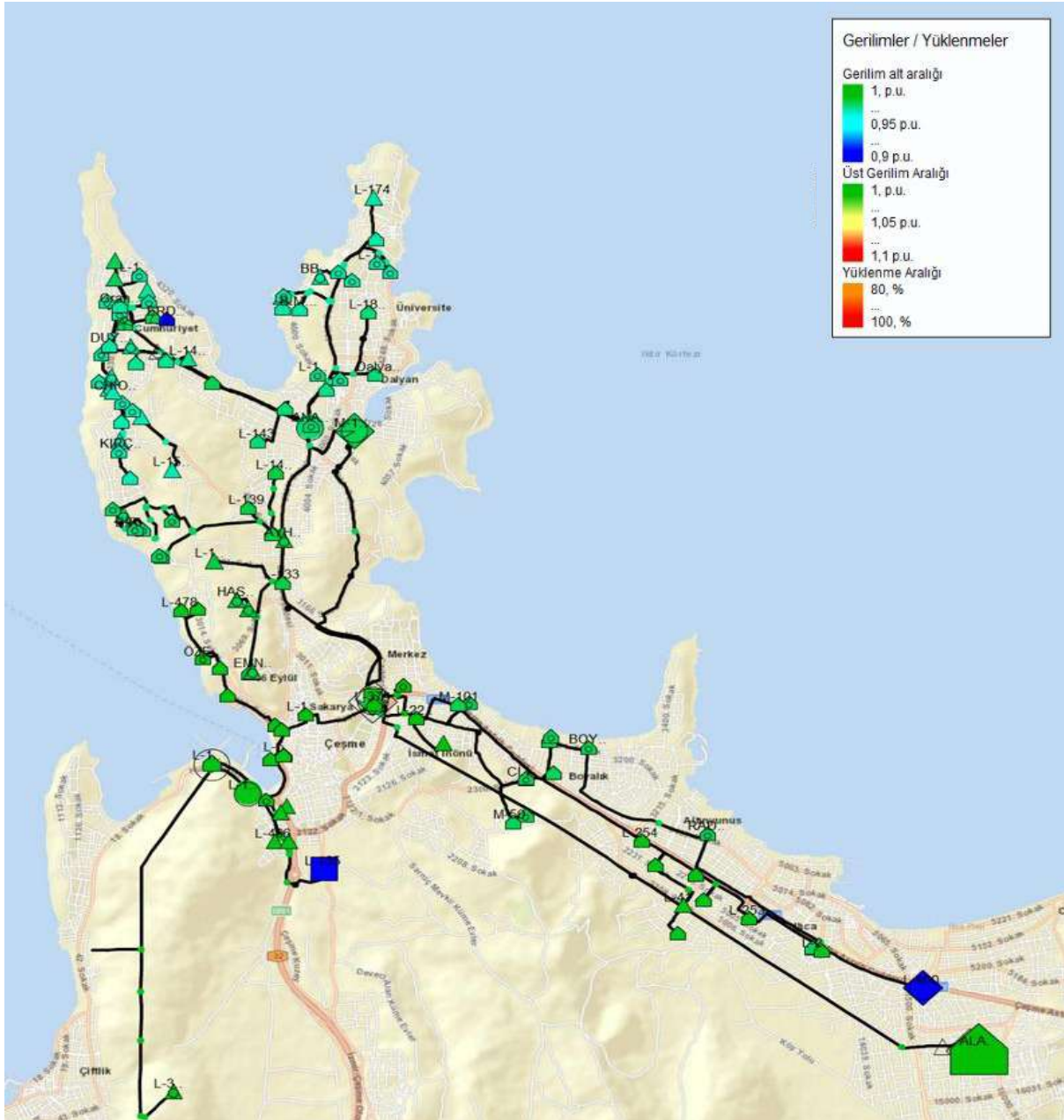
Şekil 3. Tasarımın modellendiği pilot bölge (Çeşme, Ilıca)



2.2 Modelleme ve Simülasyon

Mikro şebekenin performansını ve potansiyel faydalarını değerlendirmek için kapsamlı bir modelleme ve simülasyon çalışması gereklidir. Bu çalışmada, DIGSILENT PowerFactory gibi bir mühendislik yazılımı kullanılarak mikro şebeke ve şebeke modelleri geliştirilmiş ve aşağıda detaylandırılmış senaryolar altında simüle edilmiştir.

Şekil 4. Pilot bölgedeki gerilim düşümü



2.3 Mikro Şebeke Kurgusu Senaryoları

Çalışmada, Çeşme-Ilıca bölgesine odaklanan bir elektrik dağıtım modeli geliştirilmiştir. Pilot fider olarak Alaçatı TM'den çıkan Çeşme-2 fideri seçilmiş ve modelleme çalışmaları bu fider üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model üzerinde çeşitli simülasyonlar yapılarak, bölgedeki elektrik dağıtımının etkinliği ve verimliliği analiz edilmiştir. Aşağıdaki şekilde odaklanılan pilot bölge gösterilmiştir.

Senaryo 1

Kurgulanan ilk senaryoda, mevcut elektrik dağıtım şebekesinin güncel durumunu kapsamaktadır. Şebeke, pilot fidere bağlı özel otellere ait trafo merkezleri, 2 adet elektrikli araç şarj istasyonu ve genel yüklerden oluşmaktadır. 2023 yılının ağustos ayında, mevcut şebekenin yarı dinamik simülasyonu çalıştırılmış ve analiz edilmiştir.

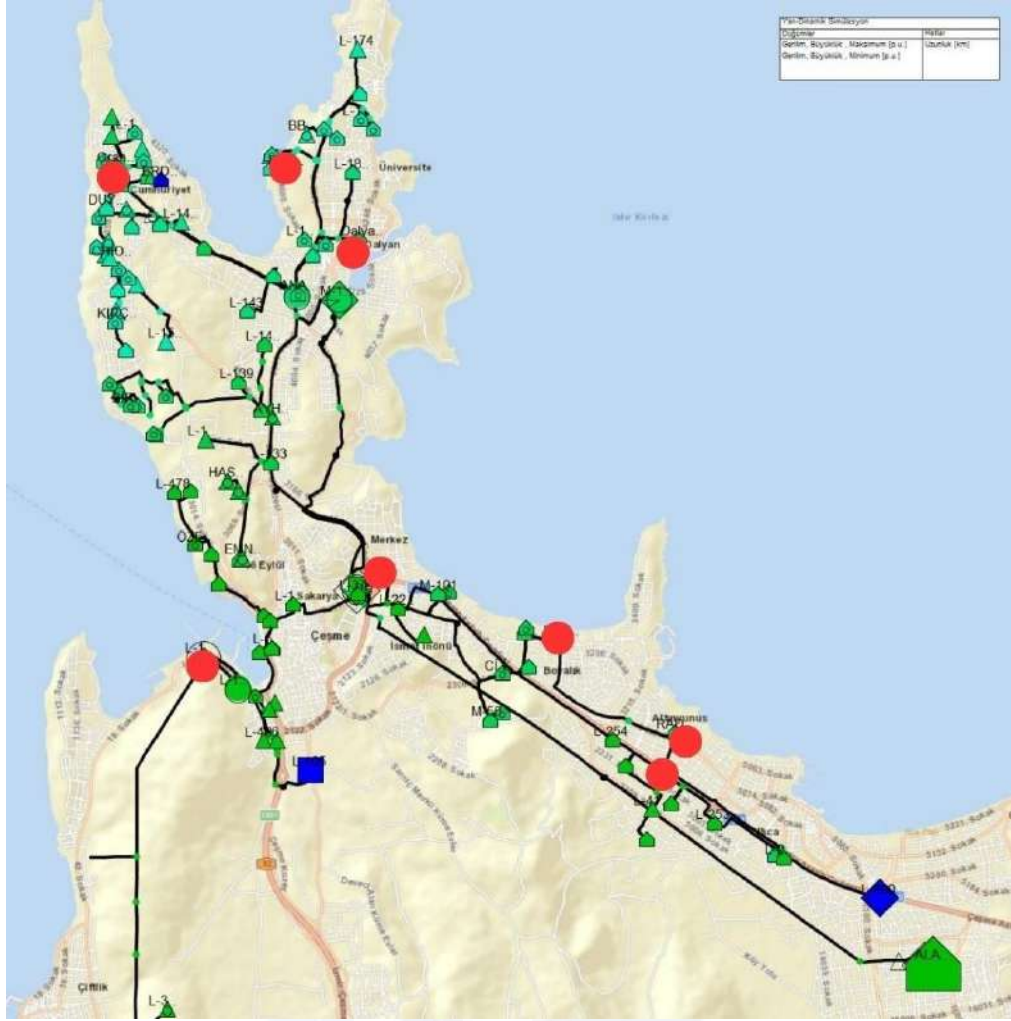
Şekil 5. Mevcut şebeke analizi



Senaryo 2

Bu senaryo, mevcut dağıtım şebekesine yakın gelecekte kurulumu planlanan 9 adet elektrikli araç şarj istasyonunun entegrasyonunu içermektedir. Şarj istasyonları aşağıda konumları kırmızı renkli ikon ile belirtilen trafo merkezlerinin içerisine modellenmiştir. Her bir şarj istasyonunun ortalama gücü 180 kW olarak belirlenmiştir. Bu istasyonlar, mevcut veya yeni modellenmiş trafo merkezlerine entegre edilmiştir. Modellenen senaryo, 2023 yılı Ağustos ayı için yarı dinamik simülasyon ile analiz edilmiştir.

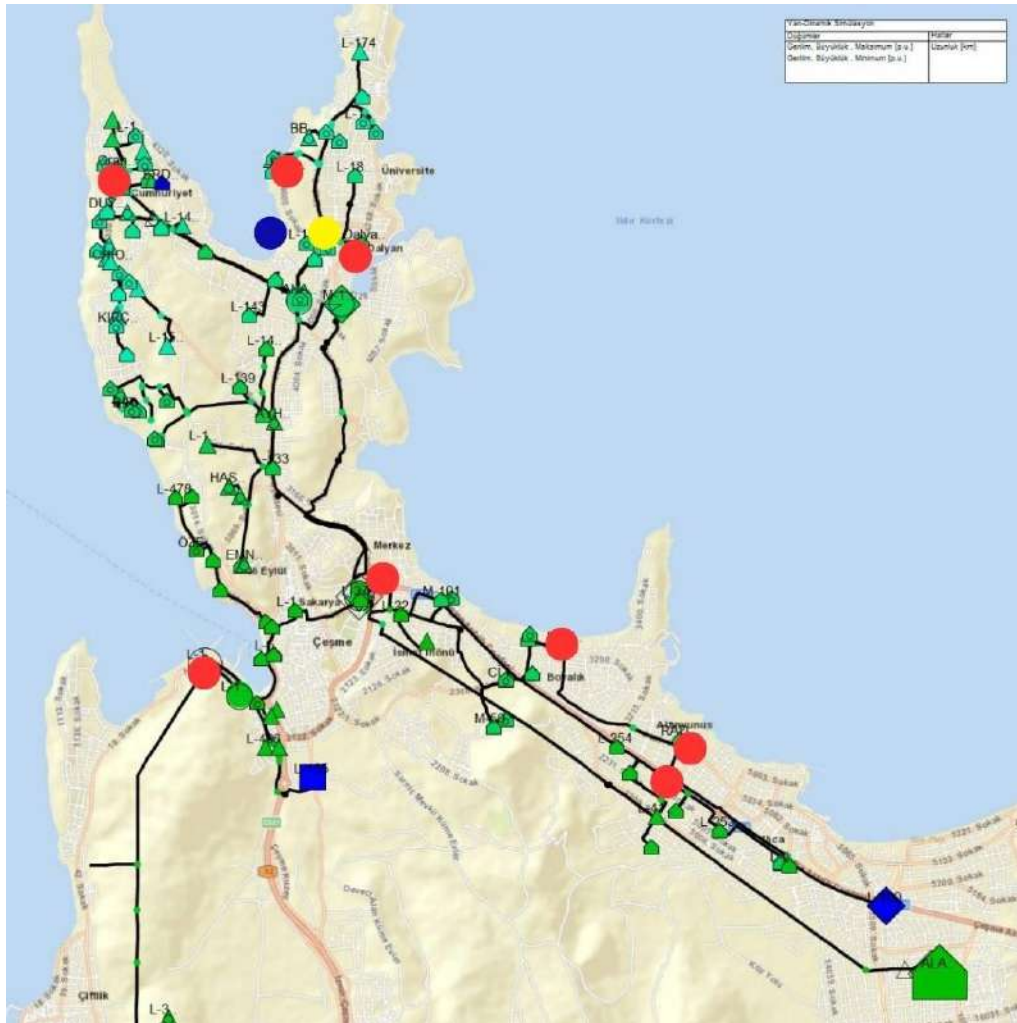
Şekil 6. Elektrikli araç şarj istasyonlarının şebekeye entegrasyonu



Senaryo 3

Bu senaryoda, bir önceki elektrikli araç şarj istasyonları modellenmiş senaryosuna ek olarak, 1 MW kurulu güce sahip bir güneş enerjisi santrali (GES) ve 1 MW kapasiteli bir enerji depolama sisteminin entegrasyonu yer almaktadır. Güneş enerji santrali (GES) ve enerji depolama sisteminin konumları Şekil 7.'de sırasıyla sarı ve mavi renkte ikonlar ile belirtilmiştir. Depolama sistemi, GES tarafından üretilen enerjiyi zamanlayarak depolayacak ve bu enerjiyi tüketimin en yoğun olduğu saatlerde şebekeyi besleyerek yük dengelemesi sağlayacaktır. Ayrıca, enerji üretimi fazla olduğunda depolama sistemi enerjiyi depolayarak gelecekteki ihtiyaçlar için hazır tutacaktır. Ağustos (2023) ayında çalıştırılan yarı dinamik simülasyonlar, bu entegre sistemlerin şebeke performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7. Yenilenebilir enerji kaynağı ve enerji depolama sisteminin entegrasyonu



BULGULAR

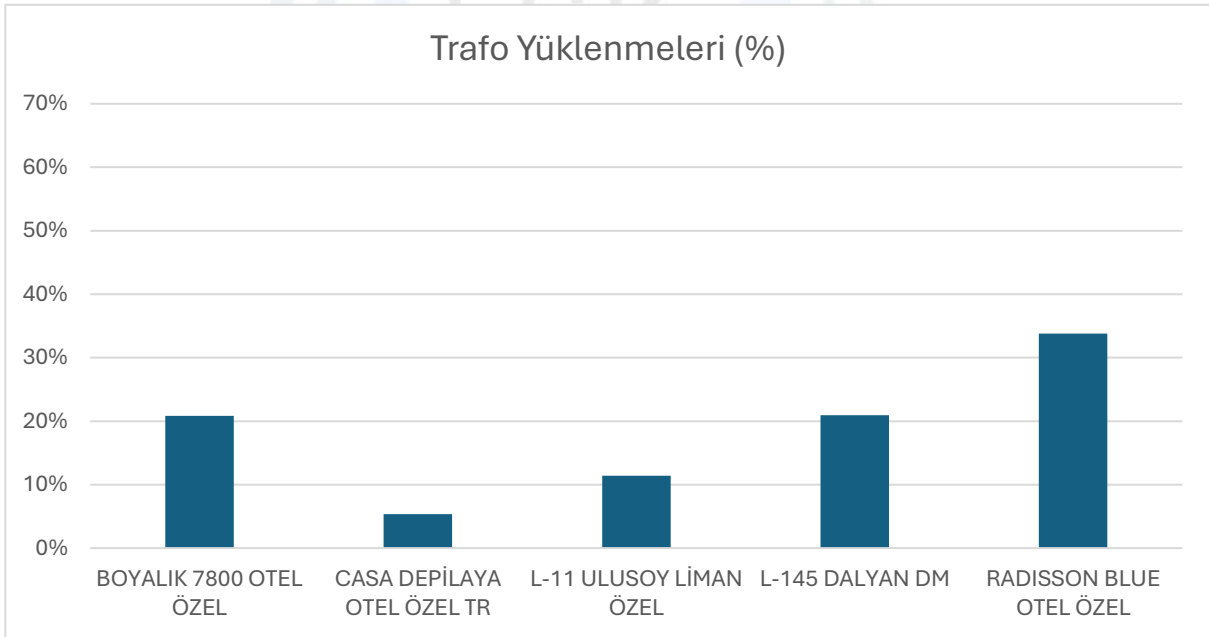
Bu bölümde, Çeşme-Ilica bölgesinde gerçekleştirilen mikro şebeke projesinin simülasyon ve modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Proje kapsamında geliştirilen senaryolar aracılığıyla mevcut şebeke durumu, elektrikli araç şarj istasyonlarının entegrasyonu ve yenilenebilir enerji kaynağı ile enerji depolama sisteminin etkileri incelenmiştir. DiGSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen bu kapsamlı simülasyonlar, mikro şebeke yapısının ve bileşenlerinin performansını, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Senaryoların karşılaştırmalı analizi, fider ve trafo yüklenmeleri üzerindeki etkilerini, enerji tedarik güvenilirliğini ve sistem esnekliğini ortaya koyarak, bölgedeki enerji yönetiminde stratejik kararların alınmasına olanak tanımaktadır. Senaryolara ilişkin elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde ayrıntılı olarak incelenmiş ve grafiksel verilerle desteklenmiştir.

Senaryo 1: Mevcut Şebeke Analizi Senaryosu

Çeşme Ilıca bölgesinde bulunan 5 adet otele ait özel trafolar ve 2 adet elektrikli araç şarj istasyonu ile genel yükleri kapsayan elektrik şebekesi, DIGSILENT PF analiz yazılımı kullanılarak detaylı bir şekilde modelleme yapılmış ve ağustos ayında yarı dinamik simülasyon ile analiz edilmiştir. Bu süreçte, trafo yüklenmeleri ile Çeşme-2 fiderinin yük verileri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler aşağıdaki tablo ve grafiklerde detaylı olarak sunulmuştur:

Tablo 1. Trafo Doluluk Oranları

| Trafo Adı | Trafo Yüklenmeleri (%) |
|----------------------------|------------------------|
| BOYALIK 7800 OTEL ÖZEL TR | 20,82 |
| CASA DE PLAYA OTEL ÖZEL TR | 5,35 |
| L-11 ULUSOY LİMAN ÖZEL TR | 11,38 |
| L-145 DALYAN DM | 20,94 |
| RADISSON BLUE OTEL ÖZEL TR | 33,82 |

Şekil 8. Trafo Yüklenmeleri**Tablo 2. Fider Yüklenmesi**

| Fider Adı | Aktif Güç (MW) | Enerji (MWh) | Ortalama Yüklenme (%) |
|-----------------------|----------------|--------------|-----------------------|
| ALAÇATI TM ÇEŞME-2 | 12,8 | 8.470,514 | 58,6 |

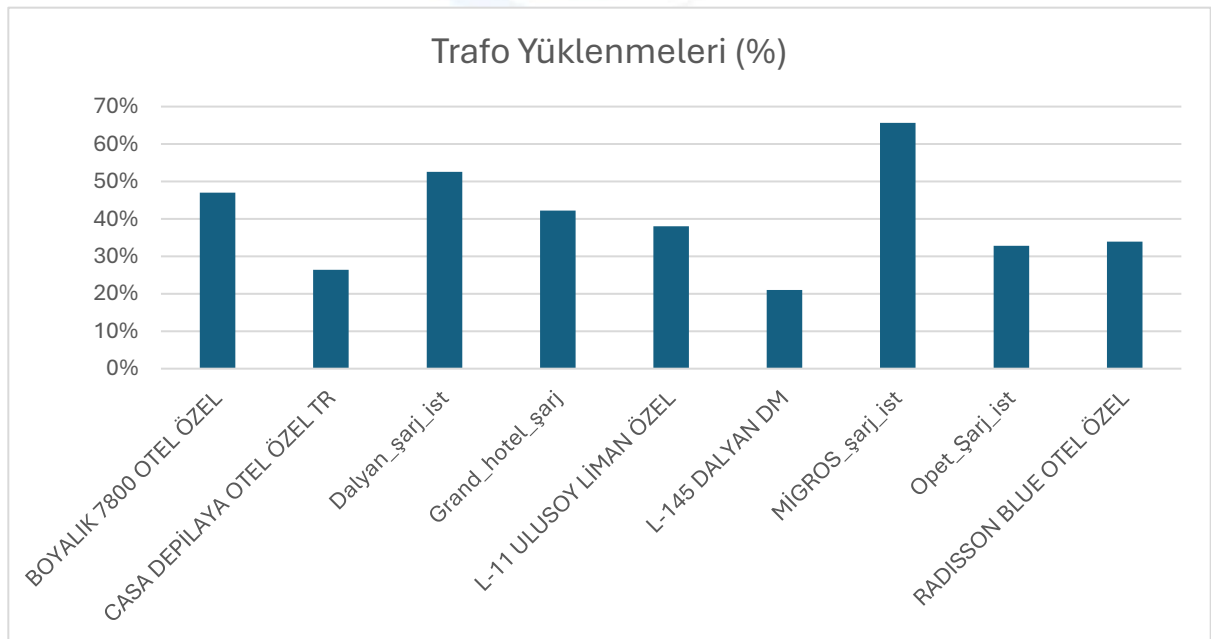
Senaryo 2: Elektrikli Araç Şarj İstasyonları Entegrasyon Senaryosu

Bu senaryoda, 11 adet ortalama 180 kW gücündeki elektrikli araç şarj istasyonu, elektrik şebekesi modelinde detaylı olarak simüle edilmiştir. Şarj istasyonları, mevcut trafo merkezlerine entegre edilmiş veya yeni trafo merkezleri oluşturularak bu modellemeye dahil edilmiştir. Modelin son hali, yarı dinamik simülasyon yöntemiyle Ağustos ayı için çalıştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, yakın gelecekte planlanan şarj istasyonlarının şebeke trafolarında 10% ile 30% arasında, Çeşme-2 fiderinde ise yaklaşık 5% oranında yük artışına sebep olacağı hesaplanmıştır. Bu artışlar, elektrik şebekesinde gerilim düşümlerine ve aşırı ısınmalara neden olarak ekipman ömrünü kısaltabilir ve kesintilere neden olabilir. Elde edilen sonuçlar, aşağıda yer alan tablo ve grafiklerle görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Trafo Doluluk Oranları

| Trafo Adı | Trafo Yüklenmeleri (%) |
|----------------------------|------------------------|
| BOYALIK 7800 OTEL ÖZEL | 46,98 |
| CASA DEPİLAYA OTEL ÖZEL TR | 26,41 |
| DALYAN ŞARJ İST | 52,59 |
| GRAND HOTEL ŞARJ | 42,25 |
| L-11 ULUSOY LİMAN ÖZEL | 38,05 |
| L-145 DALYAN DM | 21 |
| MİGROS ŞARJ İST | 65,65 |
| OPET ŞARJ İST | 32,84 |
| RADISSON BLUE OTEL ÖZEL | 33,9 |

Şekil 9. Trafo Yüklenmeleri



Tablo 4. Fider Yüklenmesi

| Fider Adı | Aktif Güç (MW) | Enerji (MWh) | Ortalama Yüklenme (%) |
|-----------------------|----------------|--------------|-----------------------|
| ALAÇATI TM_ÇEŞME-2 | 14,5541 | 9114,914 | 63,3 |

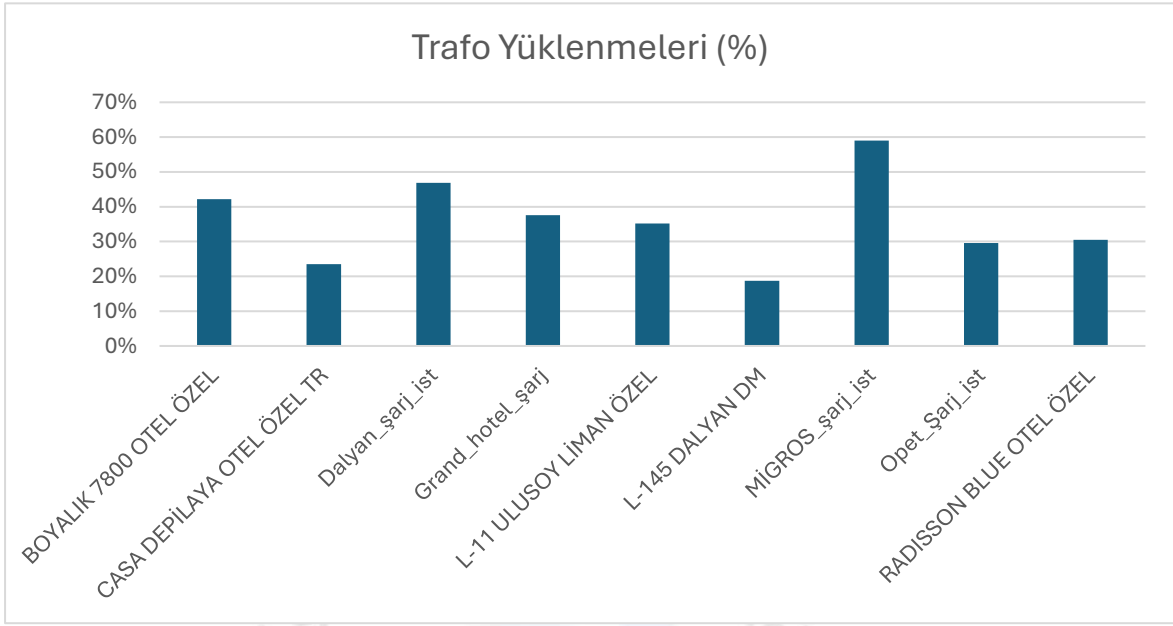
Senaryo 3: Yenilenebilir Enerji ve Depolama Entegrasyon Senaryosu

Bu senaryoda, modelimize 1 MW gücünde Güneş Enerjisi Santrali (GES) ve 1 MW kapasiteli batarya sistemi entegre edilmiştir. Model, ağustos ayında yarı dinamik simülasyon yöntemiyle aylık olarak çalıştırılmış ve elde edilen çıktılar kaydedilmiştir. Bir önceki senaryoya kıyasla, trafo merkezlerinde ortalama yaklaşık 10% ve Çeşme-2 fiderinde ise yaklaşık 5% oranında yüklenme azalması gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, şebeke üzerindeki gerilim düşümlerinin ve aşırı ısınmaların azaltılmasına yardımcı olabilir, böylece ekipman ömrü uzatılarak kesinti riskleri düşürülebilir. Analiz sonuçları, aşağıda yer alan tablo ve grafiklerle detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Trafo Doluluk Oranları

| Trafo Adı | Trafo Yüklenmeleri (%) |
|----------------------------|------------------------|
| BOYALIK 7800 OTEL ÖZEL TR | 42,18 |
| CASA DEPİLAYA OTEL ÖZEL TR | 23,51 |
| DALYAN ŞARJ İST | 46,82 |
| GRAND HOTEL ŞARJ | 37,59 |
| L-11 ULUSOY LİMAN ÖZEL | 35,23 |
| L-145 DALYAN DM | 18,72 |
| MİGROS ŞARJ İST | 59,02 |
| OPET ŞARJ İST | 29,53 |
| RADISSON BLUE OTEL ÖZEL | 30,45 |

Şekil 10. Trafo Yüklenmeleri



Tablo 6. Fider Yüklenmesi

| Fider Adı | Aktif Güç (MW) | Enerji (MWh) | Ortalama Yüklenme (%) |
|-----------------------|----------------|--------------|-----------------------|
| ALAÇATI TM_ÇEŞME-2 | 13,551 | 8.875.594 | 58,9 |

TARTIŞMA

4.1 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

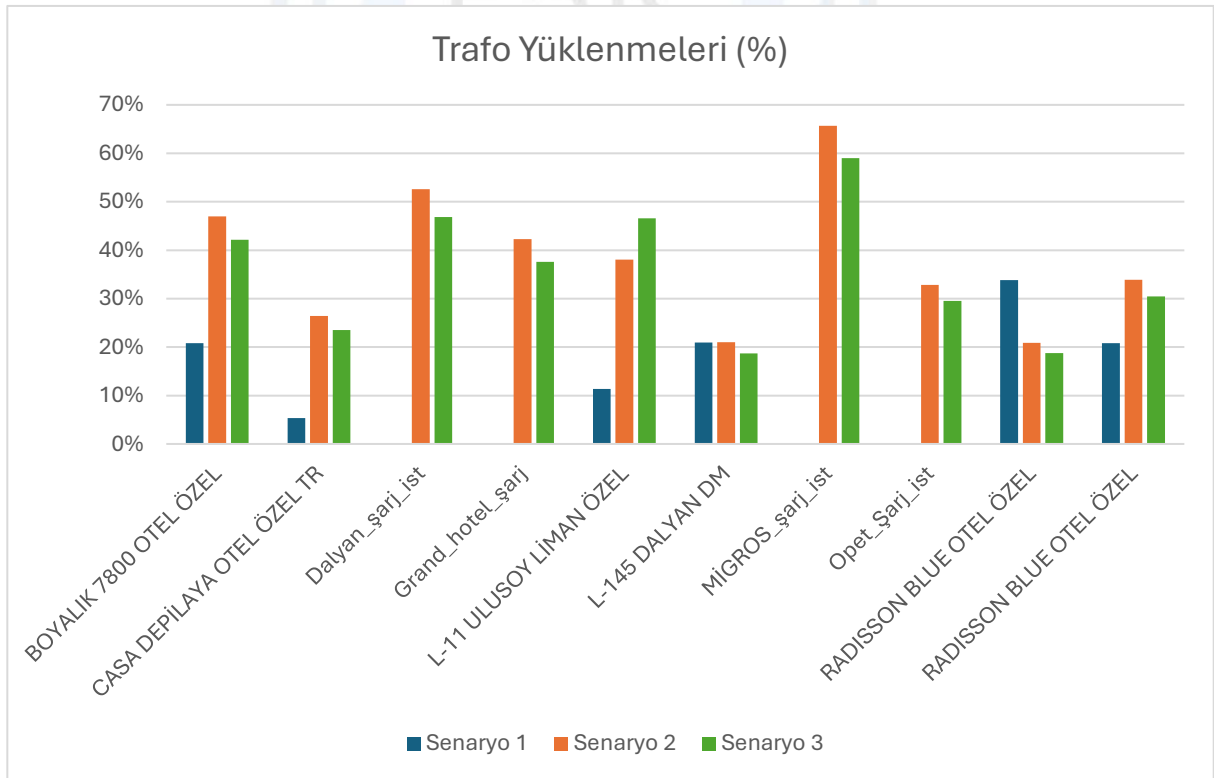
Bu bölümde, raporda incelenen üç senaryonun simülasyon sonuçlarının grafiksel karşılaştırmaları sunulmaktadır. Grafikler, her senaryonun trafo ve fider yüklemeleri üzerindeki etkilerini görsel olarak karşılaştırmak için hazırlanmıştır. Aşağıda yer alan grafikler, mevcut durum senaryosu, elektrikli araç şarj istasyonlarının entegrasyonu ve güneş enerjisi santrali (GES) ve batarya sistemlerinin entegrasyonu senaryolarının sonuçlarını içermektedir. Grafikler, her bir senaryonun trafo yüklenmeleri ve fider yüklenmeleri üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koyarak, enerji yönetiminde gelecekte yapılacak optimizasyonlar için önemli veriler sağlamaktadır.

Tablo ve grafiklerde, şebeke üzerindeki yüklenme değişimlerinin ve bu değişimlerin şebeke performansına olan etkilerinin ayrıntılı analizi sunulmuştur.

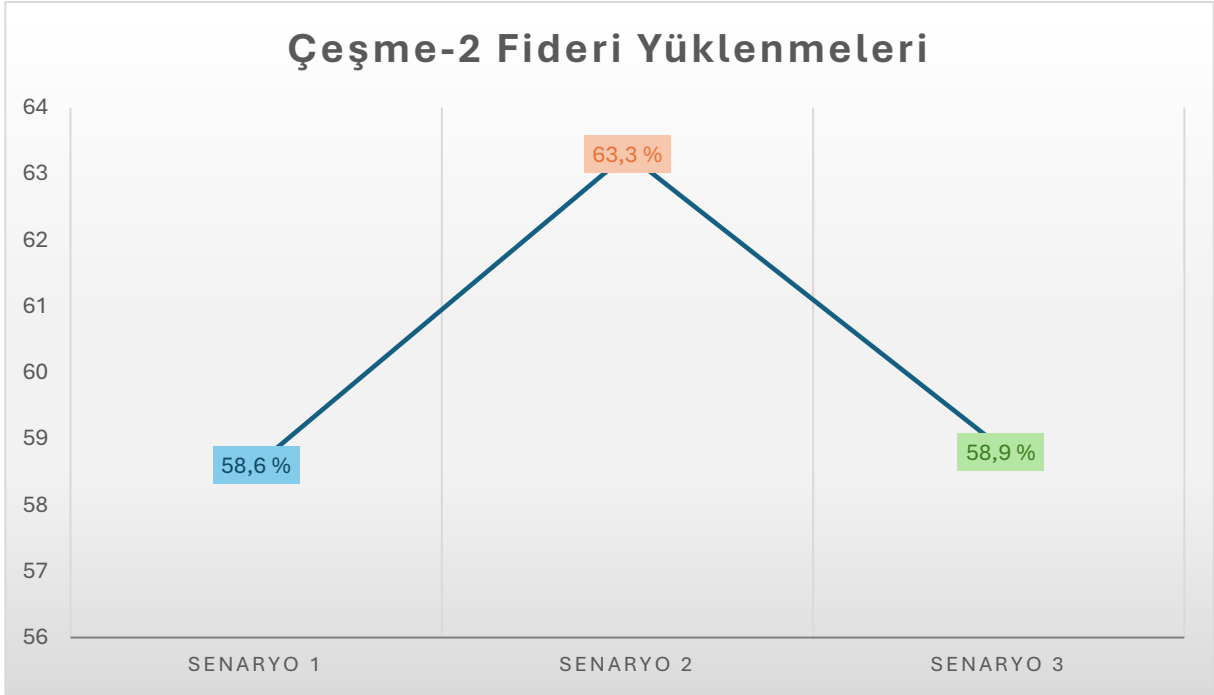
Tablo 7. Trafo Doluluk Oranları

| Trafo İsimleri | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| BOYALIK 7800 OTEL ÖZEL TR | 20,82 | 46,98 | 42,18 |
| CASA DEPİLAYA ÖZEL TR | 5,35 | 26,41 | 23,51 |
| DALYAN ŞARJ İST | 0,19 | 52,59 | 46,82 |
| GRAND HOTEL ŞARJ | 0,14 | 42,25 | 37,59 |
| L-11 ULUSOY LİMAN ÖZEL TR | 11,38 | 38,05 | 35,23 |
| L-145 DALYAN DM | 20,94 | 21 | 18,72 |
| MİGROS ŞARJ İST | 0,17 | 65,65 | 59,02 |
| OPET ŞARJ İST | 0,17 | 32,84 | 29,53 |
| RADISSON BLUE OTEL ÖZEL TR | 20,82 | 33,9 | 30,45 |

Şekil 11. Trafo Yüklenmelerinin Karşılaştırmalı Grafiği



Şekil 12. Fider Yüklenmelerinin Karşılaştırmalı Grafiği



SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Çeşme-Ilıca bölgesindeki enerji şebekesine yönelik çeşitli senaryoların detaylı simülasyonları gerçekleştirilmiş ve bu senaryoların şebeke üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. İlk senaryoda mevcut şebeke yapısı değerlendirilmiş, ikinci senaryoda elektrikli araç şarj istasyonlarının entegrasyonu, üçüncü senaryoda ise güneş enerjisi santrali (GES) ve batarya sistemlerinin entegrasyonu incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, elektrikli araç şarj istasyonlarının transformatör ve fider yüklemelerinde belirgin artışlara neden olduğunu göstermiştir. Bu artışlar, şebeke üzerindeki gerilim düşümleri ve ekipman ömrünün kısılması gibi sorunlara yol açabilmektedir. Buna karşılık, GES ve batarya sistemlerinin entegrasyonu, trafo yüklemelerinde ve fider yüklemelerinde önemli azalmalar sağlayarak şebeke esnekliğini artırmış ve enerji kalitesini iyileştirmiştir.

Ele alınan farklı senaryoların bilimsel çıktıları değerlendirildiğinde; mikro-şebeke ve enerji depolama sistemlerinin birçok avantaj sunduğu, ancak bazı dezavantajlar da barındırdığı görülmektedir. Kritik kesintilere hızlı müdahale kapasitesi ve teknik kayıpların azalması, bu sistemlerin öne çıkan avantajları arasında yer almaktadır. Özellikle enerji depolama sistemleri sayesinde şebeke esnekliği sağlanmakta ve gelecekteki yenilenebilir enerji projeksiyonları göz önüne alındığında, bu sistemlerin stratejik bir yatırım olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak, bataryaların sınırlı ömrü ve yüksek maliyetler, uzun vadede sürdürülebilirliği zorlaştırabilir. Ayrıca, mikro-şebeke entegrasyonunun getirdiği yönetim

karmaşıklıkları ve arazi gereksinimleri, özellikle yoğun yerleşim bölgelerinde önemli zorluklar oluşturabilmektedir.

Gelecekte, şebeke esnekliğini artırmak ve enerji yönetiminde sürdürülebilirliği sağlamak adına, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunun devam etmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu tür teknolojik entegrasyonlar, enerji talebindeki dalgalanmaları daha etkin bir şekilde yönetme ve enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, sürekli izleme ve optimizasyon sistemlerinin kullanımı, şebeke performansını daha da iyileştirerek enerji güvenliğini sağlamada önemli bir rol oynayacaktır. Enerji sektöründeki bu tür yenilikçi yaklaşımlar hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

[1]. (Peng Li, Ling Zhang ve Yinbo Sheng, "Şebeke-Mikro Şebekeye bağlı büyük ölçekli yenilenebilir enerji enerji üretimi için etkili bir yol", Kuzey Çin Elektrik Enerjisi Üniversitesi Dergisi (Doğal Bilim Sürümü) , cilt. 01, s. 10-14, 2009.)

[2]. (The role of microgrids in helping to advance the nation's energy system, ENERGY.GOV, <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid/role-microgrids-helping>)

[3]. Fu, Q., Montoya, L.F., Solanki A., Nasiri, A., Bhavaraju, V., Abdallah, T. ve Yu D.C., "Microgrid Generation Capacity Design With Renewables And Energy Storage Addressing Power Quality And Surety", IEEE Transactions On Smart Grid, 3, 2019-2027, 2012.

[4]. Junga, J., Villaran, M., "Optimal Planning And Design Of Hybrid Renewable Energy Systems For Microgrids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 180- 191, 2017.

[5]. Donnellan B.J., Vowles D.J., Soong W.L., A Review of Energy Storage and its Application in Power Systems, IEEE Power Engineering Conference (AUPEC), DOI:10.1109/UPEC.2015.7339794, 1-6, 2015.

[6]. B. Kocaman, "Mikro Şebekeler için Örnek Bir Enerji Yönetimi Uygulaması", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 3, sy. 1, ss. 35-52, 2014, doi: 10.17798/beufen.05193.

[7]. S. Karimi-Arpanahi, M. Jooshaki, M. Moeini-Aghtaei, A. Abbaspour ve M. Fotuhi-Firuzabad, "A Flexibility-Oriented Model for Distribution System Expansion Planning Studies," 2019 27. İran Elektrik Mühendisliği Konferansı (ICEE) , Yazd, İran, 2019, s. 737-741, doi: 10.1109/IranianCEE.2019.8786398.

- [8]. Ahmaad F., Iqbal A., Ashraf I., Marzband M., Khan I., 2022. Placement of Electric Vehicle Fast Charging Stations using Grey Wolf Optimization in Electrical Distribution Network. 2022 IEEE International Conference on PowerElectronics, Smart Grid, and Renewable Energy
- [9]. Nafi Mahmud I., Tabassum S., Hassan Rafid Q., Abid F., 2022. Effect of Electric Vehicle Fast Charging Station on Residential Distribution Network in Bangladesh. IEEE 2021 2021 5th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) Military Institute of Science and Technology (MIST), Dhaka-1216, Bangladesh
- [10]. Ucer, E., Kisacikoglu, M. C., & Cafer Gurbuz, A. (2018). Learning EV Integration Impact on a Low Voltage Distribution Grid. In: Proceedings of the 2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5. doi:10.1109/PESGM.2018.8586208
- [11]. Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S., & Tan, C. W. (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid Integration: A technological review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120, Article 109618. <https://doi:10.1016/j.rser.2019.109618>
- [12]. Liu Yanping, Li Xin, Liang Yi, Shunqi Zeng, 2021. Assessment of Impacts on Integration of Disorderly EV Charging Load to Flexible Distribution Network. 2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering
- [13]. Araujo A., Araujo D., Vasconcelos A., Rosas P., Medeiros L., Conceicao J., 2021. A Proposal for Technical and Economic Sizing of Energy Storage System and PV for EV Charger Stations with Reduced Impacts on the Distribution Network. CIRED 2021 Conference.
- [14]. Staats, P. T., Grady, W. M., Arapostathis, A., & Thallam, R. S., 1997. A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers. IEEE Transactions on Power Delivery, 12(3), 1258-1266.
- [15]. Bass, R., Harley, R., Lambert, F., Rajasekaran, V., & Pierce, J., 2001. Residential harmonic loads and EV charging. In: Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Volume 3, 803-808.
- [16]. Wang Lu;Wan Youhong;Weitao Cao;Chunxia Fan, 2019. Chinese Automation Congress (CAC). Optimizing Strategy of Spatial Orderly Charging for EVs Based on Complex Network Theory.

123: Akıllı Şebekelere Yönelik Saldırı Tespit Sistemi

Hamdullah Karamollaoğlu, Mustafa Taşar, Yusuf Ziya Arıcan
EÜAŞ, EYS ve Eğitim Daire Başkanlığı, Kumburgaz Eğitim Müdürlüğü

ÖZET

Geleneksel güç ağlarının akıllı şebekelerle bütünleştirilmesi, şebekelerin etkinliğini artırmış, ancak aynı zamanda siber saldırılara karşı savunmasız hale gelmelerine yol açmıştır. Bu zayıflıklar, ağ bütünlüğünün ihlal edilmesine ve izinsiz erişime olanak tanırken, akıllı şebekelerin yüksek oranda bilgi ve iletişim teknolojilerine olan bağımlılığı çeşitli güvenlik ve gizlilik endişelerini de beraberinde getirmiştir. Hassas verilere izinsiz erişim, donanım yazılımının ele geçirilmesi ve veri manipülasyonu gibi bu endişeler, akıllı şebekelerin güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle, bu tür tehditlerin erken ve doğru bir şekilde tespit edilmesi önem arz etmektedir. Derin öğrenme yöntemleri, büyük veri setlerinde karmaşık ilişkileri öğrenebilme yeteneğiyle öne çıkarmakta ve bu özellik siber güvenlikte saldırı tespiti için potansiyel bir avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada, akıllı şebekelere yönelik potansiyel saldırıların tespiti için Evrişimli Sinir Ağı-Geçitli Tekrarlayan Birim (CNN-GRU) hibrit derin öğrenme yöntemiyle geliştirilmiş bir saldırı tespit sistemi (STS) önerilmektedir. Önerilen STS, saldırı tespitindeki çoğunluk sınıfına doğru olan tahmin yanlılığını azaltmak için ADASYN (Uyarlanabilir Sentetik Örneklem Yöntemi) gibi veri dengesini sağlayan yöntemlerle birlikte kullanılmıştır. Ayrıca, özneliklerin azaltılması için PCA (Temel Bileşen Analizi) kullanılarak, derin öğrenme modelinin öğrenme aşamasındaki hesaplama maliyeti azaltılmış ve aşırı uydurmanın (overfitting) önlenmesi sağlanmıştır. Önerilen STS modelinin performansı, akıllı şebeke sistemlerine yönelik dokuz farklı saldırı türünü içeren UNSW-NB-15 veri seti üzerinde test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, saldırı sınıflandırmasında ortalama %91,51'lik doğruluk elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: akıllı şebeke, derin öğrenme, öznelik indirgeme, veri dengeleme, saldırı tespit sistemi

GİRİŞ

Akıllı şebeke, geleneksel elektrik şebekelerine ek olarak bilgi ve iletişim teknolojilerinin (ICT) entegrasyonu ile daha dinamik ve esnek bir yapı sunan enerji sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu şebekelerde, çift yönlü iletişim ve gelişmiş sensör teknolojileri kullanılmaktadır ve enerji arz ve talebini daha etkin bir şekilde yönetmektedir. Akıllı şebekelerin üstünlükleri arasında enerji verimliliği, güvenlik, çevre dostu özellikler ve esneklik bulunmaktadır. Akıllı şebekeler, enerji kayıplarını minimize ederek enerji verimliliğini artırmaktadır.

Gelişmiş güvenlik önlemleri ile enerji altyapısının güvenliği sağlanmaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile çevre dostu bir enerji yönetimi sunulmaktadır. Ayrıca, enerji talep ve arz dengesini dinamik olarak yöneterek esnek bir yapı sunulmaktadır. Geleneksel şebekelerden farklı olarak, çift yönlü iletişim imkanı sunulmakta ve gelişmiş sensörler ile enerji tüketimi ve üretimi anlık olarak izlenebilmektedir. Bilgi ve iletişim teknolojileri ile entegre çalışarak daha etkin bir enerji yönetimi sağlanmaktadır [1-3]. Akıllı şebekelerde kullanılan yapılar arasında akıllı sayaçlar, gelişmiş dağıtım yönetim sistemleri (ADMS), yenilenebilir enerji entegrasyon sistemleri ve enerji depolama sistemleri bulunmaktadır. Akıllı sayaçlar, enerji tüketimini gerçek zamanlı olarak izlemekte ve raporlamaktadır. Gelişmiş dağıtım yönetim sistemleri, enerji dağıtımını optimize etmekte ve arızaları hızlı bir şekilde tespit etmektedir. Yenilenebilir enerji entegrasyon sistemleri, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlamaktadır. Enerji depolama sistemleri, enerji talep ve arz dengesini sağlamak için enerjiyi depolamakta ve gerektiğinde kullanıma sunmaktadır [4, 5].

Akıllı şebekelerde karşılaşılan güvenlik sorunları arasında siber saldırılar, veri gizliliği ve fiziksel saldırılar bulunmaktadır. Akıllı şebekeler, bilgi ve iletişim teknolojileri kullanıldığı için siber saldırılara karşı savunmasızdır. Tüketici verilerinin güvenliği ve gizliliği önemli bir endişe kaynağıdır. Enerji altyapısına yönelik fiziksel saldırılar, hizmet kesintilerine yol açabilmektedir. Bu güvenlik sorunlarını çözmek için çeşitli STS kullanılmaktadır. Bu sistemler, şebeke içindeki anormal aktiviteleri tespit ederek olası tehditlere karşı önlem almaktadır. Kullanılan bazı yaygın yöntemler arasında anomali tabanlı tespit, imza tabanlı tespit ve makine öğrenimi tabanlı yaklaşımlar bulunmaktadır. Anomali tabanlı tespit, normal şebeke davranışını öğrenerek anormal aktiviteleri tespit etmektedir. İmza tabanlı tespit, bilinen saldırı imzalarını kullanarak tanınmış tehditleri tespit etmektedir. Akıllı şebekelerin güvenliği için bu tespit sistemlerinin sürekli güncellenmesi ve yeni tehditlere karşı adaptasyonu büyük önem taşımaktadır [6-8]. Bu sistemlerin etkinliği, şebekenin genel güvenlik seviyesini belirleyen kritik bir faktör olmaktadır. Bu çalışmada hibrit derin öğrenme yaklaşımlarından Evrişimli Sinir Ağı-Geçitli Tekrarlayan Birim (CNN-GRU) yöntemi kullanılarak Akıllı şebekelere yönelik bir STS geliştirilmiştir.

LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Saldırı Tespit Sistemleri'nin (STS) geliştirilmesinde sıklıkla makine öğrenmesi (MÖ) ve derin öğrenme (DÖ) tekniklerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca sınıflandırma aşamalarından önce veri dengeleme ve öznitelik indirgeme yöntemlerinin MÖ ve DÖ teknikleriyle birlikte kullanımı STS modellerinin performansını artırmaktadır.

Ullah ve ark. [9], dizüstü bilgisayarlar, tabletler ve akıllı telefonlardan oluşan bir akıllı ev ağının trafiğini izleyerek oluşturulan IoTID20 veri setini incelemiştir. Bu dengesiz veri seti, SMOTE ve ADASYN yöntemleri kullanılarak dengeli hale getirilmiş ve bu yöntemlerle makine öğrenmesi teknikleri birleştirilerek bir STS oluşturulmuştur. Zhang ve ark. [10], UNSW-NB15 ve CIC-IDS2017 veri setlerindeki dengesiz verileri SMOTE ve GMM yöntemleriyle dengeli hale getirerek azınlık sınıfların saldırı tespit performansını artırmışlardır. Dengeli veri seti kullanılarak CNN yöntemi ile yapılan saldırı tespitinde, UNSW-NB15 için %96.54, CIC-IDS2017 için %99.85 başarı elde edilmiştir. Chen ve ark. [11], CIC-IDS2017 veri setini ADASYN yöntemi ile dengeli hale getirerek Rastgele Orman yöntemi ile %99.7 oranında bir sınıflandırma başarısı elde etmişlerdir. Soe ve ark. [12], BoT-

IoT veri setindeki dengesiz verileri SMOTE yöntemi ile dengeli hale getirerek, yapay sinir ağları (ANN) ile DDoS saldırılarını sınıflandırmışlardır. Weijinxia ve ark. [13], NSL-KDD veri setindeki dengesiz verileri I-SMOTE yöntemi ile dengeli hale getirerek Rastgele Orman algoritması ile %99.3 başarı oranı yakalamışlardır. Abdulhammed ve ark. [14], CIDDS-001 veri setini RUS ve ROS yöntemleri ile dengeli hale getirip, DNN ile %94.27 (ROS+DNN) ve %99.30 (RUS+DNN) başarı elde etmişlerdir. Li ve ark. [15], UNSW-NB15 veri setini ADASYN yöntemi ile dengeli hale getirerek, ID3 algoritması ile %93.18 oranında başarı sağlamışlardır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, STS için kullanılan veri setlerinin çoğunun dengesiz veri dağılımına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu dengesizliği gidermek için en yaygın kullanılan yöntemler SMOTE, ADASYN, RUS ve ROS'tur. Bu yöntemlerle birlikte STS'lerin tasarımında sıklıkla makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı görülmektedir.

MATERYAL, METOT ve DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Çalışmada Kullanılan Veriseti

Çalışmada önerilen STS'nin eğitim ve test aşamalarında UNSW-NB15 verisetinden yararlanılmıştır. UNSW-NB15 veri seti, siber güvenlik alanında yaygın olarak kullanılan bir veri setidir ve saldırı tespiti ile siber tehdit analizi gibi çalışmalarda kullanılmaktadır. Veri seti, siber güvenlik laboratuvarı ortamında çeşitli ağ saldırıları ve normal trafik oluşturularak toplanmıştır. Veri setinde 49 özellik bulunmaktadır. Bu özellikler, ağ trafiği analizinde önemli olan bilgileri içermektedir. Özellikler arasında paket boyutu, protokol türü, bağlantı süresi, kaynak ve hedef IP adresleri gibi bilgiler yer almaktadır [16]. UNSW-NB15 verisetine ait saldırı sınıfları ve örnek sayıları Tablo 1'de görüldüğü gibidir.

Tablo 1. UNSW-NB15 verisetine ilişkin sınıflar ve örnek sayıları

| Sınıf | Eğitim Verisi | Test Verisi | Genel Toplam |
|----------|---------------|-------------|--------------|
| Normal | 56000 | 37000 | 93000 |
| Generic | 40000 | 18871 | 58871 |
| Exploits | 33393 | 11132 | 44525 |
| Fuzzers | 18184 | 6062 | 24246 |

| | | | |
|----------------|-------|------|-------|
| DoS | 12264 | 4089 | 16353 |
| Reconnaissance | 10491 | 3496 | 13987 |
| Analysis | 2000 | 677 | 2677 |
| Backdoor | 1746 | 583 | 2329 |
| Shellcode | 1133 | 378 | 1511 |
| Worms | 130 | 44 | 174 |

Tablo 1’de görüldüğü gibi UNSW-NB15 veriseti bir adet Normal ve 9 adet farklı saldırı türünden oluşmaktadır. Bu saldırı türleri DoS (Denial of Service), Fuzzers, Analysis, Backdoors, Exploits, Generic, Reconnaissance, Shellcode ve Worms’dur.

3.2. Önerilen Yöntemler ve Deneysel Çalışma

3.2.1. Temel Bileşen Analizi (PCA)

Temel Bileşen Analizi (PCA), veri setindeki değişkenler arasındaki ilişkileri analiz etmek ve bu verileri daha az sayıda bileşenle ifade etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. PCA, veri boyutunu azaltmak, gürültüyü azaltmak ve önemli bilgileri korumak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, yüksek boyutlu veri kümelerinde boyut indirgeme, veri sıkıştırma ve görselleştirme amacıyla uygulanmaktadır [17,18].

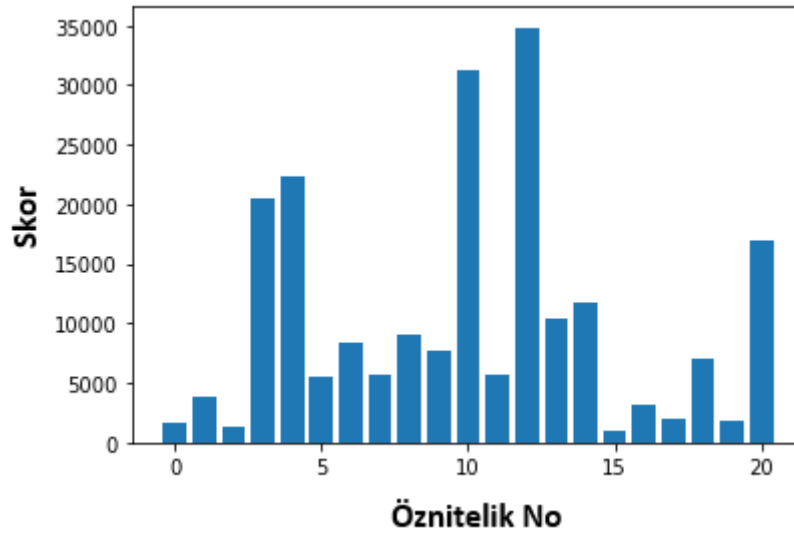
UNSW-NB15 veriseti üzerinde PCA uygulanmasının ardından verisetinde yer alan öznitelikler (etiket hariç) 48’den 21’e düşürülmüştür. Elde edilen 21 öznitelige ait önem dereceleri ANOVA F-Test kullanılarak belirlenmiştir. Bu değerlere ilişkin bilgiler Tablo 2 ve Şekil 1’de görüldüğü gibidir.

Tablo 2. PCA sonrası elde edilen öznitelikler ve önem skorları

| Öznitelik | Skor | Öznitelik | Skor |
|-------------|-------------|--------------|----------|
| Öznitelik-1 | 1664.218262 | Öznitelik-12 | 5733.773 |
| Öznitelik-2 | 3838.019043 | Öznitelik-13 | 34829.24 |

| | | | |
|--------------|-------------|--------------|----------|
| Öznitelik-3 | 1268.82312 | Öznitelik-14 | 10353.28 |
| Öznitelik-4 | 20567.6582 | Öznitelik-15 | 11699.32 |
| Öznitelik-5 | 22281.72656 | Öznitelik-16 | 972.2101 |
| Öznitelik-6 | 5572.468262 | Öznitelik-17 | 3235.448 |
| Öznitelik-7 | 8336.358398 | Öznitelik-18 | 1958.164 |
| Öznitelik-8 | 5673.622559 | Öznitelik-19 | 7106.97 |
| Öznitelik-9 | 9049.529297 | Öznitelik-20 | 1815.042 |
| Öznitelik-10 | 7655.622559 | Öznitelik-21 | 17007.87 |
| Öznitelik-11 | 31168.06836 | | |

Şekil 1. PCA sonrası elde edilen özniteliklere ait önem skorları



3.2.2. Uyarlanabilir Sentetik Örnekleme Yöntemi (ADASYN)

ADASYN, dengesiz veri kümeleriyle çalışırken kullanılan bir veri dengeleme yöntemidir. Bu yöntem, azınlık sınıflar için sentetik örnekler oluşturarak veri setini dengeli hale getirmektedir.

ADASYN, özellikle makine öğrenimi modellerinin performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. ADASYN, dengesiz veri setlerindeki azınlık sınıfların örnek sayısını artırarak dengeli bir veri seti oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu yöntem, her bir azınlık sınıfı örneği için komşularını analiz etmekte ve dengesizliğin en fazla olduğu sınıflara ağırlık vererek sentetik örnekler üretmektedir [19]. Tablo 3'te ADASYN uygulanması sonucunda verisetindeki örnek sayılarındaki değişiklik görülmektedir.

Tablo 3. ADASYN sonrası UNSW-NB15 verisetine ait sınıflar ve örnek sayıları

| Sınıf | Örnek Sayısı |
|--------------------|--------------|
| Normal (0) | 38,713 |
| Generic (1) | 38,470 |
| Exploits (2) | 37,829 |
| Fuzzers (3) | 36,023 |
| DoS (4) | 40,944 |
| Reconnaissance (5) | 38,535 |
| Analysis (6) | 38,446 |
| Backdoor (7) | 37,281 |
| Shellcode (8) | 38,250 |
| Worms (9) | 38,426 |

3.2.3. Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN)

Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN), görüntü tanıma, işleme ve sınıflandırma gibi görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. CNN'lerin temel işleyişi, konvolüsyon katmanları, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlar kullanılarak gerçekleştirilmekte ve bu katmanlar, verilerin özelliklerini çıkararak sınıflandırma yapmaktadır.

CNN'ler, konvolüsyon katmanları aracılığıyla görüntülerin yerel özelliklerini çıkarmaktadır. Bu katmanlar, filtreler kullanılarak giriş görüntüsü üzerinde kaydırılmakta ve özellik haritaları oluşturulmaktadır. Havuzlama katmanları, boyutları küçültmekte ve modelin hesaplama yükünü azaltmaktadır. Genellikle maksimum havuzlama (max pooling) veya ortalama havuzlama (average pooling) yöntemleri kullanılmaktadır. Tam bağlantılı katman ise, sınıflandırma gibi son işlemler için kullanılmakta ve genellikle bir softmax aktivasyon fonksiyonu ile sonuçlar çıkarılmaktadır [20].

3.2.4. Geçitli Tekrarlayan Birimler (GRU)

Geçitli Tekrarlayan Birimler (GRU), özellikle sıralı veri (time-series) ile ilgili problemlerde kullanılmaktadır. GRU'lar, tekrarlayan sinir ağlarının (RNN) kaybolan gradyan sorununu çözmek için tasarlanmış olup, iki temel kapı mekanizması içermektedir: güncelleme kapısı ve resetleme kapısı. Güncelleme kapısı, bir önceki gizli durumun ne kadarının yeni duruma aktarılacağını kontrol etmekte, resetleme kapısı ise önceki gizli durumun unutulması gereken kısmını belirlemektedir. Bu mekanizmalar, modelin daha uzun süreli bağımlılıkları öğrenmesini sağlamaktadır [21].

3.2.5. CNN ve GRU Hibrit Modeli

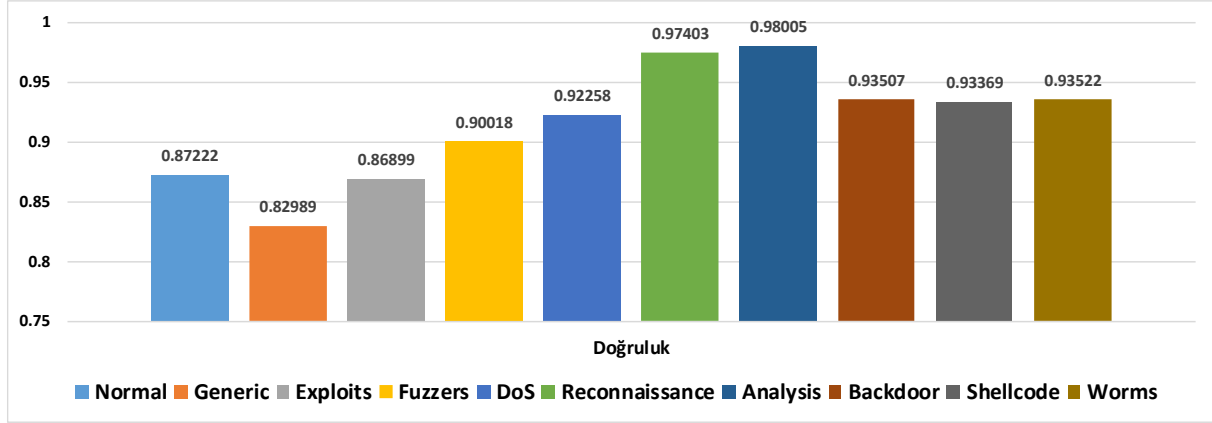
Çalışmada önerilen STS'de, CNN ve GRU'nun birlikte ele alındığı hibrit bir model kullanılmaktadır. Bu hibrit modelde ilk olarak, CNN katmanları kullanılarak verilerin mekansal özellikleri çıkarılmakta, ardından GRU katmanları ile bu özelliklerin zaman içindeki bağımlılıkları öğrenilmektedir. Bu sayede, hem mekansal hem de zamansal özellikler dikkate alınarak daha doğru ve etkili bir saldırı tespiti yapılabilmektedir.

Bu hibrit model, özellikle ağ trafiği verilerinde anomali tespiti ve siber saldırıların erken belirlenmesi gibi uygulamalarda başarılı sonuçlar vermektedir. CNN katmanları, verilerin mekansal düzenini öğrenmekte, GRU katmanları ise zaman içindeki değişiklikleri ve kalıpları takip etmektedir. Böylece, saldırı tespit sistemleri, hem statik hem de dinamik verileri etkili bir şekilde analiz edebilmekte ve daha yüksek doğruluk oranları elde edilmektedir [22,23].

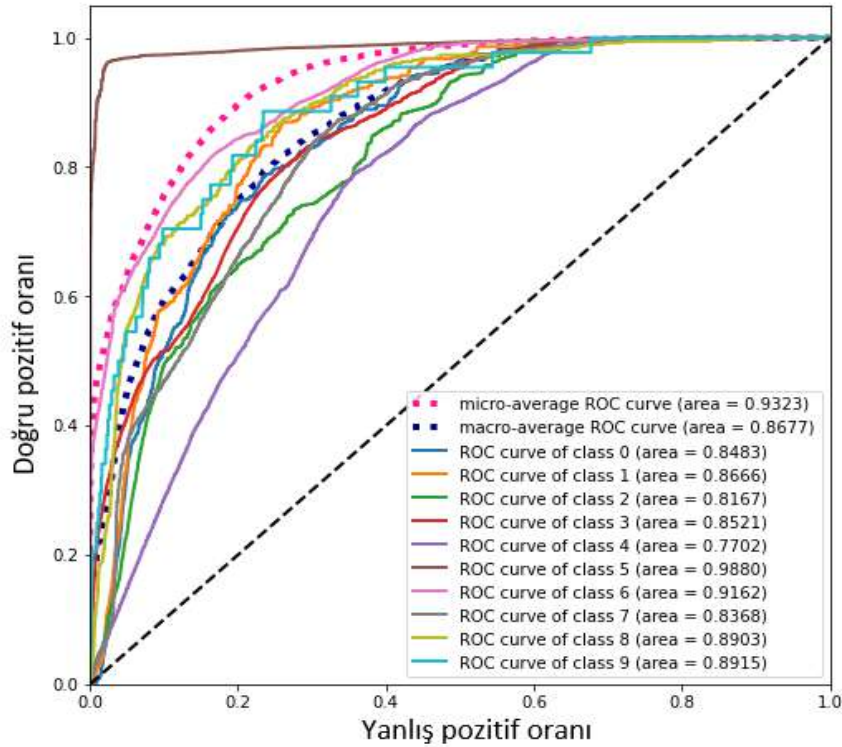
Çalışmanın performans sonuçları doğruluk metriği ve ROC (Alıcı İşletim Karakteristiği) eğrisi yardımıyla değerlendirilmiştir. Doğruluk, bir sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan temel ölçütlerden biridir. Modelin doğru sınıflandırdığı örneklerin, toplam örnek sayısına oranını ifade etmektedir. ROC eğrisi ise, bir sınıflandırma modelinin performansını çeşitli eşik değerlerinde değerlendiren grafiksel bir araçtır. ROC eğrisi, modelin çeşitli eşik değerlerinde Gerçek Pozitif Oranı (TPR) ile Yanlış Pozitif Oranı (FPR) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Önerilen STS'nin

UNSW-NB15 test veriseti'ne uygulanması sonucunda elde edilen doğruluk başarımları ve ROC eğrisi grafiği her bir sınıf için sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te görüldüğü gibidir.

Şekil 2. Doğruluk performans sonuçları



Şekil 3. ROC eğrisi



Şekil 2 ve Şekil 3'te görüldüğü gibi, önerilen model, UNSW-NB15 veriseti üzerinde ortalama % 91,51'lik bir doğruluk başarımları göstermektedir. Çalışmada, PCA kullanımı sayesinde öz nitelik

indirgeme sayesinde modelin eğitim süreci hızlanmıştır. ADASYN ile veri dengeleme yapılarak örnek sayısı fazla olan sınıfa olan tahmin yanlılığı engellenmiştir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Akıllı şebekeler, enerji dağıtım ve yönetiminde daha etkin ve esnek bir yapı sunarak enerji kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak, bu sistemlerin dijitalleşmesi ve ağa bağlı yapıları, siber saldırılara karşı savunmasız hale getirmektedir. Akıllı şebekelerde toplanan verilerin bütünlüğü ve güvenliği, sistemin genel performansı için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, akıllı şebekelere yönelik saldırıların tespit edilmesi ve engellenmesi gerekmektedir. Çalışmada önerilen CNN ve GRUhibrit modeli, akıllı şebekelere yönelik saldırıların engellenmesinde UNSW-NB15 veri setinde elde edilen %91.51'lik doğruluk oranı ile saldırı tespitinde yüksek bir başarı sergilemektedir. Hibrit model, verilerin mekansal ve zamansal özelliklerini bir araya getirerek saldırı tespitinde daha yüksek doğruluk ve etkinlik sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. P. (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529-539.
- [2] Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid—The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944-980.
- [3] Momoh, J. A. (2012). Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, 1-8.
- [4] Amin, S. M., & Wollenberg, B. F. (2005). Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(5), 34-41.
- [5] Al-Ali, A. R., El-Hag, A., Bahadur, A. M., Harbaji, M., & Ali, R. (2017). Smart home renewable energy management system. *Energy Procedia*, 111, 263-272.
- [6] Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., & Tipper, D. (2012). A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 5-20.
- [7] Gharavi, H., & Hu, B. (2011). Multigate communication network for smart grid. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 1028-1045.
- [8] Mo, Y., Kim, T. H. J., Brancik, K., Dickinson, D., Lee, H., Perrig, A., & Sinopoli, B. (2012). Cyber-physical security of a smart grid infrastructure. *Proceedings of the IEEE*, 100(1), 195-209.
- [9] Ullah, I., and Mahmoud, Q. H. "A scheme for generating a dataset for anomalous activity detection in iot networks." *Canadian Conference on Artificial Intelligence*, 508-520, 2020.
- [10] Zhang, H., Huang, L., Wu, C. Q., and Li, Z. "An effective convolutional neural network based on SMOTE and Gaussian mixture model for intrusion detection in imbalanced dataset." *Computer Networks*, 177, 107315, 2020.
- [11] Chen, Z., Zhou, L., and Yu, W. "ADASYN- Random Forest Based Intrusion Detection Model. *International Conference on Signal Processing and Machine Learning*, 152-159, 2021.
- [12] Soe, Y. N., Santosa, P. I., and Hartanto, R. "DDoS attack detection based on simple ann with smote for iot environment" *International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 1-5, 2019.

- [13] Weijinxia, L., Wanwei., Z. and Duguanyao, Y. “An Effective Intrusion Detection Model based on Random Forest Algorithm with I-SMOTE” 23rd International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS), 175-182, 2021.
- [14] Abdulhammed, R., Faezipour, M., Abuzneid, A., and AbuMallouh, A. “Deep and machine learning approaches for anomaly-based intrusion detection of imbalanced network traffic” IEEE sensors letters, 3(1), 1-4, 2018.
- [15] Li, Y., Xu, W., Li, W., Li, A., & Liu, Z. “Research on hybrid intrusion detection method based on the ADASYN and ID3 algorithms.” Mathematical Biosciences and Engineering, 19(2), 2030-2042, 2022.
- [16] Moustafa, N., & Slay, J. UNSW-NB15: A Comprehensive Data Set for Network Intrusion Detection Systems (UNSW-NB15 Network Data Set). In Proceedings of the Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS), 1-6, 2015.
- [17] Jolliffe, I. T. Principal Component Analysis (2nd ed.). Springer Series in Statistics. Springer, 2002.
- [18] Wooditch, A., Johnson, N.J., Solymosi, R., Medina Ariza, J., & Langton, S. Analysis of Variance (ANOVA). In A Beginner’s Guide to Statistics for Criminology and Criminal Justice Using R. Springer, Cham, 2021.
- [19] Wu, G., & Chang, E. Y. An Adaptive Oversampling Method for Imbalanced Datasets Based on Mean-Shift and SMOTE. In Proceedings of International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, 79-85, 2023.
- [20] Dou, H., Liu, Y., & Chen, S. An interpretable composite CNN and GRU for fine-grained martial arts motion modeling using big data analytics and machine learning. Soft Computing, 2023.
- [21] Yuan, L., & Liu, J. A Novel CNN-GRU-Based Hybrid Approach for Short-Term Residential Load Forecasting. IEEE Access, 2023.
- [22] Zhang, W., Zhao, M., & Zhang, S. A CNN-GRU Hybrid Model for Predicting Airport Departure Taxiing Time. Aerospace, 10(2), 113, 2023.
- [23] Ali, A., El-Hag, A., Bahadur, A. M., Harbaji, M., & Ali, R. Developing Hybrid CNN-GRU Arrhythmia Prediction Models Using Fast Fourier Transform on Imbalanced ECG Datasets. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2023.

125: Güç Sistemlerinde Beş Fazlı İletim Hattı Modellemesi ve Entegrasyonu

Doğa Keskin, H. Feza Carlak

Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Ergin Kayar
TEİAŞ

ÖZET

Son yıllarda enerji iletimi ile ilgili göz önünde bulundurulmuş en önemli konu, iletim hatlarında maksimum kapasite ile iletimin sağlanabilmesidir. Günümüzde elektrik enerjisi talebinde görülen artmalar, enerji üretim merkezlerinin tüketim merkezlerinden uzakta bulunması ve sistemlerin birbirlerine bağlanma ihtiyacı nedeniyle enerji iletim sistemlerinin önemi gittikçe büyümektedir. Enerji iletim sisteminin iletim kapasitesini artırma gereksinimi, klasik olarak aynı teknik özellikleri taşıyan paralel iletim hatlarını artırarak veya daha yüksek gerilim kademelerine çıkılarak karşılanmaya çalışılır. Bu nedenle, üç-fazlı sistemlere bir alternatif olarak, gücü, çevreye elektriksel ve estetik açıdan daha uygun biçimde iletecek az yer kaplayan çok-fazlı sistemler üzerinde incelmeler yapılmaya başlanmıştır. Çok fazlı jeneratörler veya motorlar dahil olmak üzere çok fazlı sistemler, özellikle beş fazlı, üç fazlı emsallerine kıyasla daha iyi performans sunar. Beş fazlı jeneratörler, rüzgâr enerjisi üretimi, elektrikli araçlar, havacılık ve petrol ve gaz gibi ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere uygulamalarda güç üretebilir. Çok fazlı (üç fazdan fazla) sistemler, sahip oldukları avantajlar nedeniyle son zamanlarda araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Beş fazlı iletim hatları, modern bir yaklaşım olarak enerji iletiminde güç sistemlerinin esnekliğini, verimliliğini ve güvenliğini artırmak için önemli bir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma, beş fazlı iletim sistemlerinin enerji sektöründe önemli bir rol oynayabileceğini ve geleceğin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir çözüm olabileceğini vurgulamaktadır. Çalışmanın metodolojisi, beş fazlı iletim hatlarının modellenmesi ve analiz edilmesini içermektedir. Bu analizler, beş fazlı iletim hatlarının güç sistemlerinin dinamik kararlılığını artırarak enerji iletiminde daha etkin bir çözüm sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, beş fazlı iletim hatlarının enerji iletimindeki önemini ve bu teknolojinin güç sistemlerinin esnekliğini artırma potansiyeline işaret etmektedir. Bu bağlamda, beş fazlı iletim hatlarının enerji iletiminde daha geniş bir şekilde kullanılması ve güç sistemlerinin verimliliğini artırması önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Beş fazlı iletim sistemleri, modelleme, optimizasyon, tasarım, enerji verimliliği, sistem stabilitesi. Beş Fazlı Hat Modeli

ABSTRACT

The most important issue considered regarding energy transmission in recent years is to provide transmission with maximum capacity in transmission lines. Today, the importance of energy transmission systems is growing due to the increase in the demand for electrical energy, the location of energy production centers away from consumption centers and the need to connect systems to each other. The need to increase the transmission capacity of the energy transmission system is tried to be met by increasing the parallel transmission lines with the same technical characteristics as the classical ones or by increasing the higher voltage stages. For this reason, as an alternative to three-phase systems, refinements have begun to be made on multi-phase systems that take up little space to transmit power to the environment in a more electrically and aesthetically appropriate way. Multiphase systems, including multiphase generators or motors, especially five-phase, offer better performance compared to their three-phase counterparts. Five-phase generators can generate power in applications such as, but not limited to, wind power generation, electric vehicles, aviation, and oil and gas. Multiphase (more than three-phase) systems have recently become the focus of research due to the advantages they have. Five-phase transmission lines, as a modern approach, are considered to have significant potential to increase the flexibility, efficiency, and safety of power systems in power transmission. This study highlights that five-phase transmission systems can play an important role in the energy sector and can be an important solution to meet the energy needs of the future. The methodology of the study includes modeling and analysis of five-phase transmission lines. These analyses show that five-phase transmission lines provide a more efficient solution in power transmission by increasing the dynamic stability of power systems. As a result, it points to the importance of five-phase transmission lines in power transmission and the potential of this technology to increase the flexibility of power systems. In this regard, it is proposed that five-phase transmission lines should be used more widely in power transmission and improve the efficiency of power systems.

Key words: Five-phase transmission systems, modeling, optimization, design, energy efficiency, system stability. Five-Phase Line Model

GİRİŞ

Çok fazlı (üç fazdan fazla) sistemler, üç fazlı muadillerine göre sahip oldukları avantajlar nedeniyle son zamanlarda araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Çok fazlı sistemlerin uygulanabilirliği elektrik enerjisi üretimi iletim ve kullanımda araştırılmaktadır [1]-[2]. Çok fazlı iletim sistemi üzerine araştırmalar, iletim hatlarının maliyetlerinin artması, çevre sorunları ve çeşitli katı lisans kanunları nedeniyle ortaya çıkmıştır [3]-[4]. Çok fazlı sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, ucuz, güvenilir yarı iletken cihazların ve dijital sinyal işlemcilerin mevcudiyeti nedeniyle bu yüzyılın başlarında ivme kazanmıştır [5]-[6]. Çok sistemlerin araştırmalarındaki son teknolojiye ilişkin ayrıntılı incelemeler de mevcuttur [7]-[8]. Bu makale üç fazlı sistemler ile beş fazlı sistemler arasında bir fark önermektedir. Mevcut çalışma beş fazlı iletim sistemi üzerinde incelenmiştir. Çok fazlı elektrikli sistemler üzerine yapılan araştırmaların odak noktası, besleme sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü ile sınırlıdır [9]. Faz sayısını üçten n-faza değiştirmek için herhangi bir statik dönüşüm sistemi geliştirmek için çok az çaba sarf edilmektedir [10]. Burada faz sayısı $n > 3$ ve tektir çünkü altı

fazlı iletim hatları standart çift devreli üç fazlı hatla karşılaştırıldığında direk yapımında daha küçük ve daha karmaşık olabilir [11]. 6, 12 veya 24 fazlı sistemin seçilmesinin nedeni bu sayıların için katları olması ve bu tip sistemin tasarlanmasının basit ve anlaşılır olmasıdır. Ancak aşama sayısını artırmak kesinlikle sistemin karmaşıklığını artırır. Bu tasarımların hiçbiri 5, 7, 11 vb. gibi tek sayıda fazlar için mevcut değildir [12]. Çok fazlı sistemlerin evrimi, elektrikli tahrikleri ve yenilenebilir enerji sistemleri sürücülerin sessiz çalışma ve birçok ümit verici avantajı vardır. Elektriksel ve mekanik özellikleri sayesinde elektrikli tahrikler, sıvı yakıtla dayalı çok sayıda güç tahrikinin yerini alabilmektedir [13]. Çok fazlı rüzgâr enerjisi üretim sistemleri iyi özelliklere sahiptir ve elektrik enerjisi üretmek için basitleştirilmiş doğrudan matris dönüştürücülerin kullanıldığı uygulamalar vardır [14]. İki ve çok seviyeli üç fazlı dönüştürücülerin geliştirilmesinin özellikle uygulama alanında sürekli olarak sürdürüldüğü görülmektedir. Yarı iletken cihazlardaki büyük teknolojik ilerleme, bunun hala yeni devreler, kontrol algoritmaları ve teoriler için bir araştırma alanı olarak kaldığına inanmamızı sağlıyor. Ancak yeni bir zorluk, güç enerji şebekesinde ve elektrikli makinelerde üçten daha yüksek faz sayısına olan ihtiyacın karşılanmasıdır. Bu fikir, çok fazlı enerji dönüşümü konusunda başka bir gelişme etkisi yarattı. Etkili araştırma ve teknoloji başarıları sayesinde çok fazlı güç ve çok fazlı motorlar kullanılabilir hale geldi. Uygulamalara bağlı olarak faz sayısı dört, beş veya daha fazla olabilir. Üç fazlı sistemin beş fazlı sisteme dönüştürülmesi bir güç transformatörü kullanılarak elde edilebilir. Bu tür bir güç dönüşümü yöntemi, yazarların diğerlerinin yanı sıra, çok fazlı güç iletim sistemlerinin modellenmesiyle ilgili bir problemi sunulmuştur [15]. Güç enerjisi iletiminde, HPO (Yüksek Faz Sırası) adı verilen üçten daha yüksek bir faz sırası gerçekten iletim verimliliğini arttırmanın yolu olarak kabul edilir [16]. Daha fazla faz, iletim hattının daha fazla yer kaplaması anlamına gelir. İletkenler arasındaki gerekli mesafe genellikle faz-faz gerilimine göre belirlenir. Dolayısıyla uygulanan aşamaların sayısı, kullanılan alanın genel boyutlarını sınırlar. Güç sistemi altı faz iletkeniyle donatılmışsa, faz voltajı faz-faz voltajına eşittir, bu da bitişik fazlar ile nötr nokta arasında aynı mesafeyi sağlar. Çok fazlı iletim hattı New York Eyaleti Elektrik ve Gaz Şirketi tarafından pratik olarak uygulanmıştır. İki adet üç fazlı 115 kV iletim hattı, bir adet 93 kV altı fazlıya dönüştürülmüştür. Nihai sonuç, hattın uzunluğunun 37-45 km'nin üzerinde olması koşuluyla ekonomik açıdan tatmin edici olmuştur.

Şekil 1. Önerilen sistemin blok gösterimi.



Bu makale, girişi dengeli üç fazlı olacak şekilde dengeli beş fazlı bir besleme elde etmek için özel bir transformatör bağlantı şeması incelemektedir [17]. Sistemin blok şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Sabit gerilim ve sabit frekanslı mevcut şebeke beslemesi, sabit gerilim ve sabit frekanslı beş fazlı çıkış beslemesine dönüştürülebilir.

YÖNTEM

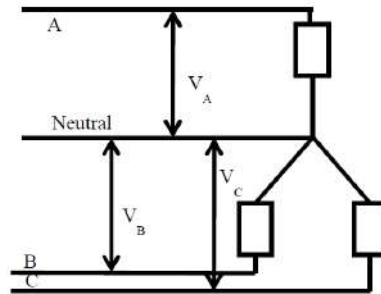
Güç talebi her geçen gün artıyor ve temel ihtiyaç haline geliyor. Çok fazlı iletim sistemi, güç iletim kapasitesini artırarak talebi karşılamak için uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Çok fazlı sistemlerinin araştırmaları ağırlıklı olarak altı ve on iki fazlı iletim sistemleri üzerinde devam etmektedir çünkü bunlar üçün katıdır. Ancak hat voltajı ile faz voltajı arasında büyüklük farkı yoktur. Bu yazıda Beş Fazlı iletim sistemi ile ilgili bilgiler ele alınmakta ve sonuçlar üç fazlı sistemle karşılaştırılmaktadır. Beş Fazlı iletim sisteminde gerekli olan iletkenin ağırlığı, iletkenin sarkması ve iletkenler arasındaki mesafeyi, Endüktans ve kapasitans hesaplamalarını incelemektedir.

2.1. Üç Fazlı Besleme Gerilimi, Akım ve Güç ilişkileri

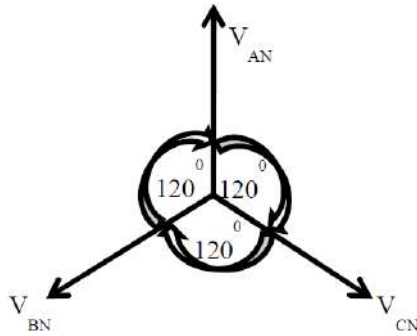
Şekil 2' de yıldız bağlı üç fazlı dört telli bir besleme sistemine bağlanan üç yükü göstermektedir. Şekil 3(a), 3(b)' de 3 fazlı bir beslemenin fazör diyagramını göstermektedir; A faz nötr gerilim (V_{AN}) referans olarak alınmıştır ve faz sırası A, B, C, böylece diğer hattan nötre gerilimler veya faz gerilimleri gösterildiği gibi uzanır.

Eğer $V_{AN} = V_{BN} = V_{CN}$ ise gerilim sistemi dengelidir. V_L herhangi bir hat çifti arasındaki gerilim (hat gerilimi) olsun ve $V_P = V_{AN} = V_{BN} = V_{CN}$ (faz voltajı) O zaman $V_L = \sqrt{3} V_P$ ve $I_L = I_P$ olur. Burada I_L herhangi bir hattaki akımdır ve I_P herhangi bir yük veya fazdaki akımdır. Faz başına güç $P = V_P I_P \cos \phi$ 'dir ve toplam güç, her fazdaki güç miktarının toplamıdır.

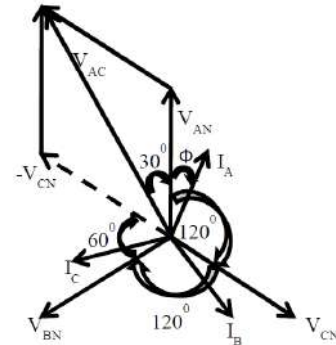
Şekil 2. Yıldız bağlantı (Üç Fazlı dört telli sistem)



Şekil 3(a) Üç fazlı gerilimlerin fazör gösterimi



Şekil 3(b) Faz gerilimleri ve akımlar arasındaki faz ilişkisi



Akımlar eşit ve faz açıları Şekil 2(b) 'deki ile aynı ise sistem üzerindeki yük dengelidir, nötrdeki akım sıfırdır ve toplam güç $P = 3V_P I_P \cos \phi$ olur.

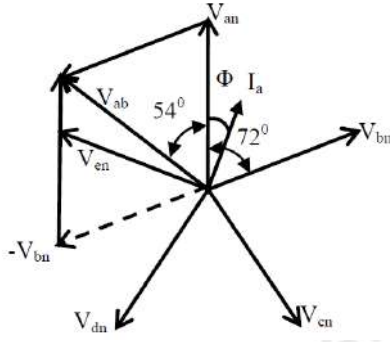
$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \text{ veya } P = 1.73 V_L I_L \cos \phi$$

(1)

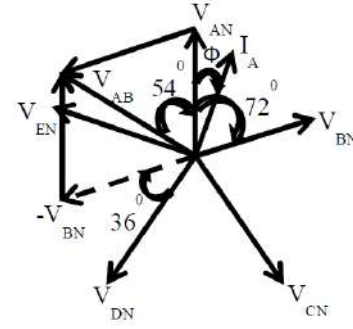
2.2. Beş Fazlı Gerilim, Akım ve Güç İlişkileri

Şekil 4(a)'da beş faz fazör diyagramını göstermektedir; A faz dan nötre gerilim V_{AN} referans olarak alınmıştır. Faz sırası A, B, C, D, E, böylece diğer hat-nötr gerilimleri veya faz gerilimleri gösterildiği gibi uzanır.

Şekil 4(a) Beş Fazlı beslemenin fazör diyagramı



Şekil 4(b) Gerilim ve akım arasındaki faz ilişkisi



Eğer $V_{AN} = V_{BN} = V_{CN} = V_{DN} = V_{EN}$ ve bunlar eşit aralıklarla yerleştirilmişse (yani her fazda 72°), voltaj sistemi dengelidir. $V_{AN} = V_{AN} \angle 0^\circ$, $V_{BN} = V_{BN} \angle -72^\circ$, $V_{CN} = V_{CN} \angle -144^\circ$, $V_{DN} = V_{DN} \angle -216^\circ$ ve $V_{EN} = V_{EN} \angle -288^\circ$ dir. VL herhangi bir hat çifti arasındaki gerilim (hat gerilimi) olsun ve $V_{Ph} = V_{AN} = V_{BN} = V_{CN} = V_{DN} = V_{EN}$ (faz gerilim) bu durumda $V_L = 1,38 V_{Ph}$ veya $V_L = 1,175 V_{Ph}$ ve $I_L = I_P$ olur. Burada I_L herhangi bir hattaki akımdır ve I_P herhangi bir fazdaki akımdır. Faz başına güç $P = V_P I_P \cos \theta$ 'dir ve toplam güç, her fazdaki güç miktarının toplamıdır.

$$P = 5 V_{Ph} I_{Ph} \cos \theta \text{ veya } P = 4.25 V_L I_L \cos \theta \quad (2)$$

$$\text{Üç Fazlı Gerilim ilişkisi: } V_L = \sqrt{3} V_{Ph} \text{ veya } V_L = 1.73 V_{Ph} \quad (3)$$

$$\text{Beş Fazlı Gerilim ilişkisi: } V_L = \sqrt{1,38} V_{Ph} \text{ veya } V_L = 1.17 V_{Ph} \quad (4)$$

$$V_{AB} = V_{Ph} 1,175 \angle 54^\circ, \quad (5)$$

$$V_{AC} = V_{Ph} 1,902 \angle 18^\circ, \quad (6)$$

$$V_{AD} = V_{Ph} 1,902 \angle -18^\circ, \quad (7)$$

$$V_{AE} = V_{Ph} 1,175 \angle -54^\circ, \quad (8)$$

$$V_{AN} = V_{Ph}, V_{AB} + V_{AC} + V_{AD} + V_{AE} = 5V_{AN} \quad (9)$$

$$\text{Üç Fazlı Güç (dengeli sistem durumunda): } P = 3 V_L I_L \cos \theta \text{ or } P = 1.73 V_L I_L \cos \theta \quad (10)$$

$$\text{Beş Fazlı Güç (dengeli sistem durumunda): } P = 5 V_{Ph} I_{Ph} \cos \theta \text{ or } P = 4.25 V_L I_L \cos \theta \quad (11)$$

Yani beş faz gücü üç faz gücünden fazladır, yani beş faz gücü üç faz gücünden 2,52 kat, tek faz gücünden ise 4,25 kat fazladır. İletim hattında endüktans ve kapasitansı etkileyen ana faktör iletkenler arasındaki mesafedir. İletkenler arasındaki boşluk sehim' e bağlıdır. Sehim ise iletkenin ağırlığına bağlıdır. Bu nedenle, Beş Fazlı iletim hattının endüktansını ve kapasitansını hesaplamak için iletkenin ağırlığını, iletkenin sehim' ini ve iletkenler arasındaki boşluğu belirlenmesi gerekir [18]. 5 faz sistem dikkate alınarak iletkenin ağırlığı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Hat akımı: } I_L = \frac{P}{4,25V_L \cos \phi} \quad (12)$$

$$\text{Güç Kaybı: } P_L = 5I_L^2 R \quad (13)$$

$$P_L = \frac{5P^2 \times \rho \times l}{18,0625 \times V_L^2 \cos^2 \phi \times a} \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemden kesit alanı çözülebilir ve dolayısıyla alüminyum iletkenin ağırlığı şöyle olacaktır:

$$W_{AL} = HACİM \times D \quad (15)$$

$$W_{AL} = 5al \times D \quad (16)$$

$$W_{AL} = \frac{1,384P \times \rho \times l^2}{V_L^2 \cos^2 \phi \times (1-\eta)} \times D \quad (17)$$

Burada;

P : iletilecek güç,

l : iletkenin uzunluğu,

D : alüminyumun özgül ağırlığı,

ρ : alüminyumun direnci,

V_L : hat voltajı

η : verim

Sehim aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir;

$$S = W_r L^2 / 8T \quad (18)$$

Burada, W_r metre cinsinden uzunluk başına iletken ağırlığıdır (iletkenin ağırlığı ve rüzgâr basıncı göz önüne alındığında), L Açıklık uzunluğu ve T gerilmedir. İletkenlerin aralığı kısmen elektriksel ve kısmen mekanik hususlarla belirlenir. Daha büyük aralık, hattın endüktansında artışa ve dolayısıyla voltaj düşüşüne neden olur, böylece makul bir değerde tutmak için iletkenlerin, koronanın önlenmesiyle tutarlı olacak şekilde birbirine yakın olması gerekir. İletkenler arasındaki minimum mesafeye ilişkin temel husus, en kötü durumdaki (maksimum sıcaklık ve rüzgâr ağırlığı gibi) iletkenler arasındaki elektriksel açıklıkların, özellikle açıklıkların ortasında güvenlik limitlerinden az olmamasıdır [19].

Bir alüminyum iletken hattı için iletkenlerin aralığının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ampirik formüller şu şekilde verilmiştir:

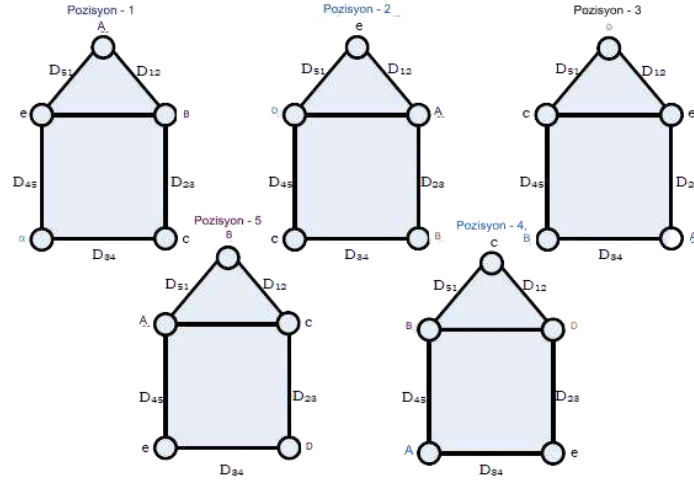
$$S_p = \sqrt{S} + \frac{V}{150} \quad (19)$$

Burada; S_p aralık, S metre cinsinden sehim ve V , kV cinsinden hat voltajıdır.

2.3. Beş Fazlı İletim Hattı Endüktansı

Bir iletim hattının endüktansı amper başına akı bağlantıları olarak hesaplanır. Beş Fazlı hatların temel denklemleri de kolaylıkla geliştirilebilir. Tüm iletkenlerin simetrik aralıklara sahip olmadığı varsayıldığında, transpoze çevrim şekil 5'te gösterilmektedir. 5 fazlı bir hat için nötr olmayacaktır, dolayısıyla $I_a + I_b + I_c + I_d + I_e = 0$ olacaktır.

Şekil 5. Beş fazlı hattın transpoze çevrimi



Transpoze edilmiş bir hattın bir iletkeni için, önce bir iletkenin transpozisyon döngüsünde her konum için akı bağlantıları aşağıdaki gibidir:

1. konum için:

$$\lambda_{a1} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} + I_d \ln \frac{1}{D_{34}} + I_e \ln \frac{1}{D_{45}} \right] \quad (20)$$

2. konum için:

$$\lambda_{a2} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{34}} + I_d \ln \frac{1}{D_{45}} + I_e \ln \frac{1}{D_{51}} \right] \quad (21)$$

3. konum için:

$$\lambda_{a3} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{34}} + I_c \ln \frac{1}{D_{45}} + I_d \ln \frac{1}{D_{51}} + I_e \ln \frac{1}{D_{12}} \right] \quad (22)$$

4. konum için:

$$\lambda_{a4} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{45}} + I_c \ln \frac{1}{D_{51}} + I_d \ln \frac{1}{D_{12}} + I_e \ln \frac{1}{D_{23}} \right] \quad (23)$$

5. konum için:

$$\lambda_{a5} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{51}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} + I_d \ln \frac{1}{D_{23}} + I_e \ln \frac{1}{D_{34}} \right] \quad (24)$$

“a” iletkeninin ortalama akı bağlantısı:

$$\lambda_a = \frac{\lambda_{a1} + \lambda_{a2} + \lambda_{a3} + \lambda_{a4} + \lambda_{a5}}{5} \quad (25)$$

$$I_b + I_c + I_d + I_e = -I_a \quad (26)$$

Faz başına ortalama endüktans:

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt[5]{(D_{12} D_{23} D_{34} D_{45} D_{51})}}{r_a} \quad (27)$$

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[5]{(D_{12} D_{23} D_{34} D_{45} D_{51})}}{r_a} \quad H/m \quad (28)$$

Eşkenar aralık için Beş Fazlı iletim hattının endüktansı, üç fazlı iletim hattının endüktansı ile aynı olacaktır. Ancak simetrik olmayan aralık için Beş Fazlı hattın endüktansı, üç fazlı hattın endüktansından daha az olacaktır.

2.4. Beş Fazlı İletim Hattı Kapasitansı

Transpoze edilmiş bir hattın nötr kapasitansını bulmak için, önce iki iletken arasındaki Voltaj düşüşünü belirlemeliyiz (a ve b diyelim). Çeşitli pozisyonlar için a ve b arasındaki potansiyel fark şekil 5' ten aşağıdaki gibidir:

1. konum için:

$$V_{ab1} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{13}} + q_d \ln \frac{D_{24}}{D_{14}} + q_e \ln \frac{D_{25}}{D_{15}} \right] \quad (29)$$

2. konum için:

$$V_{ab2} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \ln \frac{D_{34}}{D_{24}} + q_d \ln \frac{D_{35}}{D_{25}} + q_e \ln \frac{D_{31}}{D_{21}} \right] \quad (30)$$

3. konum için:

$$V_{ab3} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{34}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{34}} + q_c \ln \frac{D_{45}}{D_{35}} + q_d \ln \frac{D_{41}}{D_{31}} + q_e \ln \frac{D_{42}}{D_{32}} \right] \quad (31)$$

4. konum için:

$$V_{ab4} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{45}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{45}} + q_c \ln \frac{D_{51}}{D_{41}} + q_d \ln \frac{D_{52}}{D_{42}} + q_e \ln \frac{D_{53}}{D_{43}} \right] \quad (32)$$

5. konum için:

$$V_{ab5} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{51}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{51}} + q_c \ln \frac{D_{12}}{D_{52}} + q_d \ln \frac{D_{13}}{D_{53}} + q_e \ln \frac{D_{14}}{D_{54}} \right] \quad (33)$$

Beş voltajın hepsinin ortalaması:

$$V_{ab} = \frac{V_{ab1} + V_{ab2} + V_{ab3} + V_{ab4} + V_{ab5}}{5} \quad (34)$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{ep}} \right] \quad (35)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{ep}} \right] \quad (36)$$

$$V_{ad} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_d \ln \frac{r}{D_{ep}} \right] \quad (37)$$

$$V_{ae} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_e \ln \frac{r}{D_{ep}} \right] \quad (38)$$

$$D_{eq} = \sqrt[5]{D_{12}D_{23}D_{34}D_{45}D_{51}} \quad (39)$$

$$q_a + q_b + q_c + q_d + q_e = 0 \quad (40)$$

$$V_{ab} + V_{ac} + V_{ad} + V_{ae} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} - q_a \ln \frac{r}{D_{ep}} \right] \quad (41)$$

$$V_{an} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{\sqrt[5]{D_{12}D_{23}D_{34}D_{45}D_{51}}}{r} \right] \quad (42)$$

Kapasitans (hava ortamı için $K_r=1$):

$$C_n = \left[\frac{0,0242}{\ln \frac{\sqrt[5]{D_{12}D_{23}D_{34}D_{45}D_{51}}}{r}} \right] \quad (43)$$

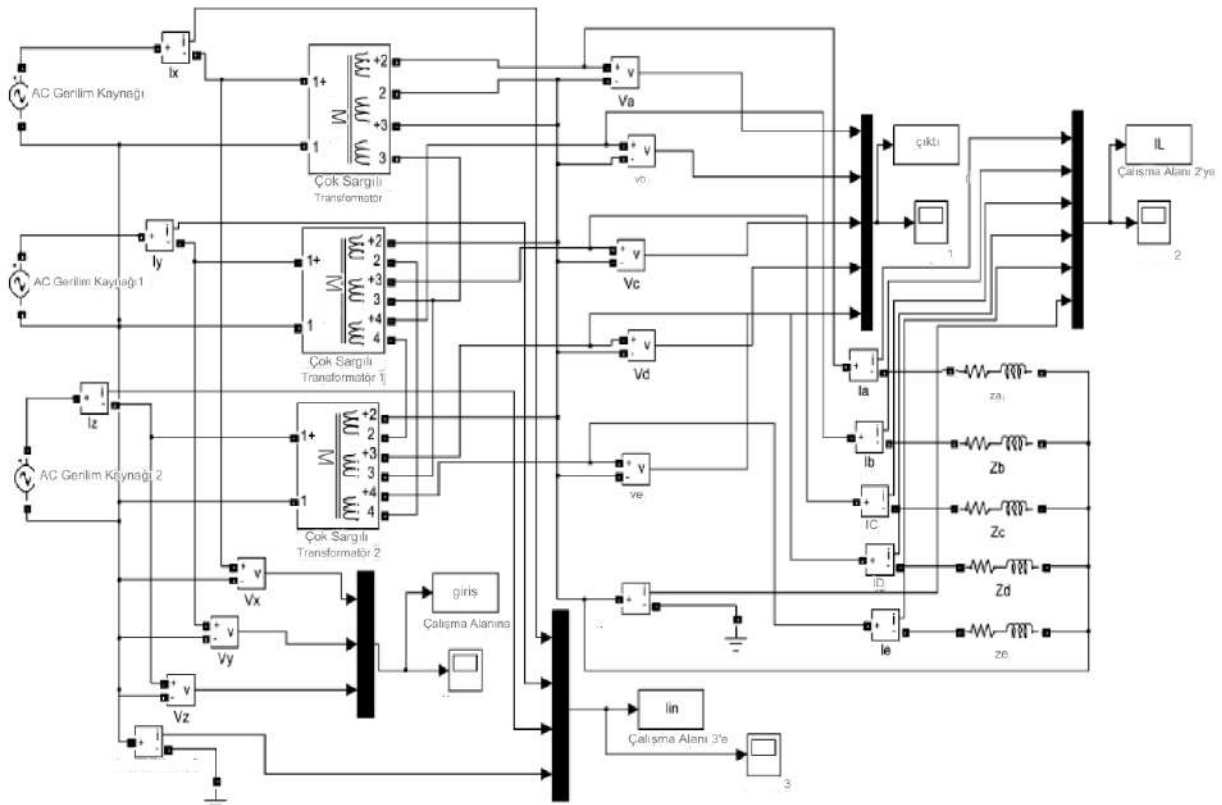
Olacaktır.

Matematiksel olarak hem üç faz hem de Beş Faz için kapasitans formüllerinde bir fark yoktur, yalnızca D_{eq} farklı olacaktır. Faz arttıkça nötre karşı kapasitans artar, kapasitif reaktans azalacak ve şarj akımı artacaktır. Dolayısıyla Beş Fazlı uzun iletim hatlarında direk yüksekliği artırılacaktır. Ancak Beş Fazlı hatlarda alüminyum iletkenin ağırlığı ve sarkması azalır. Beş Fazlı hatlarda iletkenler arasındaki mesafe de üç fazlı hatlara göre daha azdır.

BULGULAR ve YORUMLAR

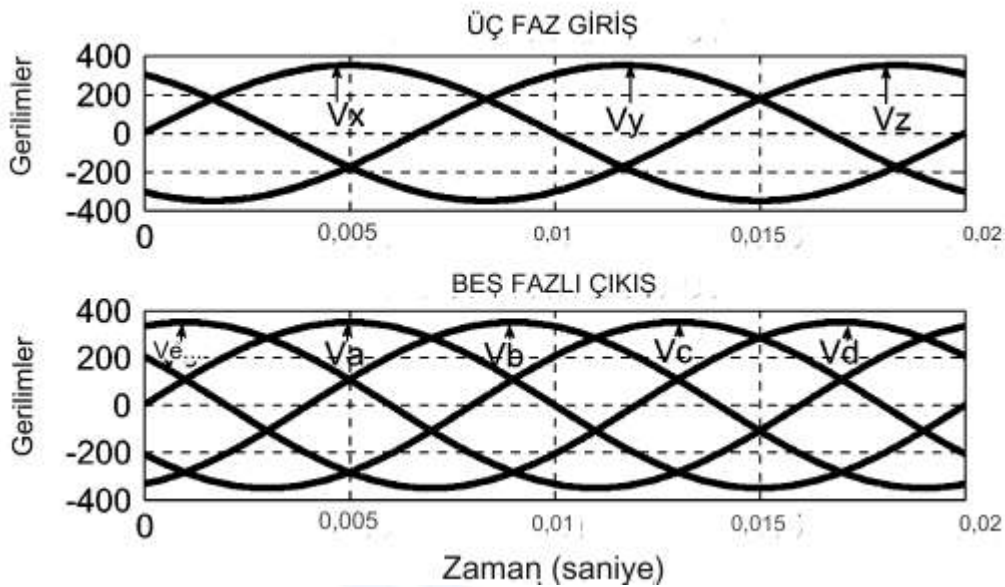
Bu makale, üç fazlı şebeke gücünü beş fazlı çıkış kaynağına dönüştürmek için yeni bir transformatör bağlantı şeması incelemektedir. Bağlantı şeması ve fazör diyagramı ile dönüş oranları gösterilmektedir. Bağlantı şemasının başarılı bir şekilde uygulanması, simülasyon ve deneyler kullanılarak detaylandırılmıştır. Dönüşüm sisteminin uygulanabilirliğini kanıtlamak için yüklü durumdaki beş fazlı bir transformatör kullanıldı. Önerilen bağlantı şemasının uygulamalarda kullanılabilmesi ve ayrıca çok fazlı güç iletim sistemlerinde kullanılmak üzere daha fazla araştırılabilmesi beklenmektedir. Simülasyon düzeneği ve tasarlanan üç ila beş fazlı dönüşüm sistemi kullanılarak elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Tasarlanan dönüşüm sistemi 1:1 giriş:çıkış oranına sahiptir, dolayısıyla çıkış voltajı giriş voltajına eşittir. Bununla birlikte, bu oran, yükseltme veya azaltma gerekliliklerine uyacak şekilde değiştirilebilir. Bu, dönüş oranlarındaki kazanç faktörünün basitçe çarpılmasıyla elde edilebilir. Tasarlanan transformatör öncelikle Matlab/Simulink yazılımının "Simscape Power System" blok setleri kullanılarak simüle edilmiştir (şekil-6).

Şekil 6 Matlab Simscape Power System beş fazlı dönüşüm blok setleri

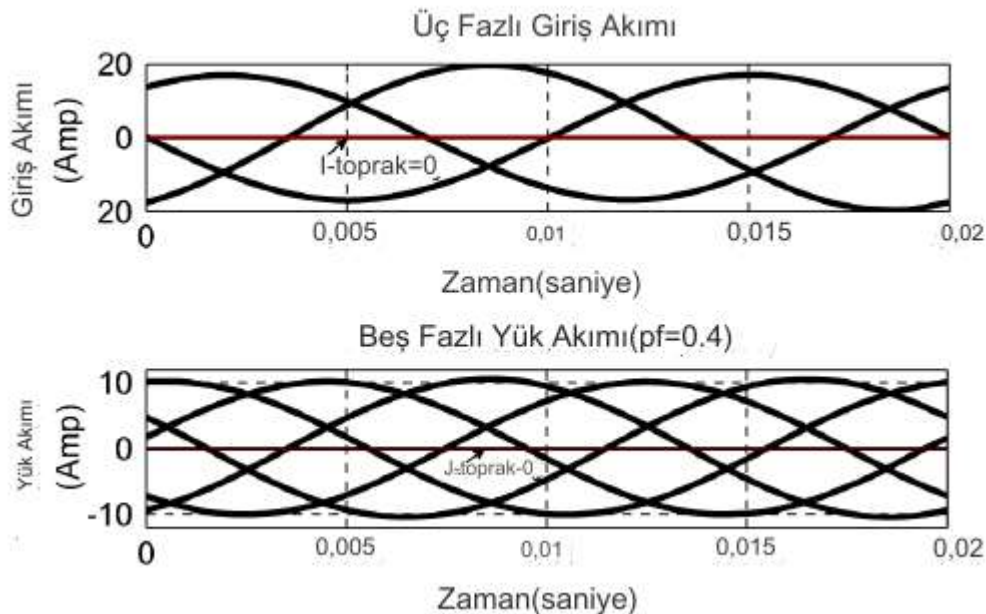


Deneysel amaçlara yönelik mevcut şemada, transformatör bağlantılarının giriş fazlarını beslemek için üç adet tek fazlı ototransformatör kullanılmıştır. Çıkış voltajları, ototransformatörün kademeleri değiştirilerek kolayca ayarlanabilir. Dengeli çıkış için girişin dengeli voltajlara sahip olması gerekir. Girişteki herhangi bir dengesizlik doğrudan çıkış aşamalarına yansır. Yüksüz kararlı durum koşulları altında giriş ve çıkış voltajı dalga formları kaydedilmiş ve Şekil 7(a)' da gösterilmiştir. Giriş ve çıkış voltajı dalga formları, tasarlanan transformatörün başarılı uygulamasını açıkça göstermektedir ve çıkışın, dengeli bir beş fazlı besleme olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 7(a). Üç fazlı giriş ve beş fazlı çıkış voltaj dalga formları



Şekil 7(b). Üç fazlı giriş ve beş fazlı çıkış akım dalga formları



Bireysel çıkış fazları ayrıca ilgili giriş voltajlarıyla birlikte gösterilir. $V_a=V_x$ olduğundan V_a fazı gösterilmemiştir (yani giriş ve çıkış fazları aynıdır). Her iki tarafın nötrleri topraklandığında hiçbir toprak akımı akmayacaktır. Toprak akımı dalga formları ile giriş ve çıkış akımları da Şekil 7(b)'de gösterilmektedir. Buradan I_x giriş hattına bağlanan transformatörün diğer ikisine göre %16 daha fazla akım taşıdığını gözlemlenmiştir. Bu verimlilik nedeniyle genel transformatör seti, geleneksel üç fazlı transformatörden biraz daha düşük olduğu görülmüştür.

SONUÇLAR

Beş fazlı iletimin modellenmesi ve analizi için güç sistemi Matlab simulink Simscape Power System programı kullanılarak üç fazlı şebeke beş fazlı çıkış kaynağına dönüştürmek için bir transformatör bağlantısı ve dinamik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, enerji üretim ve iletim sistemlerinin aktif güç akışını kontrol etmek için gerilime bağlı reaktif güç kapasitesi limitleri ve ayar noktası özelliklerine sahip güç kontrolörleri dikkate alınarak kararlı durum yük akışı hesaplamaları yapılmıştır. Enerji iletim sistemlerinde iletim kapasitesi arttırımında bir alternatif olan çok fazlı sistemlerin kullanımının iletim kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelemelerde, çok fazlı dönüşümde iletim hattı kompanzasyon elemanlarının farklı şekillerde konumlandırılmasının etkileri de araştırılmıştır. İletim sisteminin yüklenme durumu ve kompanzasyon derecesinin büyüklüğü açısından da incelemeler yapılmıştır. Tüm bu verilen durumların iletim sistemi üzerindeki etkilerinin araştırılması, arıza ve kararlılık analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Kararlılık incelemelerinde eşit alan kriteri kullanılmıştır. Daha önceki çalışmalardan farklı olarak çok fazlı sistemlerde dengesiz arızalarda kararlılık incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, beş fazlı iletimin enerji üretim tesislerinin şebekeye entegrasyonu sırasında karşılaşılabilecek sorunları ve enerji kalitesi üzerine etkilerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, enerji iletim şebekesinde meydana gelen gerilim regülasyonu sorunlarının çözümünde üretim kaynaklarının değerlendirilmesi ile ilgili bulgular sunulmuştur. Bu bildiri de beş fazlı İletim sistemi hakkında temel bir kavram önermektedir. Hat gerilimi ile faz gerilimi arasındaki ilişkiyi, akım ve güç ilişkileri gösterilmiştir. Beş Fazda iletkenler arasındaki mesafe de belirlenmiş ve beş fazda hat parametrelerinin komple hesaplamaları yapılmıştır. Burada hat modelini beş fazlı sistemde derlenmiş, gelecekte araştırmaların arıza analizi ve Beş Fazlı sistemin korunması üzerine yoğunlaşması ve Beş Fazlı iletim tesislerinin Şebekeye entegrasyonunda yaşanabilecek olası problemler ve analizleri gerçekleştirilecektir. Ayrıca, beş fazlı iletimin üç fazlı iletim ve güç sistemi arasındaki etkileşimin geçici hata davranışı üzerindeki etkisinin simülasyonu da amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] D. Basic, J. G. Zhu, and G. Boardman, "Transient performance study of brushless doubly fed twin stator generator," *IEEE Trans. Energy Con-vers.*, vol. 18, no. 3, pp. 400–408, Jul. 2003.
- [2] G. K. Singh, "Modelling and experimental analysis of a self excited six-phase induction generator for stand alone renewable energy generation," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1605–162, Jul. 2008.
- [3] J. R. Stewart and D. D. Wilson, "High phase order transmission- a feasibility analysis Part-I-Steady state considerations," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-97, no. 6, pp. 2300–2307, Nov. 1978.
- [4] J. M. Arroyo and A. J. Conejo, "Optimal response of power generators to energy, AGC, and reserve pool based markets," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 4, pp. 76–77, Apr. 2002.
- [5] M. A. Abbas, R. Chirsten, and T. M. Jahns, "Six-phase voltage source inverter driven induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 5, pp. 1251–1259, Sep./Oct. 1984.
- [6] M. Correa, C. R. da Silva, H. Razik, C. B. Jacobina, and E. da Silva, "Independent voltage control for series-connected six-and three-phase induction machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 4, pp.1286–1293, Jul./Aug. 2009.
- [7] G. K. Singh, "Multi-phase induction machine drive research—a survey," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 61, pp. 139–147, 2002.
- [8] E. Levi, "Multiphase electric machines for variable-speed applications," *IEEE Trans Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, May 2008.
- [9] Dong Liu, Jia-Q Yang, Jin Huang *, Hai-bo Jiang, "Realization of a SPWM inverter for multi-phase induction motor drives," pp. 1287 – 1290.
- [10] Drazen Dujic, Martin Jones, and Emil Levi, "Analysis of Output Current-Ripple RMS in Multiphase Drives Using Polygon Approach," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 7, JULY 2010, pp. 1838 – 1849.
- [11] Edward P. Cornell, and Thomas A. Lipo, "Modeling and Design of Controlled Current Induction Motor Drive Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-13, NO. 4, JULY/AUGUST 1977, pp. 321 - 330.
- [12] Atif Iqbal, Shaik Moinuddin, M. Rizwan Khan, Sk. Moin Ahmed, and Haithen Abu-Rub, "A Novel Three-Phase to Five-Phase Transformation using a special transformer connection," *IEEE Transactions on power delivering*, vol. 25, no. 3, JULY 2010, p. no: 1637 – 1644.
- [13] Meinguet F, Nguyen NK, Sandulescu P, Kestelyn X, Semail E. Fault-Tolerant Operation of an Open-End Winding Five-Phase PMSM Drive with Inverter. In Proceedings of the IECON 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore. 2013.
- [14] Abdel-Rahim O, Funato H, Abu-Rub H, Ellabban O. Multiphase Wind Energy Generation with Direct Matrix Converter. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Busan, Korea. 2014.
- [15] Moinoddin S, Iqbal A, Abu-Rub H, Khan MR, Ahmed SM. Three-Phase to Seven-Phase Power Converting Transformer. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2012; 27: 3.
- [16] Lauria D, Mazzanti G, Quaia S. Some modeling problems for four-phase power transmission systems. In Proceedings of the International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). Ischia: IEEE Xplore. 2011.
- [17] Iqbal, A., Moinuddin, S., Khan, M. R., Ahmed, S. M., & Abu-Rub, H. (2010). A novel three-phase to five-phase transformation using a special transformer connection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3), 1637-1644.
- [18] Rao, K. P., Kumar, T. H. H., Raghunadh, I., & Sekhar, G. C. (2016). A Narrative Approach to Five Phase Transmission System. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology (IJMTST)*, 2(6).
- [19] J.B.Gupta, "A Course in Power Systems," New Delhi, S.K. Kataria & Sons Publishers, 2005.

127: Hidroelektrik Santrallerdeki Esnekliği Arttırmaya Yönelik Stratejiler**Elif Erin**

Elektrik Elektronik Mühendisi, TEMSAN A.Ş., Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş.

Buğra Yılmaz

Enerji Teknolojileri ve Tasarım Müdürü, TEMSAN A.Ş., Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş.

ÖZET

Son zamanlarda ozon tabakasının incilmesi, temiz enerji kaynaklarına yönelişi ve mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusundaki talebi arttırmıştır. Dünya çapında artış ivme gösteren bu talep doğrultusunda Avrupa Birliği, 2050 yılına kadar yenilenebilir enerji kullanımını arttırmayı ve karbon nötrlüğü taahhüt etmiştir. Bu hedeflere ulaşmak için esnek ve kendini çabuk toparlayabilen bir enerji sistemi şarttır. Hidroelektrik, enerji üretimini talep dalgalanmalarına hızla uyarlama kapasitesiyle, şebeke istikrarına ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu bildirinin amacı, hidroelektrik santrallerde esnekliği artırma stratejileri üzerine bir çalışma yapmaktır. Çalışmada bu stratejiler kapsamında hidroelektrik santraller rehabilitasyon çalışmaları, pompaj depolamalı santraller kurulması, şebeke stabilizasyonu, yenilenebilir enerji entegrasyonları ve diğer ilgili konular ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidroelektrik Santraller, Esneklik Stratejileri, Şebeke, Frekans

GİRİŞ

Frekans, üretilen ve talep edilen enerji miktarı arasındaki dengenin bir ölçüsüdür [1]. Talep üretimden fazla olduğunda generatör devri azaldığından frekans düşer ve bu durumun tam tersi olarak üretim talepten fazla olduğunda da generatör hızlandığından dolayı frekans yükselir. Enerji talebi ve üretim tam olarak belli olmadığı için bu dengesizlikler doğal olarak meydana gelmektedir. Şebeke hatlarındaki istikrarı sağlamak amacıyla, sistemdeki enerji miktarının her an dengelenmesi gerekir. Bu noktada enerji kaynağının esnek bir şekilde şebekeye adapte olması hayati öneme sahiptir.

3 dakikadan az bir süre içerisinde hatta bağlanma [2] ve santral tipine göre yıl boyu kullanılma özellikleriyle hidroelektrik santraller değişen şebeke koşullarına ve talebe yanıt olarak elektrik

üretimlerini hızlı bir şekilde ayarlama yeteneğine sahiptir. Hidrolik enerjinin esnekliği, üretimi hızlı bir şekilde başlatma ve durdurma, su akışını kontrol etme ve elektrik arz ve talebindeki dalgalanmaları dengelemek için üretimi artırma veya azaltma kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Bu esneklik, hidroelektrik enerjisini, modern elektrik şebekelerinin güvenilirliğini ve istikrarını sağlamak için önemli bir parametre haline getirmektedir. Santralin esnek çalışması, temel yük çalışması olmayan her şey olarak kabul edilir. Genellikle, esnek çalışma, piyasa sinyallerine ve bölgesel elektrik şebekesi taleplerine yanıt olarak güç çıkışının değiştirilmesini içerir. Fakat santrallerde esnek çalışma özellikle santralin şartları (yaşam ömrü, teknolojik altyapısı vs.) uygun değilse bazı olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu olumsuz sonuçlar arasında ünitelerin daha fazla başlatılması ve durdurulması, ünitelerin minimum veya maksimum güç seviyelerinde çalıştırılması ve ünitelerin daha fazla kavitasyon bölgelerinde veya mevsimsel yağış dengesizliğine sahip bölgelerde çalıştırılması yer alır [3].

Yaşam ömrü, çevresel veya kurulduğu zamanın teknolojik yetenekleri gibi faktörlere bağlı olarak enerji sistemlerinin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için hidroelektrik santral esnekliğini artırma kapsamında dünya çapında birçok araştırma ve destek fonları açılmaktadır. Buna örnek olarak Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından “Santrallerdeki esnekliği arttırmaya yönelik stratejiler” [4] kapsamında 9.5 milyon dolara fon sağlanan proje 2023 yılında başlatılmıştır. Avrupa Birliği tarafından desteklenen “HydroFlex” [5] projesi, AB Horizon2020 programı kapsamında 5,7 milyon € bütçeyle finanse edilen bir araştırma ve yenilik faaliyetidir. HydroFlex projesi, hidroelektrik enerjinin temiz enerji geçişine önemli bir katkıda bulunmasına ve küresel iklim değişikliğini hafifletmek için gereken büyük çabaya katkıda bulunmuştur. Ana hedefleri başarılı bir şekilde tamamlanan projenin süresi Nisan 2022’de sona ermiştir. Yine Avrupa Birliği tarafından fonlanan büyük proje ise Eylül 2019’da başlayan Horizon 2020 tarafından finanse edilen “XFLEX HYDRO” [6] projesidir. Yaklaşık 18 milyon € destek sağlanan çalışma kapsamında, esnekliği artırmak için Avrupa Birliği sınırları içinde yer alan 7 hidroelektrik santralinde yenilikçi teknolojiler test edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansının 2019’da yayınladığı raporda [7], hidroelektrik santral esnekliği ve bu esnekliğin yenilenebilir enerji entegrasyonundaki rolü detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Rapor ayrıca hidroelektrik santralinin olgun bir teknolojisi olmasına rağmen, birçok eski santralin modernize edilmesi, yenilenmesi ve optimize işletme modlarına geçirilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir. Literatürde de santral esnekliğini artırmak için bazı

çalışmalar yapılmıştır. Saberi O. vd, tarafından yapılan bu makalede, "Air Cusion Underground Reservoir (ACUR)" adlı yeni bir teknoloji tanıtılmış ve bu teknolojinin hidroelektrik santrali işletme esnekliğini nasıl artırdığı incelenmiştir. ACUR sistemiyle, nehre net akışı kontrol edebilir ve üretim akışını ve nehre deşarjı geçici olarak ayırarak çevresel kısıtlamaları ele almak ve santralin çevresel etkilere olan duyarlılığını azaltarak esnekliği artırmak amaçlanmıştır [8]. Zhi Wu vd. çalışmasında, pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri (PHS) esnekliğini artırmak için farklı batarya enerji depolama (BESS) ve değişken hızlı türbin (VS-PHS) gibi teknoloji yöntemlerini ele almışlardır. Çalışmada, operasyonel ve stratejik esnekliği değerlendirerek BESS'in PHS esnekliğini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Bu esneklik artışı, PHS'nin teknik ve ekonomik performansını iyileştirmiş ve potansiyelini ortaya çıkarmıştır [9]. Uri vd. ise çalışmalarında, güneş enerji santrallerin kurulması için büyük tarım arazisi alanları işgal edilmesi yerine Brezilya'daki HES rezervuarlarının yüzeylerinin kullanılmasını önermişlerdir. Bu şekilde rezervuar alanının %10'undan daha azı kullanılarak, en yüksek ışınım saatlerinde güneş enerjisiyle elektrik talebini karşılayan yüzer güneş enerji santrallerine ev sahipliği yapabileceğini, düşük veya hiç ışınım olmayan zamanlarda ise şebekeleri hidroelektrik enerjiyle dengeleyebileceğini ve böylece operasyonel esnekliği artırabileceğini gözlemlemişlerdir [10].

YÖNTEM

Santral Esnekliğini Ölçme Yöntemleri

Hidroelektrik santralleri esnekliğinin değerlendirilmesinde kullanılan metodolojiler, santralin elektrik şebekelerine ne kadar uyumlu ve verimli bir şekilde entegre edilebileceğini anlamak için hayati önem taşır [11]. Bu metodolojiler, santralin operasyonel kapasitesini, çevresel etkilerini ve genel performansını değerlendirirken kritik rol oynamaktadır.

Hidroelektrik santralleri esnekliğini ölçmek için veri analizi, simülasyonlar, rezervuar yönetimi modelleri, esneklik metrikleri, entegrasyon stratejileri ve ekonomik modeller gibi çeşitli metodolojiler kullanılmaktadır. Veri analizi, tarihsel verilerin incelenmesi ve gerçek zamanlı veri izlemesi ile gerçekleştirilir. Santralin geçmiş üretim verileri, su seviyeleri, yağış miktarları ve enerji talebi gibi veriler analiz edilerek esneklik değerlendirilir. Ayrıca, sensörler aracılığıyla toplanan gerçek zamanlı veriler, anlık esneklik durumu hakkında bilgi sağlamaktadır. Simülasyonlar ise

hidrolik ve enerji arz-talep simülasyonlarını içermektedir. Bu simülasyonlar, nehir akışı, su depolama ve enerji üretimi gibi değişkenleri tahmin ederek santralin performansını farklı senaryolar altında değerlendirir.

Rezervuar yönetimi modelleri, su depolama ve salınım stratejilerini optimize etmek için kullanılmaktayken optimizasyon modelleri, lineer ve dinamik programlama, hedef programlama ve genetik algoritmalar gibi yöntemlerle su yönetimini iyileştirmektedir. Karar destek sistemleri, farklı yönetim senaryoları oluşturarak en uygun rezervuar işletme stratejilerini belirlemekte ve gerçek zamanlı optimizasyon sağlamaktadır. Esneklik metrikleri, santralin enerji üretimini artırma veya azaltma süresi, yük takibi kapasitesi ve ramp oranları gibi kriterlere dayanmaktadır. Bu metrikler, santralin enerji talebindeki ani değişikliklere nasıl yanıt verdiğini ve üretim hızındaki değişiklikleri ölçmektedir.

Entegrasyon stratejileri, hidroelektrik santralının diğer yenilenebilir enerji kaynakları ve şebeke yönetimi ile entegrasyonunu kapsar. Yenilenebilir enerji entegrasyonu, hidroelektrik santralının rüzgar ve güneş enerjisi gibi kaynaklarla entegrasyonunu incelerken, enerji depolama sistemleri ile entegrasyon da önemlidir. Şebeke yönetimi, santralin şebeke dengesini sağlamak için oynadığı rolü ve yedekleme kapasitesini değerlendirir. Ekonomik modeller ise esneklik artırma stratejilerinin maliyetlerini ve getirilerini analiz eder. Maliyet-fayda analizleri ve yatırım getirisini hesaplamak için ekonomik modeller kullanılırken, enerji piyasası simülasyonları santralin fiyat değişikliklerine nasıl tepki verdiğini ve en uygun piyasa stratejilerini belirler. Bu metodolojiler, hidroelektrik santralin performansını optimize etmek ve değişen koşullara uyum sağlama kapasitesini artırmak için kapsamlı bir şekilde kullanılır.

Santrallerde Esnekliği Arttırma Yöntemleri

Santrallerdeki esnekliği arttırmak için çeşitli yöntemler mevcuttur ve bu yöntemlerin asıl amacı enerji üretiminde verimliliği ve sürdürülebilirliği arttırmaktır. Hidroelektrik santrallerin rehabilitasyon çalışmaları, mevcut tesislerin modernize edilmesi ve verimliliklerinin artırılması yoluyla esnekliği artırabilir. Bu çalışmalar, eskiyen ekipmanların yenilenmesi, teknolojik gelişmelerin ve yapay zeka temelli algoritmaların entegrasyonu ile enerji üretim kapasitesini arttırmaktadır. Ayrıca, pompaj depolamalı santraller kurulması, enerji talebinin düşük olduğu

zamanlarda fazla enerjiyi depolayarak, talebin yüksek olduğu dönemlerde bu enerjinin tekrar kullanıma sunulmasını sağlamak ve böylece enerji arzında dengeyi korumaktadır. Çizelge 1'de farklı tipte hidroelektrik santralleri esneklik servislerine etkileri gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde pompaj depolamaları santrallerin diğer tipte santrallere göre esneklik açısından daha yüksek rampalama kapasitesine, daha düşük tepki ve başlatma süresine, enerji depolama kabiliyetine ve "black start" kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 1 Rezervuar Temelli Hidroelektrik, Nehir Akışlı Hidroelektrik ve Pompalı Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Esneklik Servislerine Etkileri [12]

| Esneklik Hizmeti | Rezervuar Temelli Hidroelektrik | Nehir Akışlı Hidroelektrik | Pompalı Depolamalı Hidroelektrik |
|---|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Rampalama Kapasitesi (MW/dakika) | Orta ile Yüksek | Orta | Yüksek |
| Tepki Süresi (Dakika) | Orta ile Düşük | Düşük | Çok Düşük |
| Başlatma Süresi (Saatler) | Saatler ile Günler | Dakikalar ile Saatler | Dakikalar |
| Kapatma Süresi (Saatler) | Saatler ile Günler | Dakikalar ile Saatler | Dakikalar |
| Döner Rezervler | Evet | Sınırlı | Evet |
| Döner Olmayan Rezervler | Evet | Sınırlı | Evet |
| Frekans Düzenleme | Evet | Sınırlı | Evet |
| Voltaj Kontrolü | Evet | Sınırlı | Evet |
| Yük Takibi | Evet | Sınırlı | Evet |
| Yeniden Başlatma (Black Start) Kabiliyeti | Evet | Sınırlı | Evet |
| Enerji Depolama Kabiliyeti | Sınırlı | Yok | Evet |
| Mevsimsel Değişkenlik | Minimal | Düşük ile Orta | Sınırlı |
| Şebeke Entegrasyonu | Yüksek | Orta ile Yüksek | Yüksek |
| Çevresel Etki | Değişken | Genellikle Düşük | Değişken |

Şebeke stabilitesinin sağlanması, enerji üretim ve dağıtım sistemlerinde esnekliğin temel unsurlarından biridir ve bu amaçla çeşitli teknik ve operasyonel iyileştirmeler yapılabilmektedir. Yenilenebilir enerji entegrasyonları, güneş ve rüzgar gibi kaynakların enerji üretim sistemlerine dahil edilmesiyle, esnek ve çevre dostu bir enerji arzı sağlar. Enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, enerji üretiminde dalgalanmaların önüne geçilmesine yardımcı olur ve sistemlerin daha esnek çalışmasını sağlar. Son olarak, merkezi olmayan üretim modellerinin benimsenmesi, enerji üretiminin çeşitli küçük ölçekli tesislerde gerçekleştirilmesiyle, merkezi bir sisteme bağımlılığı azaltır ve enerji arzının esnekliğini artırır. Bu yöntemlerin bir arada kullanılması, santrallerin esneklik kapasitesini önemli ölçüde artırarak, enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir ve güvenilir olmasını sağlamaktadır.

Bununla birlikte santrallerdeki esnekliği arttırmak için ülkelerin politikaları da önem arz etmektedir. Gelecekteki esneklik ihtiyaçlarını etkin bir şekilde ele almak ve elektrik güç sistemlerinin güvenli bir enerji geçişi sağlayabilmesini temin etmek için sistem düzeyinde analizler yapılmalıdır. Bu analizler, gelecekte karşılaşılabilecek esneklik zorluklarını en teknik olarak verimli, güvenli ve maliyet etkin şekilde belirlemek ve bu zorluklara hazırlanmak için uzun vadeli bir vizyon sunar. Bu kapsamda, elektrik güç sistemlerinin sürekli olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna ve esneklik taleplerine uyum sağlayacak şekilde planlanması gerekmektedir. Bu planlama süreci, sistem operatörlerinin ve enerji politikası yapımcılarının gelecekteki ihtiyaçları önceden görerek gerekli önlemleri almasını sağlar. Böylece, güç sistemlerinin güvenilirliği ve istikrarı korunurken, enerji geçişinin başarıyla gerçekleştirilmesi mümkün hale gelir.

BULGULAR

Santrallerde esnekliği arttırmak için yapılan bazı çalışmalar aşağıda detaylandırılmıştır. Bu çalışmalar, hidroelektrik santrallerinin rehabilitasyonu, pompaj depolamalı santrallerin kurulumu, şebeke stabilitesinin sağlanması ve yenilenebilir enerji entegrasyonları gibi çeşitli yöntemleri içermektedir. Ayrıca, santral kurulu gücünün artırılması, enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve merkezi olmayan üretim modellerinin benimsenmesi de bu alandaki önemli adımlar arasında yer almaktadır. Bu projeler ve girişimler, enerji sistemlerinin verimliliğini, sürdürülebilirliğini ve güvenilirliğini artırarak operasyonel esnekliği sağlamayı hedeflemektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen bazı önemli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Hirfanlı ve Gökçekaya Barajı Rehabilitasyonu

Hirfanlı ve Gökçekaya Barajı rehabilitasyonu, mevcut hidroelektrik santrallerin modernize edilmesi ve verimliliklerinin artırılması yoluyla operasyonel esnekliğin artırılmasına önemli katkılar sağlamayı amaçlayan Türkiye'nin başlıca santral modernizasyonu projelerindedir. EÜAŞ ve TEMSAN A.Ş. arasında imzalanan projede türbin tasarımı kısmında TEMSAN A.Ş. görev yapmaktadır. Bu rehabilitasyon çalışmaları kapsamında, eskiyen ekipmanlar yenilenmekte ve yeni teknolojiler entegre edilmektedir. Özellikle türbin optimizasyonu ve dijitalleşmenin kullanılması, enerji üretim kapasitesinin optimize edilmesine ve talep değişimlerine hızlı bir şekilde yanıt verilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, enerji arzında esneklik sağlanmış ve sistemlerin daha verimli çalışması hedeflenmektedir.

Çizelge 2 Esneklik ve Modernizasyon Uygulamaları Arasındaki İlişki [13]

| Modernizasyon Uygulaması | Üretim Faydası Hakkında Faydaları | Ek Faydalar |
|---|---|--|
| Baraj Gövdesinin Yükseltilmesi | Bir baraj gövdesinin yükseltilmesinin iki temel ve spesifik faydası vardır: hem depolama kapasitesinde hem de düşüde artış. | %20–30 oranında depolama hacminin artırılması, bir sezondan diğerine daha fazla suyun kaydırılmasını sağlar. |
| Verimlilik İyileştirmesi için Yeni Elektro-Mekanik Ekipmanlar | Eski türbinin değiştirilmesi, türbin tipine bağlı olarak BEP'de %4–6 maksimum ideal kazanç sağlar. | Talep dönemlerinde daha fazla kullanılabilir güç sağlar. |
| Daha Esnek Elektro-Mekanik Ekipmanlar | %4–5 ağırlıklı verimlilik kazancı sağlamaktır. | Daha iyi debi davranışı ve esnek üretim sağlar. |
| Dijitalleşme ve Debi Tahmini | %1 verimlilik artışı ve %11'e kadar daha iyi giriş tahmini ile üretim artışı sağlar. | Esneklik, daha iyi kontrol, giriş tahmini ve hasar önleme sağlar. |
| Yüzer Güneş Santrali (YGES) | Su yüzeyinin %10'unun kaplanması, kaplanan alanın %70'inde buharlaşmayı azaltarak santral üretimini artırır + FPV'den elektrik üretilerek ek bir üretim sağlanır. | Kapasite faktörünün artışı (esneklik). |
| Nehir Tipi Santrallerin (NHES) Kurulması: Türbinlerde Kurulu Gücün Artırılması (Yeni ve/veya Ek Makineler) | Yağışlı mevsimde savak taşmasının azalması nedeniyle üretim artışı, akış süresi eğrisinde, kurulu türbin deşarj kapasitesinin değişimine bağlı kazanç | Esneklik, nehir tipi santraller büyük akarsularda seriler halinde kurulduğunda günde yaklaşık 1 saatlik güç artışı sağlar. |
| Rezervuar Tipi Santral (RHES): Yeni Bir Santral ile Paralel Bir Su Yolu Sistemi Ekleyerek Kurulu Gücün Artırılması | Yüksek düşüye sahip RHES' de kurulu güç, yılda yaklaşık 2000 saatten az çalışan projelerde güçlü şekilde azalarak yılda 1000 saatten az çalıştırılır. | Yeni su yolu sistemlerindeki sürtünme kayıpları nedeniyle küçük kazanç (<%2) sağlar. |
| Yıllık Su Giriş Kapasitesinin Artırılması | Üretim artışı sağlar ancak nehirden su çekilmesi gerektirir. | Tepe dönemlerde (enerji talebinin fazla olduğu dönemlerde) üretim artışı sağlar (esneklik). |
| Başlatma ve Durdurma İyileştirmesi | 1 başlatma ve durdurma = 15 saatlik ömür azalması sağlar. | Esneklik ve daha az hasar sağlar. |

XFLEX HYDRO Projesi

XFLEX HYDRO projesi, hidroelektrik santrallerin esnekliğini artırmayı hedefleyen yenilikçi bir girişimdir. XFLEX HYDRO, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu

kolaylaştırarak, enerji arzının sürdürülebilirliğini ve güvenilirliğini sağlamaktadır. Proje kapsamında hidroelektrik santrallerdeki enerji üretim süreçlerine akıllı teknoloji ve sistemler entegre edilmiştir ve “değişken hız birimleri”, “hidrolik kısa devre”, “batarya enerji depolama sistemi ile hibritleşme” ve “akıllı santral denetleyicisi” olmak üzere 4 ana teknolojiye odaklanmıştır. Bu teknolojiler Fransa, Portekiz ve İsviçre’de 7 ayrı santralde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda geliştirilen yan hizmetler servisleri olarak adlandırılan bir tabloda [14] özetlenmiştir. Proje kapsamında esneklik çalışmalarına katkı sağlayan başta “Teknik Beyaz Doküman” [15] ve “Hidroelektrik Esneklik Teknolojilerinin Dağıtımına Yönelik Öneriler” [16] olmak üzere birçok rapor ve bilimsel çalışma ortaya konmuştur.

Diğer Projeler

Avustralya'da yürütülen Snowy 2.0 projesi, hidroelektrik santrallerin kapasitesini ve esnekliğini artırmayı hedeflemektedir. Bu proje, iki mevcut rezervuarı 27 kilometrelik tünellerle bağlayarak pompaj depolamalı hidroelektrik santrali inşa etmeyi kapsamaktadır. Projeye, enerji piyasasında kararlılığı ve güvenliği artırmak amaçlanmaktadır [17]. Avrupa Yeşil Anlaşmasıyla [18], Avrupa'da hidroelektrik santrallerin esnekliğinin artırılması hedeflenmektedir. Bu proje, gelişmiş enerji depolama çözümleri ve kontrol sistemleri kullanarak hidroelektrik santrallerin operasyonel verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Anlaşmayla, 2050 yılına kadar enerji arz güvenliğine katkıda bulunarak yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunun kolaylaştırılması hedeflenmektedir. Norveç merkezli bir devlet enerji şirketi Statkraft ise yaklaşık 6 milyar Euro bütçesiyle 2024'te bir yatırım programı sunmuştur. Programda, Norveç'te bulunan hidroelektrik santrallerin kapasitelerinin yükseltmeleri için 1,8 - 3 milyar Euro, barajların rehabilitasyonu ve eski santrallerin modernizasyonu için 1,2 - 2 milyar Euro ayrılmıştır. Bu yatırımlar sayesinde, hidroelektrik kapasitesinin 1.500-2.500 MW artırılması yani kurulu kapasitede %20'den fazla artış hedeflenmektedir [19].

Bilimsel Çalışmalar

Santrallerde esnekliği artırmaya yönelik yapılan bilimsel çalışmalar, enerji üretim ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji depolama çözümleri ve merkezi olmayan üretim modelleri gibi

konuları ele almaktadır. Bilimsel araştırmalar, enerji sistemlerinin esnekliğini artırmak için gerekli olan teknik ve stratejik bilgileri sağlamaktadır. Bu sayede, enerji arzının sürdürülebilirliği ve güvenilirliği sağlanmaktadır.

Yukarıda belirtilen projeler ve çalışmalar, santrallerdeki esnekliğin artırılması için farklı yaklaşımlar ve teknolojiler kullanılmaktadır. Bu projeler, enerji sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırarak, enerji arzında esneklik sağlamaktadır.

TARTIşMA VE SONUÇ

Bu bildiri de hidroelektrik santrallerde esnekliği etkileyen parametrelerden ve esnekliği arttırmak için stratejilerden bahsedilmektedir. Esnek, sürdürülebilir ve dayanıklı hidroelektrik enerjinin, elektrik şebekelerinin esnekliğini artırma ve enerji geçişini destekleme potansiyeline sahip olduğu ve santrallerdeki esnekliği arttırmak için ülkelerin enerji politikalarını da gözden geçirmesinin önemi vurgulanmıştır. Özellikle 2019 yılında başlayan küresel pandemiden sonra yaşanan enerji krizinde, hidroelektrik santrallerin ne kadar kilit oyuncu olduğu anlaşılmıştır. Çalışmada ayrıca bazı ülkelerde enerji esnekliğini artırmaya yönelik yaptığı çalışmalara da kısaca değinilmiştir. Hidroelektrik santrallerin, şebekelere sağladığı esneklik konusunda çok fazla sayısal veri bulunmamakla birlikte, 2021 yılında başlanan XFlex Hydro projesi ile inşa edilen 7 santral ile ilgili çalışmalar ve esneklik hizmetine katkılarında bahsedilmiştir.

Hidroelektrik santrallerin genellikle 3 dakikadan kısa sürede devreye girebildiği ve minimum %35-45 yüklerde çalışabildiği bilinmektedir. Bu nedenle, daha yüksek rampa hızları nedeniyle hidroelektrik santraller, sistem ihtiyaçlarını karşılamak için üretimlerini hızla değiştirebilirler. İletim şebekesi operatörlerine, elektrik üretiminin gün boyunca talepteki değişikliklere göre eşleştirilmesini içeren yük takibi gibi birçok değerli hizmeti sağlayabilir ve stabiliteyi korumak için şebeke frekansındaki değişikliklere yanıt veren frekans düzenlemesi de sunabilirler. Bildiri de düşük talebin olduğu dönemlerde fazla enerjiyi depolamasına ve talebin yoğun olduğu saatlerde serbest bırakmasına olanak tanıyan pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin öneminden bahsedilmektedir. Dijitalleşme, hidroelektrik santrallerin yenilenmesi ve modernizasyonu yoluyla verimliliği optimize etme fırsatlarının yanı sıra, güç sistemindeki esnekliğin kullanımını ve arttırılmasını da sağlamakta, şebeke esnekliğini arttırmakta, şebekedeki dengesizlikleri azaltmakta ve derin karbonsuzlaştırmayı destekleyen başlıca faktörlerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak hidroelektrik santraller, Avrupa Birliği'nin sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmasına yardımcı olan önemli bir enerji kaynağıdır. Bu sebeple santrallerdeki esneklik çalışmaları bu hedeflere ulaşma noktasında da önemli parametrelerden biridir.

KAYNAKLAR

- [1] EPDK, “ELEKTRİK PİYASASI ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNDE DEĞİŞİKLİK YAPILMASINA DAİR YÖNETMELİK”. 2008. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/02/20080220-2.htm>
- [2] A. A. Sertkaya, M. Saraç, ve M. A. Omar, “POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLERİNİN TÜRKİYE İÇİN ÖNEMİ”, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 1, sy 3, ss. 369-382, 2016.
- [3] P. March, “Flexible operation of hydropower plants”, Electric Power Research Institute.(EPRI), Palo Alto, CA, Tech. Rep, 2017.
- [4] U.S. Department of Energy, “Santrallerdeki esnekliği arttırmaya yönelik stratejiler”, Strategies to Increase Hydropower Flexibility. Erişim: 04 Ağustos 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://energycommunities.gov/funding-opportunity/strategies-to-increase-hydropower-flexibility/>
- [5] HydroFlex, “Increasing the value of Hydropower through increased Flexibility”. Erişim: 04 Ağustos 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cordis.europa.eu/project/id/764011>
- [6] XFLEXHYDRO, “Hydropower Extending Power System Flexibility”, Hydropower Extending Power System Flexibility. Erişim: 04 Ağustos 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cordis.europa.eu/project/id/857832>
- [7] IEA Hydropower, “Flexible hydropower providing value to renewable energy integration”, IEA, IEA HYDROPOWER ANNEX IX WHITE PAPER NO 1, 2019. Erişim: 04 Ağustos 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.ieahydro.org/media/51145259/IEAHydroTCP_AnnexIX_White%20Paper_Oct 2019.pdf
- [8] O. Saberi, P. Storli, ve K. Alfredsen, “New technology to increase hydropower plant operational flexibility”, Int. J. Hydraul. Eng, c. 10, ss. 1-7, 2021.
- [9] Z. Wu, Y. Feng, X. Li, ve B. Yuan, “Flexibility definition and improvement of pumped hydro storage: A techno-economic analysis”, Journal of Energy Storage, c. 93, s. 112078, 2024.

- [10] U. Stiubiener, T. C. da Silva, F. B. M. Trigoso, R. da Silva Benedito, ve J. C. Teixeira, “PV power generation on hydro dam’s reservoirs in Brazil: A way to improve operational flexibility”, *Renewable Energy*, c. 150, ss. 765-776, 2020.
- [11] M. Crona, “Evaluation of flexibility in hydropower stations”, 2012.
- [12] IEA (International Energy Agency), “Technology Roadmap: Hydropower”, 2012.
- [13] E. Quaranta vd., “Assessing the energy potential of modernizing the European hydropower fleet”, *Energy Conversion and Management*, c. 246, s. 114655, 2021.
- [14] XFLEXHYDRO, “Ancillary Services Matrix - Stage 2”. Erişim: 05 Ağustos 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.xflexhydro.com/knowledge/ancillary-services-matrix-stage-2>
- [15] EPFL, “Technical White Paper”, 10.3, 2024.
- [16] XFLEX HYDRO, “RECOMMENDATIONS TOWARDS INDUSTRIAL DEPLOYMENT OF HYDROPOWER FLEXIBILITY TECHNOLOGIES”, IHA, 11.8, 2024.
- [17] D. Holmes, B. Garas, ve L. M. Richardson, “Australian Newspaper Framing of Renewables: The Case of Snowy Hydro 2.0”, *Environmental Communication*, c. 16, sy 1, ss. 23-42, 2022.
- [18] J.-J. Fry, A. Schleiss, ve M. Morris, “Hydropower as a catalyst for the energy transition within the European Green Deal: Part I: Urgency of Green Deal and role of Hydropower”, program adı: Proceedings of the 27th ICOLD Congress-Sharing water: Multi-purpose of Reservoirs and Innovations, 2022, s. article-04015.
- [19] Marte Lerberg Kopstad, “Statkraft is planning record investments in Norwegian hydro and wind power”, statkraft. Erişim: 05 Ağustos 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.statkraft.com/newsroom/news-and-stories/2024/statkraft-is-planning-record-investments-in-norwegian-hydro-and-wind-power/#:~:text=Statkraft%20is%20planning%20record%20investments%20in%20Norwegian%20hydro%20and%20wind%20power,-08%20Jan%2C%202024&text=Statkraft%2C%20Europe's%20largest%20renewable%20energy,of%20new%20onshore%20wind%20farms>.

129: Makine Öğrenmesi ile PTF'nin Tahmin Edilmesi: Türkiye Örneği**Mustafa Çağrı Peke**

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara

Sinan Sodan

T.C. Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı,

Fuat Oğuz

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İktisat Bölümü, Ankara

ÖZET

Bu çalışma, Türkiye elektrik piyasasında piyasa takas fiyatının (PTF) makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin edilmesini incelemektedir. Piyasa katılımcılarının karar verme süreçlerinde daha doğru ve öngörülebilir fiyat tahminleri büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, 2020-2023 dönemine ait veriler kullanılarak farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile PTF tahmini yapılmıştır. Sonuçlar, rastgele orman ve ağaç topluluğu yöntemlerinin en yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğunu göstermektedir. Bu modeller, elektrik üretim kaynaklarının PTF üzerindeki etkilerini analiz ederek piyasa katılımcılarına stratejik kararlar alma konusunda önemli veriler sunmaktadır. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin fosil yakıtların yerini alması, talep tarafında ise elektrifikasyonun artması, piyasa dinamiklerini daha kompleks hale getirmiştir. PTF'nin doğru tahmin edilmesi, üreticiden tüketiciye kadar tüm piyasa gruplarının etkinlik temelli arz ve talebini belirlemesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, doğru tahmin edilen PTF, yatırımcılar için fırsatların görülmesine, tüketiciler için elektrik maliyetlerinin öngörülebilir olmasına ve piyasa oyuncularını için daha etkin stratejiler belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Çalışmanın bulguları, makine öğrenmesi yöntemlerinin, geniş veri setleriyle çalışabilme yeteneği ve yüksek doğruluk oranları sağlaması nedeniyle piyasa tahminlerinde ekonometrik yöntemlere göre üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye'nin elektrik piyasalarının derinliği ve köklü yapısı, diğer ülke uygulamaları için yeni bakış açıları sunmaktadır. Ayrıca, elektrikli araçların yaygınlaşması ve tüketicilerin aynı zamanda üretici olmaları gibi gelişmeler, elektrik piyasalarının daha kompleks hale gelmesine yol açmıştır. Bu çalışma, makine öğrenmesi yöntemlerinin piyasa tahminlerinde nasıl etkin bir araç olarak kullanılabileceğini ve bu yöntemlerin piyasa katılımcılarına sağladığı faydaları net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zeka, Makine Öğrenmesi, Organize Elektrik Piyasası, Piyasa Takas Fiyatı

ABSTRACT

This study examines the prediction of market clearing prices (MCP) in the Turkish electricity market using machine learning methods. Therefore, more accurate and predictable price forecasts are crucial for market participants' decision-making processes. Data from the period 2020-2023 were used to estimate MCP using various machine learning algorithms. The results indicate that the random forest and ensemble tree methods achieved the highest accuracy rates. These models analyze the effects of electricity generation sources on MCP, providing significant data for market participants to make strategic decisions. The replacement of fossil fuels with renewable energy in electricity generation and the increase in electrification on the demand side have made market dynamics more complex. Accurate prediction of MCP helps all market groups, from producers to consumers, to determine their supply and demand based on efficiency. Additionally, accurately predicted MCP assists investors in identifying opportunity, consumers in forecasting electricity costs, and market players in developing more effective strategies. The findings of this study demonstrate that machine learning methods are superior to econometric methods in market predictions due to their ability to work with large datasets and provide high accuracy rates. The depth and established structure of Turkey's electricity markets offer new perspectives for applications in other countries. Furthermore, developments such as the proliferation of electric vehicles and the rise of prosumers have made electricity markets more complex. This study clearly demonstrates how machine learning methods can be effectively used in market predictions and the benefits these methods provide to market participants.

Keywords: Artificial Intelligence, Machine Learning, Wholesale Electricity Market, Market Clearing Price

GİRİŞ

Elektrik piyasaları yıllar içerisinde dönüştürülmüştür. Bu dönüşümün sonucu olarak elektrik piyasalarının serbestleşmesi ile fiyatların maliyetleri yansıttığı ve etkinliğin ön planda olduğu bir piyasa yapısı hedeflenmiştir. Fiyatların piyasa oyuncuları için gerçekçi bir sinyal oluşturması serbestleşmenin en önemli sonuçlarından birisini durumundadır. Bu kapsamda, piyasa takas fiyatı (PTF) serbestleşmenin en belirgin faktörü olarak ortaya çıkmaktadır. PTF'nin arz ve talep dengesi sonucunda oluşması, alıcı ve satıcıların kararlarını maliyet esaslı olarak vermelerini teşvik etmiştir.

Elektrik piyasasının genişlemesi ve ilerlemesi PTF'nin belirleyicilerinin de dönüşmesine neden olmaktadır. Teknolojik ilerlemeler elektrik piyasalarını daha liberal bir hale getirmektedir. Dikey bütünleşik yapıda olan elektrik piyasaları zaman içerisinde gerçekleştirilen reformlar sayesinde tüm piyasa katılımcılarını bünyesine katan liberal bir yapıya ulaşmıştır [1]. İlerleyen teknoloji neticesinde elektrik talebi sürekli artmaktadır. Dünyada da ekonominin liberalleşmesi enerji alışverişi için bir yapının oluşması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Borsa benzeri yapıların kurulması enerji ticaretini kolaylaştırmaktadır. Bu bağlamda ülkeler kendi enerji piyasalarını oluşturmaktadır. Enerji teknolojilerindeki ilerlemelerle beraber üretim tarafında yenilenebilir enerjinin fosil yakıtların yerini almaya başlamıştır. Talep tarafında ise tüm sektörlerin elektrifikasyonu ile yeni dinamikler oluşmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması ve tüketicilerin aynı zamanda üretici olmaları gibi gelişmeler elektrik piyasalarının daha kompleks hale gelmesine yol açmıştır.

PTF'nin doğru tahmin edilebilmesi, piyasa katılımcılarının kaynaklarını daha verimli kullanabilmesine yardımcı olmaktadır. Üreticiden tüketicilere kadar her piyasa grubu, etkinlik temelli olarak arz ve talebini belirlemektedir. Bu ise ülke kaynaklarının verimsiz üretim ve tüketim faaliyetleri ile verimsizliğin önüne geçilmesine yardımcı olacaktır. PTF'nin daha doğru tahmin edilmesi; yatırımcılar açısından fırsat pencerelerinin görülmesine, tüketici açısından elektrik maliyetinin öngörülebilir olmasına ve piyasa oyuncuları açısından daha etkin strateji belirlenmesine yardımcı olacaktır. Bunlara ek olarak, öngörülebilir PTF kullanarak karar veren piyasa oyuncuları sayesinde fiyatın oynaklığının düşeceği ve ekonomik kayıpların azalacağı öngörülmektedir.

Organize elektrik piyasalarında fiyat analizlerinde makine öğrenmesi yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır [2], [3], [4], [5], [6]. PTF'nin doğru tahmini ve etkin arz-talep dengesinin

sağlanabilmesi sektörde yatırımların ve rekabetin artırılmasına katkı sağlamaktadır [7], [8]. Bu amaçla makine öğrenmesi yöntemlerinin ekonometrik yöntemlere göre avantaj ve dezavantajlarının piyasa verisi ile kapsamlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir [9], [10], [11].

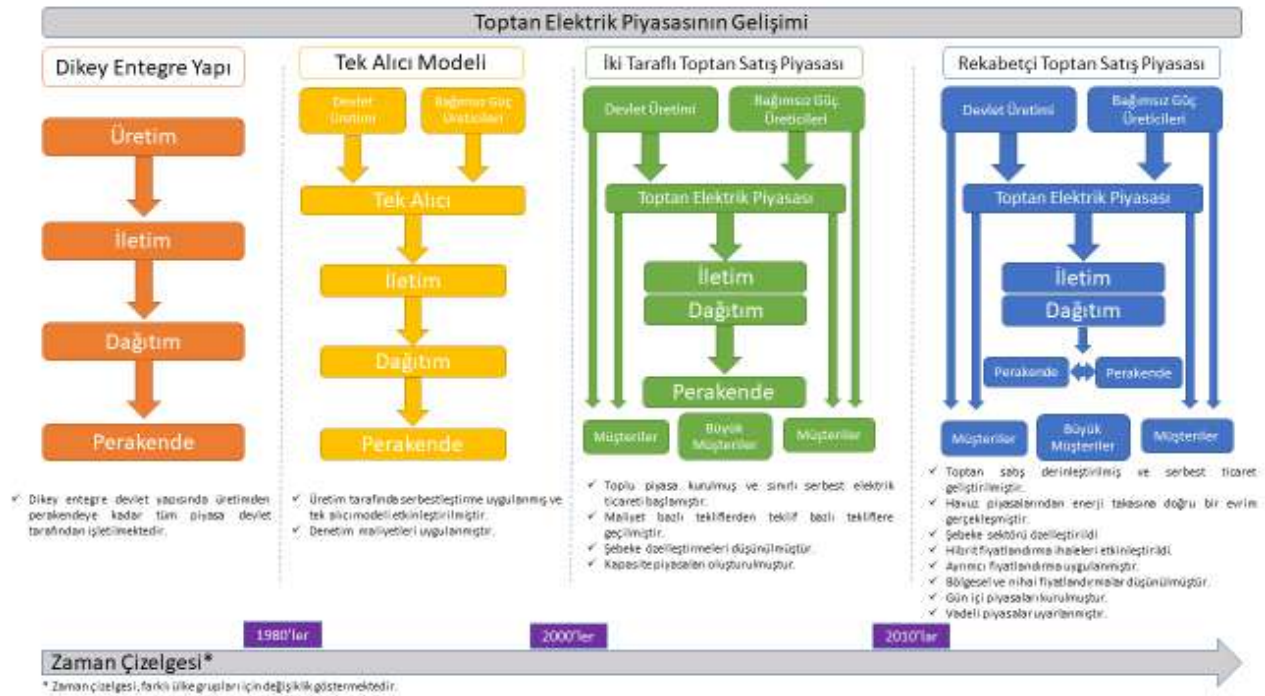
Bu çalışmanın amacı, farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak PTF seviyesinin ve değişim yönünün tahmin edilmesidir ve farklı makine öğrenmesi metotlarının organize elektrik piyasalarındaki performansını ölçülmesidir. Bu modellerde numerik tahminler ile sınıf tahminleri denetimli öğrenme algoritmalarıyla analiz edilmiştir. Gradyan artırılmış, rastgele orman, polinom ağacı, regresyon ağacı, çok katmanlı algılayıcı ve naive bayes algoritmaları Türkiye için 2020-2023 aralığında ilk kez kullanılmıştır. Birçok algoritmanın kullanılması makalenin literatüre katkılarında biridir. Ayrıca, Türkiye gibi gelişmekte olan bir ülke için oluşturulan tahmin modelleri diğer gelişmekte olan ülkeler için referans niteliğindedir. Türkiye organize piyasalarının derinliği ve köklü yapısı diğer ülke uygulamaları için yeni bakış açıları sunmaktadır. Türkiye'nin bir diğer önemli özelliği ise elektrik üretiminde fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye hızlı dönüşüm içerisinde olmasıdır. Ayrıca, talep tarafındaki elektrikli araçların sisteme adaptasyonu Türkiye PTF'nin araştırılmasının önemini artırmaktadır. Bu hususların yanı sıra, tahmin algoritmalarının çalıştırıldığı dönem Kovid 19 pandemisinin elektrik tüketimini düşürdüğü dönemi kapsamaktadır. Bunun yanı sıra, Rusya-Ukrayna savaşı ve ekonomik belirsizlikler piyasaya fiyatının normal dönemlerde farklılaşmasına neden olmuş ve bu dönemi araştırmaya değer kılmıştır. Bu bilgiler ışığında 2020-2023 döneminin PTF'nin makine öğrenmesi metotları ile çalışılması literatüre ciddi katkı sağlamaktadır.

Makalenin ikinci bölümünde organize elektrik piyasası ve PTF anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde makine öğrenmesi yöntemlerine ilişkin literatür ve metodolojiden bahsedilmektedir. Sonraki bölümde bulgular ve modellerde kullanılan değişkenlerin etkisinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Beşinci bölümde ise bulguların etkileri ve PTF tahmininin faydaları ifade edilmektedir. Makale sonuç bölümüyle tamamlanmaktadır.

ORGANİZE ELEKTRİK PİYASASI VE PİYASASI TAKAS FİYATI

Makalenin bu bölümünde organize elektrik piyasalarının oluşumu, gelişimi ve PTF'nin farklı piyasa oyuncuları açısından öneminden bahsedilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, elektrik ticaretinin dönüşümü geçtiğimiz 50 yıllık dönemde gerçekleşmektedir. İlk aşamada üretimden tüketime elektrik ticareti dikey bütünleşik yapıda devlet tarafından tüketiciye ulaştırılmaktadır. Sonrasında, devlet tek satın alıcı olarak kalmasına rağmen elektrik üretiminde özel elektrik üreticileri devlet üretiminin yanına eklenmektedir. Sonrasında, perakende piyasasında ve tüketici tarafında toptan satış konsepti gelmektedir. Toptan satıcıların elektrik ticaretini hareketlendirmesi organize elektrik piyasalarının oluşmasını sağlamaktadır. Son aşamada, bir çok ülkede perakende elektrik satışı ile elektrik dağıtımını özel şirketler eliyle yapılmaya başlanmaktadır.

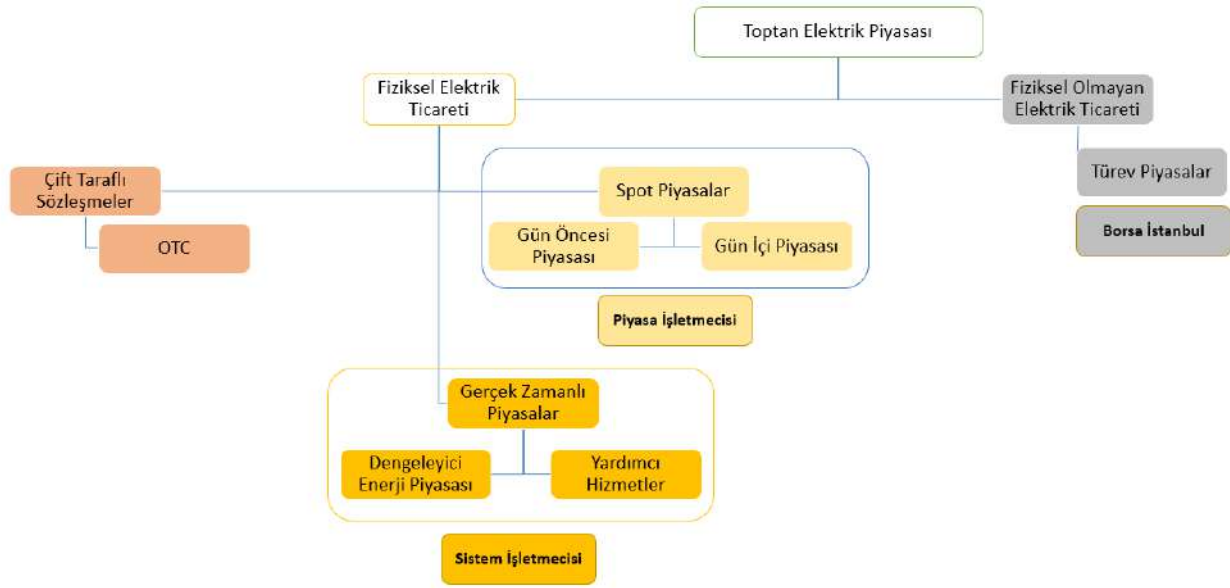
Şekil 1: Organize Elektrik Piyasalarının Dönüşümü [12]



Kaynak: Peker ve Sivrikaya, 2023a.

Türkiye elektrik ticaretinin yapıldığı piyasa yapısının güncel durumu Şekil 2'de gösterilmektedir. Elektrik ticareti fiziksel ve fiziksel olmayan şekilde yapılmaktadır. Fiziksel tarafta ikili anlaşmalar, spot piyasa, gerçek zamanlı piyasa yer almaktadır. Diğer tarafta ise türev piyasalar vardır.

Şeki 2: Türkiye Organize Elektrik Piyasasının Yapısı [13]



Kaynak: Oguz ve Peker, 2023.

Elektrik sektöründe organize piyasa yapısı, sektörün verimli çalışması için hayati öneme sahiptir. Organize elektrik piyasaları, enerji arz ve talebini eşleştirmek için merkezi açık artırma ve piyasa dengeleme süreçlerini kullanarak verimli işlemler ve fiyat keşfi sağlar [14]. Vadeli işlem borsaları ve spot piyasalar gibi finansal ticaret ve dengeleme mekanizmaları, elektrik ticaretinin sorunsuz işlemesi için kritik öneme sahiptir [15]. Elektrik sektöründeki organize piyasalar, enerji şirketlerinin karar verme süreçlerini etkileyen fiyat duyarlı talep ve uzun vadeli toptan satış sözleşmelerini desteklemektedir [16]. Elektrik fiyat tahmini, bu oyuncular için stratejilerini ve ticaret kararlarını etkileyerek temel bir rol oynamaktadır [17], [18]. Elektrik piyasalarının organizasyonu, liberalleşme ve piyasa reformları için hayati öneme sahiptir. Elektrik piyasası liberalleşmesinden çıkarılan dersler, etkili rekabet ve piyasa verimliliğini sağlamak için üretici piyasa gücü, iletim kısıtlamaları ve talep esnekliği gibi konuların ele alınmasının önemini vurgular [6]. Ulusal elektrik piyasaları arasındaki fiziksel bağlantılar ve teknik düzenlemeler, bölgeler arasında entegrasyon ve uyumu teşvik etmek için anahtar rol oynar [19]. Sonuç olarak, organize elektrik piyasaları, enerji sektöründe rekabetin, verimliliğin ve şeffaflığın teşvik edilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu piyasalar, fiyat keşfini sağlayarak, ticaret mekanizmalarını destekleyerek ve piyasa katılımcılarının bilinçli kararlar almasına yardımcı olarak, elektrik kaynaklarının güvenilir bir şekilde tedarik edilmesini ve optimum kullanımını sağlar.

Piyasada oluşan PTF piyasada katılımcıları için referans fiyat konumundadır. Piyasa katılımcılar bu fiyatları referans alarak hareket etmektedir. Gün öncesi piyasasında arz ve talebe göre oluşan PTF üreticilerin üretimi artırma ya da azaltmasına karar vermesinde büyük rol oynamaktadır. Aynı zamanda saatlik bazda oluşan fiyatların gelecek dönem fiyatlarının tahmin edilebilmesini sağlamakta buna göre de ikili anlaşmaların optimum bir fiyat üzerinden yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda sürekli olarak değişen piyasa fiyatının analizinin yapılması ve fiyata etki eden faktörlerin tespiti önemlidir. Bu doğrultuda çeşitli yöntemler kullanılarak piyasa fiyatının analizine yönelik birçok çalışma tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda geleneksel ekonometrik analiz yöntemlerin yerine makine öğrenmesi metotları da kullanılmıştır.

PTF'nin arz tarafı, talep tarafı ve tüm piyasaya sinyal oluşturması yönüyle ele alınması öneminin daha net anlaşılması açısından değerlidir. Elektrik piyasalarında üreticiler elektriği satabilecekleri en yüksek fiyatta satmak istemekteyken tüketiciler ise alabilecekleri en düşük fiyattan elektrik satın almak istemektedirler. Dolayısı ile bu piyasa anlaşmalara dayalı bir sistemden oluşmaktadır. Piyasanın başlangıcı üreticilerin ne miktarda elektriği hangi fiyattan sisteme teklif etmesi ile başlamaktadır [20]. Üreticiler saatlik bazda oluşan talebi karşılama esasında piyasada faaliyet göstermektedirler. Üretim maliyetlerine göre oluşan basamaklı arz eğrisi PTF'nin meydana gelmesinde etkili olmaktadır. Farklı üretim kaynaklarının organize elektrik piyasasında yarattıkları etkiler piyasayı kompleks hale getirmektedir. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynaklarında yatırım maliyetleri işletme maliyetlerine göre çok yüksek seviyede kalmaktadır. Bunun yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının oynak üretim patikaları organize piyasada fiyatı kontrol edilemez bir şekilde etkilemektedir. Ancak, Türkiyede Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması gibi alım garanti modellerinin kullanılması rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji santrallerinin organize piyasaya etkilerinin doğalgaz veya kömür santrallerine göre daha zayıf etkiye sahip olmasına yol açmaktadır. Türkiye açısından hidroelektrik santraller organize piyasaya dahil olarak fiyatı düşürücü etki yapmaktadır. Diğer taraftan, doğalgaz ve kömür gibi baz yük santrallerinin organize piyasa fiyatı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmektedir. Yerli kömür maliyetinin düşük olmasının yanında, ithal doğalgaz ve kömür santralleri arz eğrisini kaydırarak fiyatı yukarı çekmektedir. Paris Anlaşması ile sıkılaştırılan enerji dönüşüm hedefleri üretim tarafının kompozisyonunu değiştirmektedir. Enerji dönüşümü ile, hammadde ve işletme maliyetleri yüksek olan fosil kaynaklı santrallerin yerini yatırım maliyetleri yüksek olan güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji santralleri almaktadır. Arzın talebi karşılama zorunluluğu ile şebeke açısından

güvenli tarafta kalmak için dönüşmüş üretim kompozisyonunu referans alan yeni bir piyasa yapısının tesis edilmesi önem arz etmektedir.

Talep tarafında ise mesken, ticarethane ve sanayi tüketimi ana faktörler olarak dikkat çekmektedir. Son dönemde gelişen talep tarafı katılımı ile tüketimin kaydırılması ve düzleştirilmesi hedeflenmektedir. Ancak, enerji dönüşümüyle beraber elektrikli araçlardan dolayı tüketimin artması beklenmektedir. Ayrıca, sanayinin elektrifikasyonu ile beraber elektrik kullanımında ciddi artışlar gözlemlenmektedir. Bu talep artırıcı etkilere karşın enerji verimliliği ile ciddi çözümler yaratabileceği değerlendirilmektedir. Bu yenilikler ışığında talep tarafında ortaya çıkan enerji dönüşümü yansımaları PTF'yi doğrudan etkilemektedir.

Arz ve talep dinamiklerinde yaşanan değişimlerle oluşan yeni nesil elektrik piyasalarında PTF'nin önemi artmaktadır. PTF'nin elektrik üreticileri açısından maliyetlerini karşılayabileceği ve makul kar elde edilen bir seviyede oluşması gerekmektedir. Uzun vadede ise, yatırımcı çekebilecek seviyelerde kazanç potansiyeline sahip olması gerekir. Bu bağlamda hem işletme hem de yatırım maliyetlerinin karşılanmasının önemi PTF'nin üretim tarafına verdiği sinyalin aktarım mekanizmasını oluşturmaktadır. Tüketici açısından bakıldığında ise, elektriğin sadece bir ekonomik mal olmadığı görülmektedir. Elektrik aynı zamanda politik bir maldır. Dolayısıyla, bazı ülkelerde siyasi seçim sonuçlarını değiştirebilecek seviyelere çıktığı gözlemlenmektedir. Politika yapıcı, tarifeler ve ikili anlaşmalar aracılığıyla kullanılan PTF'nin oluşum yapısı ile ilgili tasarruflarda bulunmaktadır. Piyasaya müdahalede yaygın kullanılan tavan fiyat uygulamaları PTF'yi kesikli hale dönüştürülmektedir. Ayrıca, daha yapısal değişiklikler ile dinamik fiyatlama, düğümsel fiyatlama ve bölgesel fiyatlama ön plana çıkmaktadır. Ez cümle, piyasa tasarımı arz-talep dengesinin oluşturacağı PTF üzerinde etkili olmaktadır.

YÖNTEM

Bilindiği üzere makine öğrenmesi metotları enerji piyasalarında talep, üretim, ve fiyat modellemeleriyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ghoddusi vd. (2019) çalışmalarında makine öğrenmesi metotlarının enerji ekonomisindeki uygulamalarını taranmaktadır [21]. Bu makalede en yaygın kullanılan metotlar olan ağaç algoritmaları, support vector machine, yapay sinir ağları metotlarını fiyat tahmini, talep tahmini, risk yönetimi, ticaret stratejileri alanlarında uygulandığı gözlemlenmektedir. Makine öğrenmesinin ilk çalışmalarında, 1950 ve 1960'lardan insan davranışlarını kopyalayarak verinin içerdiği bilgilerin işlenerek kullanılabilir hale gelmesini

sağlamaktadır [21]. Son yıllarda ise, makine öğrenmesi yöntemlerinin geleneksel ekonometrik yöntemlere göre birçok üstünlüklerinin olduğu ortaya koyulmaktadır. Ekonometrik analizlerin öncesinde güçlü varsayımların sağlanması gerekirken, makine öğrenmesinde bu varsayımlar yer almamaktadır [22]. Makine öğrenmesi yöntemlerinde algoritmanın davranışı öğrendiği veri ile doğruluğunu test ettiği veri ayrılmaktadır [23]. Ekonometride ise katsayıların estimate edildiği veri ile doğruluğun ölçüldüğü veri aynıdır. Makine öğrenmesi yöntemleri ekonometrik yöntemlere göre matematiksel olarak daha esnek bir yapıya sahiptir. Bunlara benzer şekilde birçok üstünlük literatürde ortaya koyulmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemlerinin performans şüpheliği [24], aşırı öğrenme (overfitting) [25], genelleme problemi [23], istatistiksel çıkarım eksikliği [26] gibi sorunları daha az sıklıkla yaşadığı, literatürde vurgulanan önemli bulgular arasındadır.

Makine öğrenmesi yöntemleri, gizli katmanlar, istatistiksel dağılımlar, ayrıştırıcılar ve kazanç fonksiyonları gibi mekanizmaları kullanmaktadır. PTF seviyesi modelinde makine öğrenmesi yöntemleri olarak, literatürde başka alanlarda yaygın kullanılan gradyan artırılmış karar ağacı [27], rastgele orman [28], ağaç topluluğu [29], basit regresyon karar ağacı [30], polinom regresyonu karar ağacı [31] kullanılmaktadır. PTF'nin değişimi (artış, azalış) için ise, literatürde yaygın kullanılan, sınıflandırma yöntemleri karar ağacı, çok katmanlı algılayıcı [32], rastgele orman [33], lojistik regresyon [34], naive bayes metotları kullanılmaktadır. Karar ağacı algoritmaları, girdi uzayını özellik değerlerine göre tekrar tekrar bölerek çalışır. Her adımda, verileri en iyi bölen özelliği seçer, bilgi kazancını maksimize etmeyi hedefler. Bu süreç, maksimum ağaç derinliğine ulaşma veya bir düğümde yalnızca bir sınıftan örnekler olması gibi bir durumla karşılaşana kadar devam eder. Bu modellerde ağaç yapısı, yeni veriler için tahminlerde bulunmak için kullanılır.

Türkiye'de PTF tahmin etme modelleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ekonometrik yöntemler ile makine öğrenmesi metotları kullanılarak yapılmış çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Lineer regresyon, polinom regresyon, çoklu regresyon, ARIMA yöntemi, XGBoost analiz yöntemi, yapay sinir ağları (ANN), uzun kısa süreli bellek (LSTM), evrişimli sinir ağları (CNN), çok katmanlı algılayıcı (MLP), geçitli tekrarlayan birim (GRU), rassal orman regresyonu ve destek vektör regresyonu yöntemleri yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır [20], [35], [36], [37], [38]. Bu çalışmalarda; yapay sinir ağları metoduyla yapılan analizin gerçeğe çok yakın fiyat tahminleri oluşturduğu ve hatalı tahmin oranının oldukça düşük olduğu [35], rastgele orman regresyonu yönteminin destek vektör regresyonuna göre tahmin performansının yüksek olduğu

[36], yapay sinir ağları yöntemin çoklu regresyondan fiyat tahmini konusunda daha başarılı olduğu [20], MLP, CNN, LSTM ve GRU modellerinin birbirine yakın ve son derece doğru tahmin performansı gösterdiği [37], XGBoost analiz yönteminin lineer regresyon, polinomial regresyon ve ANN metodlarına göre Türkiye elektrik piyasası için daha tutarlı tahminler oluşturduğu tespit edilmiştir [38]. Çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, yapılan analizlerin farklı dönemleri kapsamakla birlikte makine öğrenmesi yöntemlerinin oldukça başarılı tahminler sunduğu görülmektedir.

3.1. Makine Öğrenmesi ile PTF ve PTF Yönü (Artış/Azalış) Tahminleri

Çalışmanın ilk kısmında PTF tahmin modelleri ele alınmıştır. Ekonometrik çalışmalar ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanan çalışmalar değerlendirilmiştir. Hem PTF düzeyi hem de PTF değişiminin yönüne dönük modeller analiz edilmiştir. Literatür taramasının ardından Türkiye organize elektrik piyasasına ilişkin model geliştirilmiş ve veri seti oluşturulmuştur. PTF tahmininde bağımsız değişkenler olarak saatlik frekansta doğalgaz, hidroelektrik, kömür, rüzgar, güneş, ve diğer kaynaklardan elektrik üretimi kullanılacaktır. Bu çalışmada kullanılan veri seti EPIAŞ'ın şeffaflık platformundan temin edilmiştir. 2020-2023 dönemini kapsayan saatlik frekansta veri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak temel model şu şekildedir:

$$\text{Piyasa takas fiyatı} = f(\text{doğalgaz, hidroelektrik, kömür, rüzgar, güneş, diğer kaynaklar})$$

$$\text{Piyasa takas fiyat yönü} = f(\text{doğalgaz, hidroelektrik, kömür, rüzgar, güneş, diğer kaynaklar})$$

Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılırken farklı öğrenme ve test etme oranları farklı öğrenme seviyeleri için kullanılacaktır. Tablo 1 ve Tablo 2, çalışmaya hazırlık aşamasında yapılan ilk model uygulamasının bulgularını vermektedir.

Tablo 1: PTF Tahmin Performansları (%80 öğren - %20 test)

| Öğrenici | Gradyan Artırılmış | Rastgele Orman | Ağaç Topluluğu | Basit Regresyon Ağacı | Polinom Regresyonu |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------------|--------------------|
| Adj-R ² | 0,89 | 0,94 | 0,94 | 0,86 | 0,78 |
| MAE | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,17 |
| MSE | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,06 |
| RMSE | 0,17 | 0,12 | 0,12 | 0,19 | 0,24 |

Tablo 2: PTF Tahmin Performansları (%20 öğren - %80 test)

| Öğrenici | Gradyan Artırılmış | Rastgele Orman | Ağaç Topluluğu | Basit Regresyon Ağacı | Polinom Regresyonu |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------------|--------------------|
| Adj-R ² | 0,87 | 0,90 | 0,90 | 0,82 | 0,77 |
| MAE | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,1 | 0,17 |
| MSE | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 |
| RMSE | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,21 | 0,24 |

Modellerin öğrenme ve test etme oranları farklı olmasına rağmen model performanslarının yakın çıktığı görülmüştür. Tablo 1’de yer alan sonuçlara göre değerlendirildiğinde, rastgele orman ve ağaç topluluğu metodlarının %94 açıklama gücü ile yüksek başarı gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca gradyan artırılmış öğrenme, basit regresyon ağacı ve polinom regresyonu ağacının açıklama güçleri sırasıyla %89, %86, %78’dir. Tablo 3 ve 4’te ise PTF değişiminin sınıflandırma makine öğrenmesi metodları ile analiz sonuçları yer almıştır.

Tablo 3: PTF Değişimi Tahmin Performansları (%80 öğren - %20 test)

| | Öğrenici | Karar Ağacı | Çok Katmanlı Algılayıcı | Lojistik Regresyon | Naive Bayes |
|---------------------------|------------|-------------|-------------------------|--------------------|-------------|
| Piyasa Takas Fiyatı Artış | Duyarlılık | 0,55 | 1,00 | 0,99 | 0,05 |
| | Kesinlik | 0,55 | 0,58 | 0,42 | 0,45 |
| | F-Skoru | 0,55 | 0,74 | 0,59 | 0,09 |
| Piyasa Takas Fiyatı Düşüş | Duyarlılık | 0,68 | 0,67 | 0,44 | 0,96 |
| | Kesinlik | 0,68 | 0,45 | 0,86 | 0,58 |
| | F-Skoru | 0,68 | 0,64 | 0 | 0,73 |
| | Doğruluk | 0,62 | 0,58 | 0,42 | 0,58 |

Tablo 4: PTF Değişimi Tahmin Performansları (%20 öğren - %80 test)

| | Öğrenici | Karar Ağacı | Çok Katmanlı Algılayıcı | Lojistik Regresyon | Naive Bayes |
|---------------------------|------------|-------------|-------------------------|--------------------|-------------|
| Piyasa Takas Fiyatı Artış | Duyarlılık | 0,52 | 1,00 | 0,45 | 0,06 |
| | Kesinlik | 0,53 | 0,58 | 0,44 | 0,49 |
| | F-Skoru | 0,53 | 0,74 | 0,44 | 0,11 |
| Piyasa Takas Fiyatı Düşüş | Duyarlılık | 0,68 | 0,47 | 0,58 | 0,95 |
| | Kesinlik | 0,66 | 0,58 | 0,6 | 0,59 |
| | F-Skoru | 0,67 | 0,59 | 0,59 | 0,73 |
| | Doğruluk | 0,61 | 0,58 | 0,53 | 0,58 |

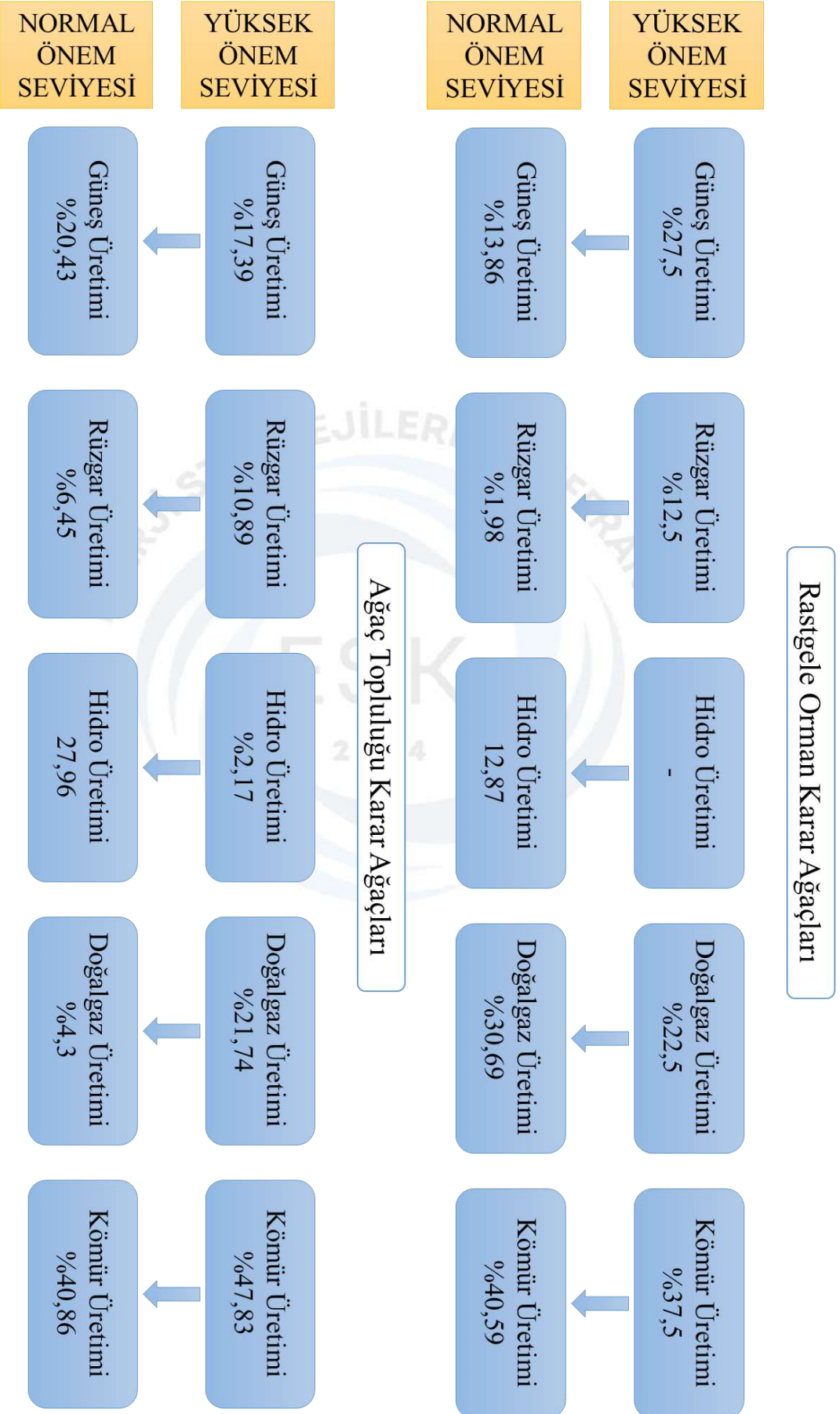
Tablo 3 ve 4’te görüldüğü üzere, sınıflandırma yöntemleri nümerik tahmin yöntemlerine göre daha başarısız olmuştur. Doğruluk çıktılarının %62 ile %40 arasında yer aldığı dört makine öğrenmesi metodunda da dikkat çekmektedir.

BULGULAR

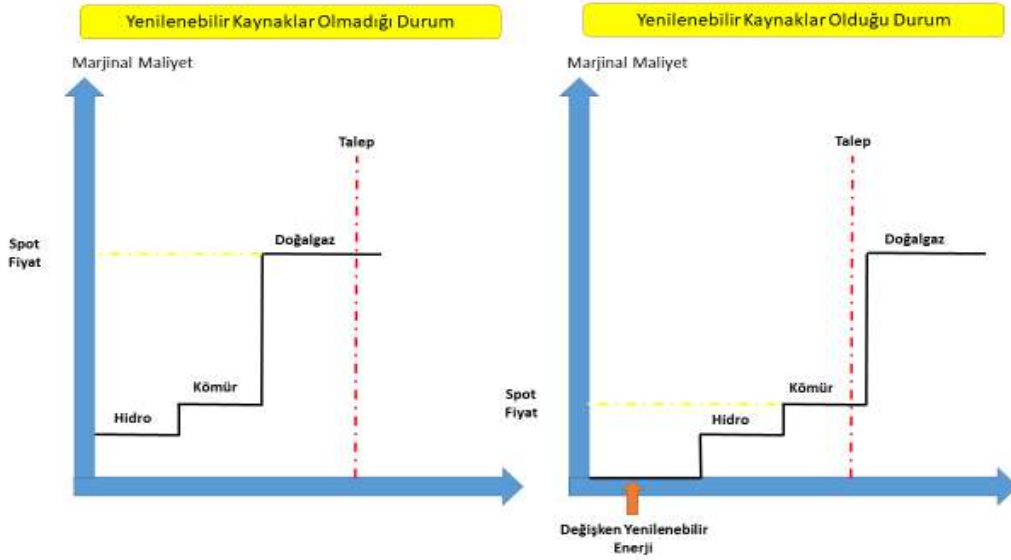
Yapılan analiz sonucunda PTF tahmin eden modellerden en güçlüleri; rastgele orman ve ağaç topluluğu karar ağaçları iken tahmin gücü en düşük modeller polinom regresyonu ve basit regresyon ağacı olarak tespit edilmiştir. Şekil 3'te rastgele orman ve ağaç topluluğu modellerinin sonuçlarında görüleceği üzere, PTF'ye farklı üretim kaynaklarının normal ve yüksek önemde etkileri olmaktadır. Güneş ve kömür santrallerinden yapılan elektrik üretimi, PTF üzerinde yüksek seviyede belirleyici etkiye sahiptir.

Güneş enerjisinden elektrik üretiminin PTF üzerine etkisi, öncelik sırası etkisi (merit order effect) ile olmaktadır [39]. Yenilenebilir enerji santrallerinden yapılan elektrik üretimi öncelik sırası etkisi yaratarak Şekil 4'te görüldüğü üzere, düşük marjinal üretim maliyeti karakteri ile arz eğrisini sağa kaydırmakta ve PTF'nin düşmesini sağlamaktadır. Ancak belli mevsimlerde ve günün belirli saatlerinde üretim yapılabilmesi, güneş enerjisinden elektrik üretimini oynak hale getirmektedir. Bu oynaklık ile beraber PTF üzerinde etkili olan güneş enerjisinden elektrik üretimi, PTF'de belirsizlik yaratmaktadır. Diğer taraftan güneş enerjisinden elektrik üretimi yapan lisanssız santrallerin talep tarafındaki teklif eğrisine negatif yönlü dahil olması talebi düşürücü etki yapmaktadır. Türkiye'deki sistemde 1 MW'nin altında kalan güneş enerjisinden elektrik üretimi yapan tesislerin sisteme hızlı bir şekilde dahil olabilmesi ve santral sahibinin elektrik talebini, dağıtım ve iletim şebekesini kullanmadan karşılayabilmesi için lisanssız elektrik üretimi konsepti oluşturulmuştur. Bu kapsamda elektrik dağıtım şirketi, kendi bölgesindeki lisanssız elektrik üretimi yapan yenilenebilir üretim santrallerin kendi ihtiyacını karşıladıktan sonra kalan üretim fazlasını satın almaktadır. Bu şekilde bölgesindeki ihtiyacın bir kısmını yenilenebilir üretim santrallerinden temin ederek bölgesindeki talebin bir kısmını karşılayan dağıtım şirketi, bu elektrik miktarını organize piyasadan yapacağı talep miktarından düşmekte ve organize piyasadan daha az elektrik talebinde bulunmaktadır. Bu nedenle organize piyasada oluşan talep eğrisi sola kaymaktadır.

Şekil 3: Rastgele Orman ve Ağaç Topluluğu ve Gradyan Artırılmış



Şekil 4: Öncelik Sırası Etkisi Gösterimi [39]



Kaynak: Peker ve Sivrikaya, 2023b.

Diğer önemli elektrik üretim kaynaklarından olan kömür santrallerinin, PTF üzerine etkisinde birçok faktör ön plana çıkmaktadır. Öncelikli olarak yerli kömürden üretim yapan santrallerin kaynak maliyeti ithal kömür kullanan santrallere göre daha düşüktür. Dolayısıyla yerli kömür kullanan santrallerin yoğun olarak devreye girdiği saatlerde PTF ucuz kömür maliyeti nedeniyle düşmektedir. İthal kömür kullanan santraller ise ulaşım maliyetlerinin eklenmesiyle daha yüksek maliyet ile arz eğrisini etkilemektedir. Kömür fiyatının uzun dönemli sözleşmelerde dahi brent petrol ve Dutch TTF doğalgaz fiyatına referanslanması, ithal kömür kullanan santral tekliflerinde daha oynak bir yapıyı ortaya çıkarmaktadır.

Kömür kullanan santrallerin ardından PTF üzerinde etkili olan santrallerin başında doğalgaz santralleri gelmektedir. Türkiye'deki doğalgaz santralleri yüksek maliyetlerinden dolayı PTF'yi yükseltmektedir. Uzun dönemli sözleşmelerde doğalgaz fiyatları üzerinde dinamik Dutch TTF fiyatı baz alınmaktadır. Dolayısıyla doğalgaz maliyeti uluslararası dinamiklerden yoğun şekilde etkilenmektedir. Özellikle son dönemde, Rusya-Ukrayna savaşının etkisiyle hem doğalgaz fiyatı artmış hem de yüksek oynaklık göstermiştir. Ayrıca elektrik talebi arttıkça yüksek maliyetli doğalgaz santrallerinin devreye girmesi, PTF'yi artırmaktadır. Diğer taraftan doğalgaz ticaretindeki çeşitliliği artırmak üzere Türkiye'de LNG terminallerine yatırım yapılmaktadır. Bu yatırımlar neticesinde artan LNG ticareti ile doğalgaz tedariği, arz güvenliği açısından daha esnek hale gelmiştir. Bu bağlamda doğalgaz fiyatının dinamikleri geçmiş dönemlere göre farklılaşmaktadır.

Analiz sonuçlarına göre oluşturulan Şekil 3'te ağaç topluluğu karar ağaçları modelinin sonuçları incelendiğinde; kömür, doğalgaz ve güneş enerjisi üretiminin PTF'nin oluşumunda önemli etkiye sahip olduğu görülmekle birlikte rüzgar ve hidroelektrik üretiminin de PTF'nin oluşumunda etkiye sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu modellerin farklı algoritmalar kullanarak rastgele orman karar ağaçlarıyla benzer sonuçlara ulaşılması önem arz etmektedir. Rüzgar santralleri doğası gereği tahmin edilmesi oldukça güç üretim paternine sahiptir. Bu nedenle rüzgar santrallerinin saatlik üretimlerinin öngörülmesi zordur ve oynak bir yapıdadır. Hidroelektrik santrallerinde ise su rejiminin değişimi, PTF üzerindeki düşürücü etkiyi oynak hale getirmektedir. Ancak hidroelektrik santrallerinin rezervuarlı olanları da baz yük santrali gibi çalışabilmektedir. Düşük maliyetli rüzgar ve hidroelektrik santralleri arz eğrisini sağa kaydırarak PTF'nin daha düşük bir dengede oluşmasını sağlamaktadır.

Analizlerde regresyon modelleri kullanılmıştır. Bu regresyon modellerinde kullanılacak değişken seçimleri için yapılan analiz sonuçları Tablo 5'te sunulmaktadır. Analiz sonuçlarına göre doğalgaz ve hidroelektrik santrallerinin PTF üzerindeki etkisi dikkat çekmektedir. Regresyon modellerinin algoritmaları için kullanılan değişkenlerin tamamı, farklı algoritmalarda ve farklı zaman dilimlerinde etkilere sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 5: PTF Tahmininde Değişken Seçimi

| Değişken Sayısı | R ² | Seçilen Değişkenler | | | | | | |
|-----------------|----------------|---------------------|--------|--------|--------|-------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 6 | 0.75 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Dyen | Dfos | |
| 7 | 0.74 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dyen | Dfos |
| 6 | 0.73 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Güneş | Dyen | Dfos | |
| 6 | 0.72 | Doğalgaz | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dyen | Dfos | |
| 5 | 0.70 | Hidro | Kömür | Güneş | Dyen | Dfos | | |
| 4 | 0.70 | Doğalgaz | Rüzgar | Dyen | Dfos | | | |
| 4 | 0.69 | Doğalgaz | Hidro | Dyen | Dfos | | | |
| 4 | 0.67 | Kömür | Rüzgar | Dyen | Dfos | | | |
| 6 | 0.66 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dyen | |
| 4 | 0.65 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Dyen | | | |
| 2 | 0.59 | Kömür | Dyen | | | | | |
| 6 | 0.56 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dfos | |
| 5 | 0.55 | Doğalgaz | Hidro | Rüzgar | Güneş | Dyen | | |
| 5 | 0.55 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Güneş | Dfos | | |
| 5 | 0.54 | Doğalgaz | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dfos | | |
| 5 | 0.54 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Dfos | | |
| 4 | 0.54 | Doğalgaz | Kömür | Rüzgar | Dfos | | | |
| 5 | 0.51 | Doğalgaz | Hidro | Rüzgar | Güneş | Dfos | | |
| 4 | 0.50 | Hidro | Kömür | Rüzgar | Dfos | | | |

Diğer taraftan Tablo 6’da görüldüğü üzere, basit ve polinom regresyon sonuçlarında üretim katsayılarının önemi kömür, hidroelektrik, doğalgaz, rüzgar, güneş şeklinde sıralanmaktadır. Bu sonuçlar kömür ve doğalgazdan yapılan elektrik üretiminin PTF’nin oluşumu üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Karar ağaçlarından farklı olarak ise hidroelektrik üretimi ön plana çıkmaktadır. Kullanılan makine öğrenmesi modellerinin değişmesi ile birlikte algoritmaların da değişiyor olması, üretim kaynaklarının etkilerini farklılaştırmaktadır. Ancak, basit ve polinom regresyon ağaçları algoritmalarının PTF’yi açıklama gücü, rastgele orman ve ağaç topluluğu karar ağaçları algoritmalarına göre düşük çıkmaktadır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere basit ve polinom regresyon ağaçları algoritmaları, rastgele orman ve ağaç topluluğu karar ağaçları algoritmalarında önemli etkiye sahip olan güneş santrallerini düşük öneme sahip olarak değerlendirmiştir. Bu nedenle basit ve polinom regresyon ağaçları algoritmalarının açıklama gücünün diğer modellere göre düşük çıkmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 6: Basit ve Polinom Regresyon Ağaçları

| Değişken | Katsayı | Std. Hata | p-değeri | Önem Sırası |
|----------------------------|---------|-----------|----------|-------------|
| Kömür | 32.75 | 0.93 | 0 | 1 |
| Kömür ² | -3.91 | 0.12 | 0 | 1 |
| Hidroelektrik | -1.58 | 0.15 | 0 | 2 |
| Hidroelektrik ² | 0.26 | 0.02 | 0 | 2 |
| Doğalgaz | 0.91 | 0.12 | 0 | 3 |
| Doğalgaz ² | -0.06 | 0.02 | 0 | 3 |
| Rüzgar | -0.35 | 0.08 | 0 | 4 |
| Rüzgar ² | 0.06 | 0.01 | 0 | 4 |
| Güneş | 0.01 | 0.00 | 0 | 5 |
| Güneş ² | 0.01 | 0.00 | 0 | 5 |

Bu kısma kadar yapılan analizlerde doğrudan PTF tahmini yapılmıştır. Bu kısımda ise PTF’nin bir önceki saate göre artışı 1, azalışı ise 0 olarak modellenerek sınıflandırma algoritmaları ile tahmin yapılmıştır. Bu dönüşümün amacı PTF’nin ne yönde hareket edeceğini tahmin etmektir. PTF’nin yönünü tahmin etme konusunda güneş enerjisinden üretimin çok etkili olduğu gözlemlenmektedir. Diğer taraftan, doğalgaz, hidroelektrik ve kömür santrallerinin üretimleri de PTF’nin yönünde etkili olmaktadır. Lojistik regresyon algoritma sonuçlarına göre güneş ve rüzgar santralleri PTF’nin yönünün belirlenmesinde yüksek etkiye sahiptir (Ek-1). Naive Bayes ve MLP sonuçları ise Ek-2 ve Ek-3’te paylaşılmaktadır. Bu algoritmaların açıklama güçlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Tablo 7’de, farklı algoritma sonuçlarına göre değişken seçimi yaptığımızda güneş ve doğalgaz santrallerinden yapılan üretim ön plana çıkmaktadır. Ayrıca kömür santrallerinin üretimi PTF’nin yönü üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Tablo 7: PTF Artış/Azalış Değişken Seçimi

| Değişken Sayısı | Doğruluk | Seçilen Değişkenler | | | | | | |
|-----------------|----------|---------------------|--------|--------|--------|-------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 0.61 | Güneş | | | | | | |
| 6 | 0.59 | Hidro | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dyen | Dfos | |
| 2 | 0.59 | Kömür | Dfos | | | | | |
| 3 | 0.59 | Doğalgaz | Güneş | Dyen | | | | |
| 3 | 0.58 | Kömür | Rüzgar | Güneş | | | | |
| 7 | 0.58 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Güneş | Dyen | Dfos |
| 2 | 0.58 | Rüzgar | Güneş | | | | | |
| 5 | 0.58 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Güneş | | |
| 3 | 0.58 | Doğalgaz | Kömür | Dyen | | | | |
| 5 | 0.58 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Güneş | Dyen | | |
| 4 | 0.58 | Hidro | Rüzgar | Güneş | Dyen | | | |
| 4 | 0.58 | Doğalgaz | Kömür | Güneş | Dfos | | | |
| 3 | 0.58 | Hidro | Dyen | Dfos | | | | |
| 1 | 0.58 | Doğalgaz | | | | | | |
| 3 | 0.58 | Kömür | Rüzgar | Dfos | | | | |
| 5 | 0.58 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Dyen | | |
| 2 | 0.58 | Kömür | Güneş | | | | | |
| 6 | 0.58 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Dyen | Dfos | |
| 3 | 0.58 | Doğalgaz | Güneş | Dfos | | | | |
| 5 | 0.58 | Doğalgaz | Hidro | Kömür | Rüzgar | Dfos | | |
| 4 | 0.57 | Doğalgaz | Hidro | Güneş | Dfos | | | |
| 3 | 0.57 | Hidro | Rüzgar | Dfos | | | | |
| 2 | 0.56 | Hidro | Kömür | | | | | |
| 6 | 0.55 | Doğalgaz | Hidro | Rüzgar | Güneş | Dyen | Dfos | |
| 2 | 0.54 | Rüzgar | Dyen | | | | | |
| 3 | 0.54 | Doğalgaz | Hidro | Rüzgar | | | | |

PIYASA TAKAS FİYATI TAHMİNİNİN FAYDALARI

PTF'nin gerçek seviyesine yakın tahmin edilmesinin üreticiler, tüketiciler ve politika yapıcılar açısından büyük faydaları bulunmaktadır. Makine öğrenmesi, PTF'nin gerçek seviyesine yakın tahmin edilmesi konusunda ekonometrik yöntemlere göre büyük avantajlar sağlamaktadır. Makine öğrenmesi yansız ve tutarlı tahmin ediciler kullanmaktadır.

Üreticiler açısından konuyu fosil ve yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten santraller olarak iki grupta ele almak faydalı olacaktır. Öncelikle, Türkiye'de yaygın kullanılan fosil yakıtlar olarak ön plana çıkan doğalgaz ve kömür ile üretim yapan santrallerin PTF'yi tahmin etmeleri, kısa vadede onların kazancının öngörülebilir olmasını sağlayacaktır. Bu sayede söz konusu santraller uzun vadeli kaynak sözleşmelerini daha sağlam temeller üzerine inşa edebilecektir. Diğer taraftan yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten santraller açısından PTF'yi tahmin etmenin faydaları, fosil yakıtlara göre kompleks geçiş mekanizmalarıyla oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji santrallerinin yatırım maliyetlerinin ve teklif mekanizmalarının fosil kaynaklardan elektrik üreten

santrallerden farklı olması, enerji dönüşümü unsurları olan dağıtık üretim ve elektrik depolama gibi unsurları barındırması, PTF'nin tahmin edilmesinin önemini artırmaktadır. Öncelikle, yenilenebilir enerji santrallerinin yatırım maliyetlerini karşılanmasında ve yatırımın kara geçmesinin öngörülmesinde PTF'nin doğru tahmin edilmesi, yatırımcı için daha belirgin bir iklimin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de yenilenebilir enerji santralleri, devlet tarafından tasarlanan destek mekanizmaları ile devreye alınmaktadır. Bu destek mekanizmalarının birçoğu PTF seviyesini baz alarak politika yapıcı tarafından oluşturulmaktadır. Dolayısıyla, piyasa yapıcının PTF'yi tahmin etmesi destek mekanizmalarının tasarımında büyük öneme sahiptir. Ayrıca, elektrik üretim santrallerinin fosil yakıtlardan yenilenebilir kaynaklara geçişi olarak tanımlanan enerji dönüşümü kapsamında, organize elektrik piyasaları da bu dönüşüme uyum sağlayacaktır. Sonuç olarak, üretici konumundaki piyasa oyuncuları için PTF'nin makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi önemli fayda sağlayacaktır.

Türkiye elektrik piyasasının tüketim tarafında ise toptan satış şirketleri ve dağıtım şirketleri etkindir. Bu şirketler için PTF'yi tahmin etmek, elektrik üreticileri ile yapacakları ikili anlaşmalar açısından önem arz etmektedir. Özellikle, referans olarak PTF kullanmayan sözleşmelerde belirlenen bir yıllık sabit fiyatlı sözleşmeler, şirketler için risk oluşturmaktadır. Bu risk, PTF kullanmayan sözleşmelerin sabit bir fiyattan elektrik satılmasını içermesi nedeniyle özellikle PTF'nin yanlış tahmin edildiği dönemlerde alıcı ve satıcı için büyük zararlar oluşturabilmektedir. Maliyetlerin öngörülebilir olması durumunda satışlarda daha belirgin kazanç oluşması şirketlerin sürdürülebilirliği açısından önem arz etmektedir. PTF'nin daha doğru tahmin edilmesi talep tarafı katılımı gibi tüketim tarafı araçları geliştikçe çok daha faydalı olacaktır. Enerji dönüşümünün tüketim tarafına etkisi daha hissedilebilir seviyelere ulaştığında PTF'nin önemi daha fazla artacaktır.

PTF'nin tahmin edilmesini politika yapıcı açısından değerlendirdiğimizde ise elektrik piyasasına ilişkin gelecek planlarında önemli rol oynamaktadır. Elektrik kamusal mal olduğu için elektrik üreticilerinin makul kar oranlarına ulaşması ve tüketicilerin elektriği karşılanabilir fiyatlarda kullanabilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, PTF'nin oynaklığının azalması ve tahmin edilmesi; üretim ve tüketim noktalarına göre şebeke planlaması ve yatırımların doğru yönlendirilmesinde yol gösterici olmaktadır. Makine öğrenmesi ile PTF tahmininin iyileşmesi, merkezi planlayıcı konumundaki politika yapıcıya yardımcı olmaktadır.

SONUÇ

Bu araştırma, Türkiye elektrik piyasasında PTF'nin makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin edilmesine dair bir değerlendirme sunmaktadır. Makalede kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları, özellikle rastgele orman ve ağaç topluluğu yöntemleri, PTF'nin tahmin edilmesinde daha iyi performans sergilemiş ve bu bağlamda ekonometrik yöntemlere kıyasla daha yüksek bir başarı oranı elde etmiştir. Yapılan analiz neticesinde makine öğrenmesi metodolojileri, karmaşık piyasa dinamiklerini modelleme kapasitesi ve geniş veri kümeleriyle çalışabilme yeteneği sayesinde piyasa katılımcılarına sağladığı faydaları net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Araştırma bulguları, Türkiye'de doğalgaz, kömür, güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi kaynakların PTF üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmektedir. Güneş enerjisi, değişken üretim profili olmasına rağmen düşük marjinal üretim maliyeti ile piyasa arz eğrisini sağa kaydırarak PTF düşürücü bir etkiye sahipken, kömür santrallerinin yerli ve ithal kömür kullanımına bağlı olarak değişken maliyet yapısı, PTF üzerinde farklı etkiler doğurmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan analizler, PTF'nin dinamik yapısını anlamada ve gerçek seviyesine yakın tahmin edilmesi için büyük öneme sahiptir. Makine öğrenmesi modellerinin etkin kullanımı, PTF tahminlerinde yüksek doğruluk oranları sağlamakta olup bu sonuçlar; enerji üreticileri, tüketiciler ve politika yapıcılar açısından önemli pratik çıkarımlar barındırmaktadır. Üreticiler için doğru tahmin edilen PTF, enerji üretim maliyetlerinin etkin yönetimine olanak tanıyarak uzun vadeli stratejik planlamalarda daha sağlam temeller üzerine oturtulmasına imkan sağlamaktadır. Tüketiciler için elektrik maliyetlerinin öngörülebilirliği artmakta ve tüketicilerin ekonomik planlama yapmasında daha güvenilir bir zemin sunmaktadır. Politika yapıcılar için ise piyasa oynaklığının azalması ve piyasanın daha etkin bir şekilde işlemesi adına önemli veriler sağlamaktadır.

Makalenin analiz sonuçları, makine öğrenmesi yöntemlerinin başarılı olabilmesi için yeterince veri ve değişkene ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Sadece elektrik üretim verisi kullanıldığında makine öğrenmesi yöntemlerinin başarısı sınırlı olmaktadır. Ancak ekonometrik yöntemlerin gerektirdiği önkoşul testlerinin makine öğrenmesi yöntemlerinde olmaması, makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanmasını daha pratik hale getirmektedir. Ayrıca makine öğrenmesi yöntemlerinin, analiz için oluşturulan modelleri test ederken ayrıştırılmış ve daha önce analize dahil olmayan verileri kullanması, ekonometrik yöntemlere göre bir diğer üstünlük olarak dikkat çekmektedir. Metodun uygulanması neticesinde ortaya çıkan binlerce karar ağacının mikro ölçekte

detay analizlerde kullanılması, incelenen konunun daha iyi anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Makalede farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin etkinliğinin değerlendirilmiş olması, uygulayıcıların hatalı tahminlerden kaynaklanabilecek verimsizlikleri önlemelerine yardımcı olacaktır.

Makalenin bulguları, makine öğrenmesi yöntemlerinin Türkiye elektrik piyasasında PTF tahmini için etkin bir araç olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Makine öğrenmesi, enerji piyasasının dinamiklerini daha iyi anlamak ve bu dinamiklere uygun stratejik kararlar almak için değerli bir analitik çerçeve sunmaktadır. Gelecekteki araştırmacıların, daha geniş veri setleri ve farklı algoritmalar kullanması bu makalenin bulgularını genişletebilecek ve daha ileri analizler yapmasına imkan sunabilecektir. Özellikle yenilikçi yöntemlerin Türkiye elektrik piyasa yapısına entegrasyonu ve farklı piyasa koşullarının analiz edilerek piyasa işleyişinde göz önünde bulundurulması literatüre önemli katkılar sağlayabilecektir.

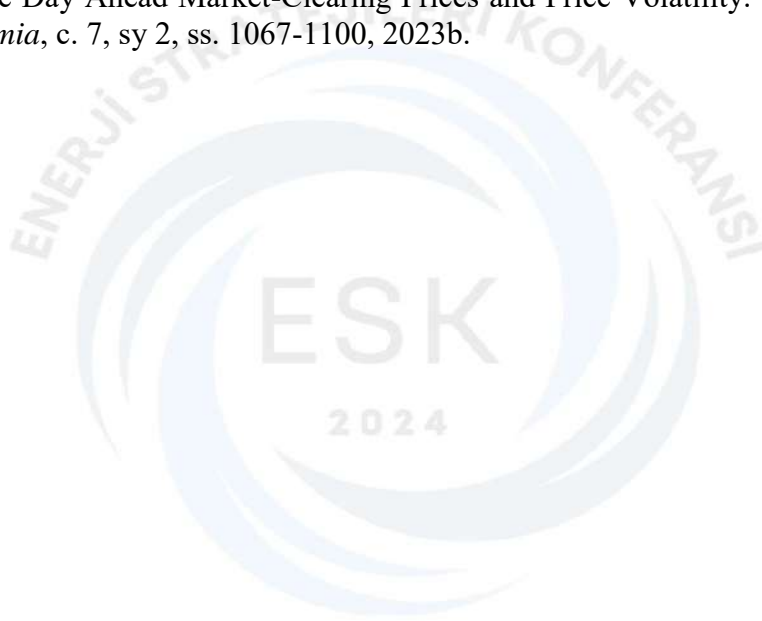


KAYNAKLAR

- [1] H. Çetintaş ve İ. Bicil, “Elektrik Piyasalarında Yeniden Yapılanma ve Türkiye Elektrik Piyasasında Yapısal Dönüşüm”, *Optim. Ekon. Ve Önetim Bilim. Derg.*, c. 2, sy 2, Art. sy 2, Şub. 2015, doi: 10.17541/oeybd.33366.
- [2] C. Chen, S. Kishore, Z. Wang, M. Alizadeh, ve A. Scaglione, “How will demand response aggregators affect electricity markets?—A Cournot game analysis”, içinde *2012 5th international symposium on communications, control and signal processing*, IEEE, 2012, ss. 1-6. Erişim: 08 Ağustos 2024.
- [3] D. Xiao, J. C. do Prado, ve W. Qiao, “Optimal joint demand and virtual bidding for a strategic retailer in the short-term electricity market”, *Electr. Power Syst. Res.*, c. 190, s. 106855, 2021.
- [4] B. Vega-Márquez, C. Rubio-Escudero, I. A. Nepomuceno-Chamorro, ve Á. Arcos-Vargas, “Use of deep learning architectures for day-ahead electricity price forecasting over different time periods in the Spanish electricity market”, *Appl. Sci.*, c. 11, sy 13, s. 6097, 2021.
- [5] S. Mohammadi ve M. R. Hesamzadeh, “Econometric modeling of intraday electricity market price with inadequate historical data”, içinde *2022 IEEE Workshop on Complexity in Engineering (COMPENG)*, IEEE, 2022, ss. 1-9. Erişim: 08 Ağustos 2024.
- [6] K. H. Cao, H. S. Qi, C.-H. Tsai, C.-K. Woo, ve J. Zarnikau, “Energy trading efficiency in ERCOT’s day-ahead and real-time electricity markets”, *J. Energy Mark.*, c. 15, sy 3, 2022, Erişim: 08 Ağustos 2024.
- [7] D. Zhou, H. Dai, F. Chen, B. Lou, ve Z. Ren, “Modelling of multi-timescale demand response for power markets”, *Int. J. Model. Identif. Control*, c. 33, sy 3, s. 237, 2019, doi: 10.1504/IJMIC.2019.105970.
- [8] T. Liu ve J. Xu, “Equilibrium strategy based policy shifts towards the integration of wind power in spot electricity markets: A perspective from China”, *Energy Policy*, c. 157, s. 112482, 2021.
- [9] X. Yan ve N. A. Chowdhury, “Mid-term electricity market clearing price forecasting using multiple least squares support vector machines”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, c. 8, sy 9, ss. 1572-1582, Eyl. 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0610.
- [10] M.-W. Hsu, S. Lessmann, M.-C. Sung, T. Ma, ve J. E. Johnson, “Bridging the divide in financial market forecasting: machine learners vs. financial economists”, *Expert Syst. Appl.*, c. 61, ss. 215-234, 2016.
- [11] G. P. Herrera, M. Constantino, B. M. Tabak, H. Pistori, J.-J. Su, ve A. Naranpanawa, “Long-term forecast of energy commodities price using machine learning”, *Energy*, c. 179, ss. 214-221, 2019.
- [12] M. Ç. Peker ve A. Sivrikaya, “Problems of the Supply Industry in Wholesale Electricity Markets”, *JOEEP J. Emerg. Econ. Policy*, c. 8, sy 1, ss. 408-420, 2023a.
- [13] F. Oguz ve M. C. Peker, “Volatility in the Turkish wholesale electricity market: an assessment”, *Energy Sources Part B Econ. Plan. Policy*, c. 18, sy 1, s. 2173340, Ara. 2023, doi: 10.1080/15567249.2023.2173340.
- [14] N. Dahlin ve R. Jain, “A two-stage market mechanism for electricity with renewable generation”, içinde *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, 2019, ss. 5150-5155.
- [15] F. Tanrisever, K. Derinkuyu, ve G. Jongen, “Organization and functioning of liberalized electricity markets: An overview of the Dutch market”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 51, ss. 1363-1374, 2015.

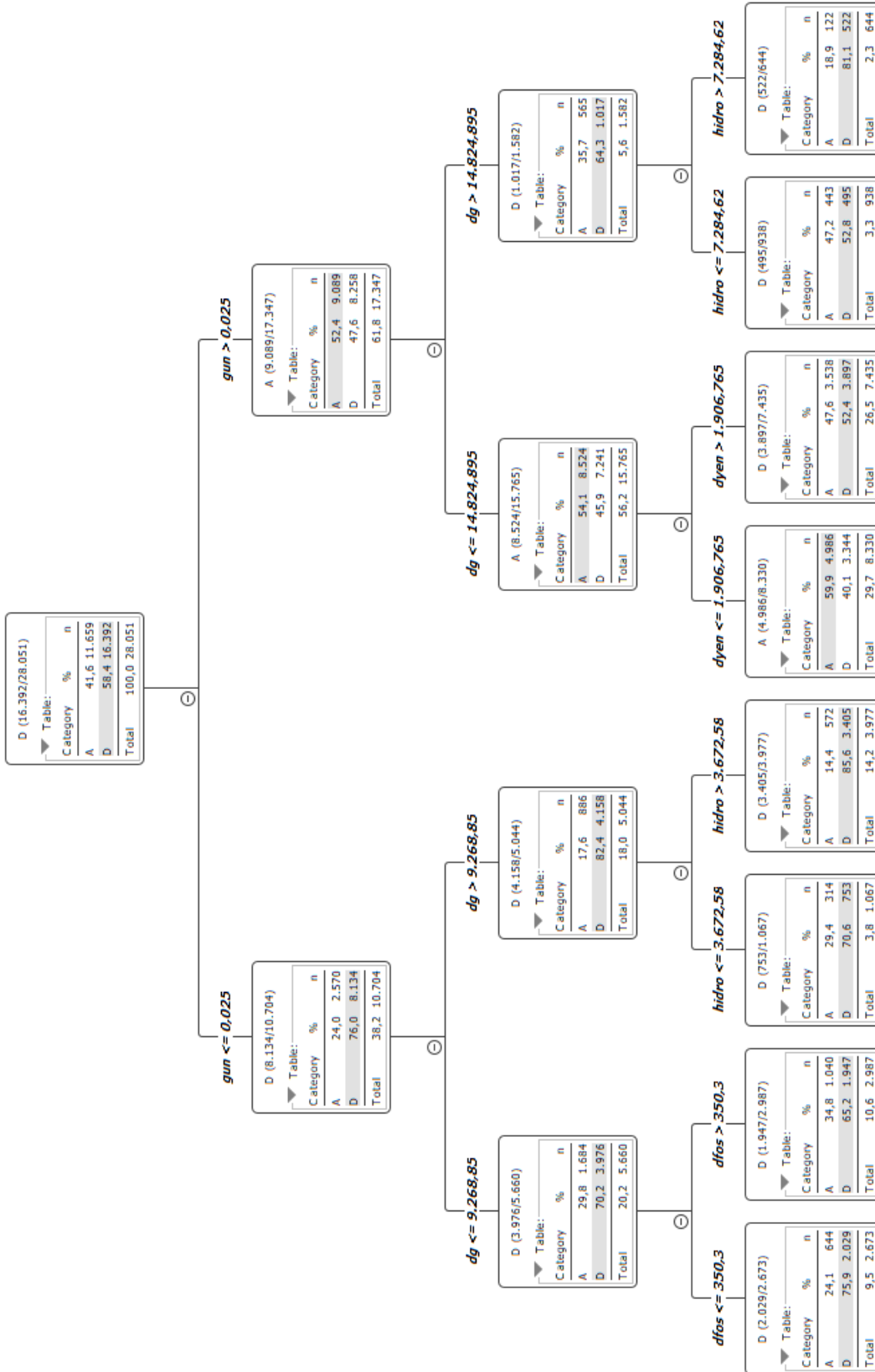
- [16] S. Borenstein, “The trouble with electricity markets: understanding California’s restructuring disaster”, *J. Econ. Perspect.*, c. 16, sy 1, ss. 191-211, 2002.
- [17] J. Nowotarski ve R. Weron, “Recent advances in electricity price forecasting: A review of probabilistic forecasting”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 81, ss. 1548-1568, 2018.
- [18] J. Liu, H. Hu, S. S. Yu, ve H. Trinh, “Electricity Pricing and Its Role in Modern Smart Energy System Design: A Review”, *Designs*, c. 7, sy 3, s. 76, 2023.
- [19] P. L. Joskow, “Capacity payments in imperfect electricity markets: Need and design”, *Util. Policy*, c. 16, sy 3, ss. 159-170, 2008.
- [20] B. Arslan ve İ. Ertuğrul, “Çoklu Regresyon, Arima Ve Yapay Sinir Ağı Yöntemleri İle Türkiye Elektrik Piyasasında Fiyat Tahmin Ve Analizi”, *J. Manag. Econ. Res.*, c. 20, sy 1, ss. 331-353, 2022.
- [21] H. Ghoddusi, G. G. Creamer, ve N. Rafizadeh, “Machine learning in energy economics and finance: A review”, *Energy Econ.*, c. 81, ss. 709-727, 2019.
- [22] S. Athey, “The impact of machine learning on economics”, *Econ. Artif. Intell. Agenda*, ss. 507-547, 2018.
- [23] X. Qiu, Y. Ren, P. N. Suganthan, ve G. A. Amaratunga, “Empirical mode decomposition based ensemble deep learning for load demand time series forecasting”, *Appl. Soft Comput.*, c. 54, ss. 246-255, 2017.
- [24] A. Ghasemi, H. Shayeghi, M. Moradzadeh, ve M. Nooshyar, “A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management”, *Appl. Energy*, c. 177, ss. 40-59, 2016.
- [25] U. Ugurlu, I. Oksuz, ve O. Tas, “Electricity price forecasting using recurrent neural networks”, *Energies*, c. 11, sy 5, s. 1255, 2018.
- [26] T. Ahmad, H. Zhang, ve B. Yan, “A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings”, *Sustain. Cities Soc.*, c. 55, s. 102052, Nis. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102052.
- [27] S. Madadkhani ve S. Ikonnikova, “What Machine Learning Can Tell Us about the Drivers of Electricity Prices: The Case of Germany”, içinde *Mapping the Energy Future-Voyage in Uncharted Territory-*, 43rd IAEE International Conference, July 31-August 3, 2022, International Association for Energy Economics, 2022.
- [28] C. González, J. Mira-McWilliams, ve I. Juárez, “Important variable assessment and electricity price forecasting based on regression tree models: classification and regression trees, Bagging and Random Forests”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, c. 9, sy 11, ss. 1120-1128, Ağu. 2015, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0655.
- [29] J. Wang, P. Li, R. Ran, Y. Che, ve Y. Zhou, “A short-term photovoltaic power prediction model based on the gradient boost decision tree”, *Appl. Sci.*, c. 8, sy 5, s. 689, 2018.
- [30] D. Mouchtaris, E. Sofianos, P. Gogas, ve T. Papadimitriou, “Forecasting natural gas spot prices with machine learning”, *Energies*, c. 14, sy 18, s. 5782, 2021.
- [31] S. Bejger ve P. Fiszeder, “Forecasting currency covariances using machine learning tree-based algorithms with low and high prices”, *Przegląd Stat.*, c. 68, sy 3, ss. 1-15, 2021.
- [32] M. Madhjarasan, M. Louzazni, ve P. P. Roy, “Novel Cooperative Multi-Input Multilayer Perceptron Neural Network Performance Analysis with Application of Solar Irradiance Forecasting”, *Int. J. Photoenergy*, c. 2021, ss. 1-24, Eki. 2021, doi: 10.1155/2021/7238293.
- [33] S. Wager ve S. Athey, “Estimation and Inference of Heterogeneous Treatment Effects using Random Forests”, *J. Am. Stat. Assoc.*, c. 113, sy 523, ss. 1228-1242, Tem. 2018, doi: 10.1080/01621459.2017.1319839.

- [34] W. van Loon, M. Fokkema, B. Szabo, ve M. de Rooij, “Stacked penalized logistic regression for selecting views in multi-view learning”, *Inf. Fusion*, c. 61, ss. 113-123, 2020.
- [35] A. Ertaylan, Ö. Aktaş, ve Y. Doğan, “Yapay Sinir Ağları ile Piyasa Takas Fiyatı Tahminlemesi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendis. Fakültesi Fen Ve Mühendis. Derg.*, c. 23, sy 67, Art. sy 67, Oca. 2021, doi: 10.21205/deufmd.2021236708.
- [36] S. Demirezen ve M. Çetin, “Rassal Orman Regresyonu Ve Destek Vektör Regresyonu İle PTF'nin Tahmini”, *Nicel Bilim. Derg.*, c. 3, sy 1, Art. sy 1, Haz. 2021, doi: 10.51541/nicel.832164.
- [37] A. Arifoğlu ve T. Kandemir, “Electricity Price Forecasting In Turkish Day-Ahead Market Via Deep Learning Techniques”, *J. Mehmet Akif Ersoy Univ. Econ. Adm. Sci. Fac.*, c. 9, sy 2, ss. 1433-1458, 2022.
- [38] C. Karatekin ve T. Başaran, “Gün Öncesi Piyasasında Elektrik Enerjisi Fiyatının Veri Analizi İle Tahmin Edilmesi”, *J. Inst. Sci. Technol.*, c. 12, sy 4, ss. 2075-2084, 2022.
- [39] M. Ç. Peker ve A. Sivrikaya, “The Effects of Electricity Generation from Solar and Wind Energy on the Day Ahead Market-Clearing Prices and Price Volatility: The Turkish Case”, *Fiscaoeconomia*, c. 7, sy 2, ss. 1067-1100, 2023b.



EKLER

Ek-1: Karar Ağacı'nın İlk Üç Basamağındaki Dağılım



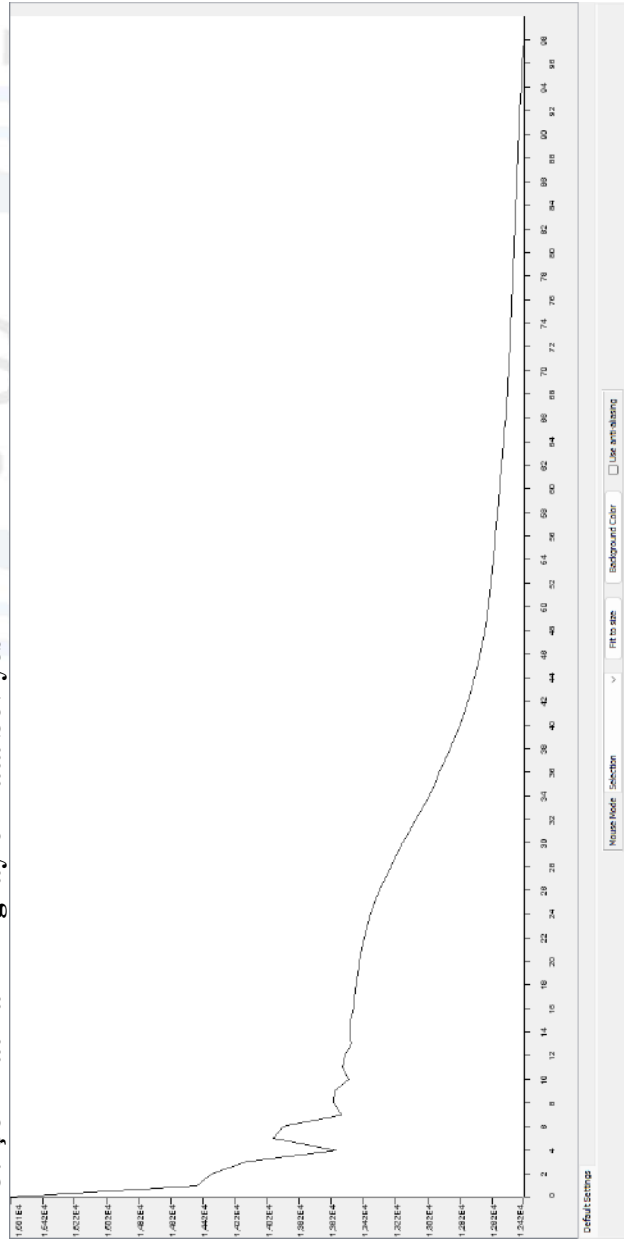
Ek-2: Naïve Bayes Dağılım Sonuçları

| Class counts for ptf_degism | |
|---|-----------|
| Class: | D |
| Count: | 16392 |
| Total count: | 28051 |
| Threshold to used for zero probabilities: 1.0E-4 | |
| Gaussian distribution for dfos per class value | |
| A | D |
| Count: | 16392 |
| Mean: | 275,60293 |
| Std. Deviation: | 416,1477 |
| Rate: | %42 |

| Gaussian distribution for dg per class value | |
|--|------------|
| A | D |
| Count: | 16392 |
| Mean: | 8754,95387 |
| Std. Deviation: | 4054,96973 |
| Rate: | %42 |

| Gaussian distribution for dyen per class value | |
|--|-----------|
| A | D |
| Count: | 16392 |
| Mean: | 1839,8203 |
| Std. Deviation: | 255,24807 |
| Rate: | %42 |

Ek-3: Çok Katmanlı Algılayıcı Hata Seviyesi



131: Türk Enerji Sektöründe Entegre Raporlama Uygulamaları ve Piyasa Değeri Üzerine Bir İnceleme

Doç. Dr. İzzet ARI

Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi, Enerji Ekonomisi ve Yönetimi Anabilim Dalı

Emine BULUT

Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi, Enerji Ekonomileri ve Yönetimi

ÖZET

Bu çalışma, Türk enerji sektöründe entegre raporlama uygulamalarını incelemektedir. Enerji sektörüne odaklanmamızın sebebi, sürdürülebilir yönetim anlayışına en çok ihtiyaç duyan sektörlerden biri olmasıdır. Entegre raporlama sisteminin sunduğu, entegre düşünce ve değer yaratma temeline dayalı yeni iş modeli, enerji şirketlerinin riskleri ve fırsatları zamanında ve doğru bir şekilde belirlemesi, ayrıca kurumsal sürdürülebilir bir yol haritası oluşturması açısından büyük fayda sağlamaktadır. Enerji talebinin artması ve iklim değişikliği ile uyum sağlama gerekliliği, enerji şirketleri üzerinde yoğun bir baskı oluşturmaktadır; bu da şirketlerin zamanında önlem almasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, entegre raporlama yapan bir şirketin piyasa değeri üzerindeki etkisi, ekonometrik dengeli panel veri yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Borsa İstanbul'a kayıtlı on iki enerji şirketinin 2014-2023 yılları arasındaki verileri incelenmiştir. Denklemde bağımsız sürekli değişkenler olarak net defter değeri ve net kâr kullanılırken, entegre rapor üretmek, sürdürülebilirlik raporu yayınlamak, Borsa İstanbul Kurumsal Yönetişim Endeksi ve Borsa İstanbul Sürdürülebilirlik Endeksi'ne dahil olmak kukla değişkenler olarak değerlendirilmiştir. Sabit etkiler modeli, istatistiksel kriterlere göre en uygun model olarak seçilmiş ve sonuçlara göre, net defter değeri en anlamlı faktör olarak tespit edilmiştir. Kurumsal Yönetişim Endeksi de pozitif ve anlamlı bir etkiye sahip bulunmuştur. Sürdürülebilirlik raporu yayınlamanın anlamlı olmayan ancak olumlu bir etkisi olduğu, sürdürülebilirlik endeksine dahil olmanın, net kârın ve entegre rapor üretmenin ise olumsuz ancak anlamlı olmayan etkiler gösterdiği görülmüştür. Çalışmanın çıkarımları, piyasa katılımcılarının finansal göstergeler kadar şirketlerin kurumsal yönetim faaliyetlerine de değer verdiğini ortaya koymaktadır. Entegre raporlama sonuçlarının orta-uzun vadede pozitif dönebilmesi için doğru yorumlanmasının önemli olduğu vurgulanmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde, Borsa İstanbul'da işlem gören enerji şirketlerine, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleri ve iş stratejileri doğrultusunda çevresel, sosyal ve yönetim faktörlerini karar alma süreçlerine ve raporlamalarına entegre etmeleri tavsiye edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Sektörü, Entegre Raporlama, Sürdürülebilirlik, Kurumsal Yönetişim.

ABSTRACT

This study examines the integrated reporting practices in the Turkish energy sector, focusing on this sector due to its significant need for sustainable management practices. The integrated reporting system, which is based on the principles of integrated thinking and value creation, offers a new business model that is beneficial for energy companies in accurately and timely identifying risks and opportunities and establishing a sustainable corporate roadmap. As energy demand increases and the pressure to adapt to climate change and its effects intensifies, energy companies are required to take timely precautions to address these challenges. This study tests the impact of integrated reporting on a company's market value using the econometric balanced panel data method. Data from twelve energy companies listed on Borsa Istanbul between 2014 and 2023 were utilized. In the equation, net book value and net profit were used as independent continuous variables, while producing integrated reports, publishing sustainability reports, inclusion in the Borsa Istanbul Corporate Governance Index, and the Borsa Istanbul Sustainability Index were considered dummy variables. Among the models tested, the fixed effects model was selected based on statistical criteria, with net book value identified as the most statistically significant factor, and the Corporate Governance Index also found to have a positive and significant effect. While the publication of sustainability reports had an insignificant but positive effect, inclusion in the sustainability index, net profit, and the production of integrated reports showed negative but insignificant effects. The findings suggest that market participants value a company's corporate governance activities as much as its financial indicators. It is emphasized that correctly interpreting the outcomes in terms of integrated reporting is crucial for these effects to turn positive in the medium to long term. The conclusions and recommendations section strongly advises energy companies listed on Borsa Istanbul to integrate environmental, social, and governance (ESG) factors into their decision-making processes and reporting in line with their long-term sustainability goals and business strategies.

Keywords: Energy Sector, Integrated Reporting, Sustainability, Corporate Governance

GİRİŞ

1.1. Kavramsal Çerçeve

Enerji şirketleri için iklim değişikliğinin getirdiği zorluklara doğru yanıtları bulmak ve fırsatları zamanında yakalamak her zamankinden daha önemlidir. Piesiewicz ve arkadaşları (2021) iklim değişikliğinin kaçınılmaz olarak daha fazla kurumsal sorumluluk gerektirdiğini vurgulamaktadır. Sunde-Hansen'e (2023) göre, geleneksel olarak yönetilen enerji şirketleri içeriden değişime direnme eğilimindedir ve yeniye benimsemekte başarısız olmaktadır, dolayısıyla yenilikçi bir yönetim yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır. Kurumsal raporlama anlayışının geldiği son nokta olarak nitelenen entegre raporlama (ER) tam da bunu sunmaktadır: entegre düşünce ve değer yaratmaya dayalı yeni bir iş modeli.

Uluslararası Entegre Raporlama Konseyi (IIRC,2013) entegre raporlamayı, bir kuruluşun stratejisi, yönetişimi, performansı ve beklentileri hakkındaki bilgileri ekonomik, sosyal ve çevresel bağlamını da yansıtacak şekilde bir araya getiren bir raporlama süreci olarak ifade eder. Entegre raporlama, yatırımcıların bir şirketin geleceği hakkında daha bilinçli yargılarda bulunmasını sağlayan ileriye dönük bilgiler içerir. Bu haliyle, paydaşlara tarihsel bilgiler sunan geleneksel finansal raporlamadan ayrılmaktadır (Singh, 2012).

Entegre raporlama büyük ölçüde gönüllülük esasına dayalı olarak benimsenmiş olup Güney Afrika ve Brezilya gibi birkaç ülkede zorunlu hale getirilmiştir. Uluslararası Entegre Raporlama Konseyi'nin 10. yıldönümü bildirisinde (IIRC,2020) belirttiği gibi, entegre raporlama 70'ten fazla ülkede 2.500'den fazla şirket tarafından kullanılmakta ve 40'tan fazla borsa kılavuzlarında ER'a atıfta bulunmaktadır.

1.2. Türkiye'de ER Tarihçesi

Türkiye'de Entegre Raporlama Türkiye Derneği (ERTA), Türk Sanayicileri ve İşadamları Derneği (TÜSİAD) ve Borsa İstanbul (BIST) gibi kuruluşların çabalarıyla dünyadaki ER gündemini erken yakaladı. 2011 yılında Türkiye Kurumsal Yönetim Derneği (TKYD) ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (SKD), Türkiye'de entegre raporlama konusunda farkındalığı artırmak amacıyla bir çalışma grubu oluşturdu. TÜSİAD, ülkedeki ilk entegre raporlama rehberi olan "Kurumsal Raporlamada Yeni Dönem: Entegre Raporlama" başlıklı kılavuz raporu yayınladı (Aras&Sarıoğlu). IIRC'nin hazırladığı entegre raporlama çerçevesi 2015 yılında ERTA tarafından Türkçeye çevrildi. Borsa İstanbul, Türkiye'de hazırlanan entegre rapor sayısını artırmak amacıyla 2022 yılında 'Şirketler için Entegre Raporlama Rehberi'ni hazırladı. Türkiye'de yayımlanan bütün entegre raporlar ERTA'nın web sitesinde yer almaktadır. 2021 yılında Akenerji ve Zorlu Enerji, entegre rapor sunan ilk enerji şirketleri olmuş, ardından 2022 yılında TÜPRAŞ da ilk entegre raporunu yayınlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, enerji şirketlerine odaklanarak bu alandaki sınırlı çalışmalara katkıda bulunmaktır. Küresel enerji sektörünün karşılaştığı zorluklar, Türkiye enerji sektörü için de benzer tehditler ve fırsatlar yaratmaktadır. Entegre raporlamanın sunduğu faydaların daha iyi anlaşılması gerektiğine inanılmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada entegre raporlamanın borsa katılımcıları tarafından nasıl değerlendirildiği incelenmektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye'nin ana borsası olan Borsa İstanbul'da işlem gören bir grup enerji şirketinin performansını incelemek için panel veri analiz metodu kullanılmıştır. Örneklem, Tablo 1'de gösterildiği gibi, elektrik ve doğal gaz, petrokimya ve inşaat sektörlerini kapsayan ve 2014 yılından bu yana en az 10 yıldır Borsa İstanbul'da işlem gören 12 enerji şirketinden oluşmaktadır. Şirketlere ait tüm bilgiler ikincil veri toplama yöntemi kullanılarak Kamuyu Aydınlatma Platformu'ndan (KAP), şirketlerin kendi internet sitelerinden, Borsa İstanbul arşiv verilerinden, İş Yatırım'ın geçmiş hisse fiyat bilgilerinden ve ERTA'nın internet sitesinden elde edilmiştir.

Modelde, şirketlerin finansal ölçütleri sürekli değişkenlerle temsil edilirken, kurumsal yönetim, sürdürülebilirlik ve entegre raporlama gibi finansal olmayan göstergeler kukla değişkenlerle ifade edilmiştir. Entegre raporlamanın bir şirketin piyasa değeri üzerindeki etkisini analiz ederken, sürdürülebilirlik ve kurumsal yönetim performansı yüksek olan şirketlerin entegre raporlamayı benimseme olasılığının da yüksek olduğu varsayılmıştır.

Tablo 1 : Çalışmaya Dahil Edilen Şirketler

| Şirket İsmi | BIST Katılma Yılı | BIST Kodu |
|--|-------------------|-----------|
| Ak Enerji Elektrik Üretim A.Ş. | 2000 | AKENR |
| Zorlu Enerji Elektrik Üretim A.Ş. | 2000 | ZOREN |
| Aksa Enerji ve Ticaret A.Ş. | 2010 | AKSEN |
| Türkiye Petrol Rafinerileri A. Ş | 1991 | TUPRS |
| Aygaz | 1998 | AYGAZ |
| Odaş Elektrik Üretim Sanayi Ticaret A.Ş. | 2013 | ODAS |
| Aksu Enerji ve Ticaret A.Ş. | 1999 | AKSUE |
| Orge Enerji Elektrik Taahhüt A. Ş | 2012 | ORGE |
| Turcas Petrol | 1992 | TRCAS |
| Zedur Enerji Elektrik Üretim A.Ş. | 2011 | ZEDUR |
| Park Elektrik Üretim Madencilik | 1997 | PRKME |
| Ayen Enerji A.Ş. | 2000 | AYEN |

(Kaynak: Bilgiler İkincil veri toplama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir)

Regresyon modelinin denklemi şu şekilde ifade edilmiştir:

$$MV_i = a_0 + a_1 BV_i + a_2 NP_i + a_3 SR_i + a_4 IR_i + a_5 IDX_i + a_6 KURX_i + c_i + u_i$$

MV_i piyasa değerini ifade eder: t mali yılının sonunda bir i şirketinin hisse fiyatıyla tedavüldeki hisse sayısının çarpımı ile elde edilmiştir.

a_0 : sabit,

Net Defter Değeri (BV_i): Ana ortaklığa ait özkaynaklar

Net kâr (NP_i): Ana ortaklığa ait kâr payları

SR_i : bir şirket sürdürülebilirlik raporu yayınlamışsa 1, aksi takdirde 0 değerini alır. IR_i :

Şirket entegre rapor yayınlamışsa 1, aksi takdirde 0 değerini alır.

IDX_i : Bir şirket sürdürülebilirlik endeksine dahilse 1, aksi takdirde 0 değerini alır. $KURX_i$:

Şirket kurumsal yönetim endeksine dahilse 1, aksi takdirde 0 değerini alır. c_i : Bireysel

(şirket düzeyinde) heterojenlik

u_i : Standart stokastik özelliklere sahip rastlantısal hata terimi

2.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Çalışmada kullanılan veriler dengeli bir panel oluşturmaktadır. Değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler (gözlem sayısı, ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum) Tablo 2'de gösterilmektedir. Tanımlayıcı istatistikler, 12 enerji şirketinin 120 gözlemden oluşan 10 yıllık veri setine dayanmaktadır. Şirketlerin ortalama büyüklüğünün (milyon TL) yaklaşık 20.189, minimum 181,1 ve maksimum 275.531,8 olduğu görülmektedir. Bu da örnekte yer alan şirketlerin büyüklük açısından önemli bir çeşitlilik gösterdiği anlamına gelmektedir. Defter Değeri (BV) (milyon TL) için ortalama değer 14.042,8, maksimum değer 293.105,5 ve minimum değer -486'dır. Net kâr değişkeni açısından ise ortalama değeri 2.528,5 iken maksimum 101.028,4 ile minimum -9.184,4 aralığında seyretmektedir.

Kukla değişkenler için tanımlayıcı istatistikler bize aşağıdaki sonuçları göstermektedir. Sürdürülebilirlik raporlarının yayınlanma yüzdesi (SR) 0,36 olarak verilmiştir. Buna göre, şirketler 120 gözlem yılının 43'ünde sürdürülebilirlik raporu yayınlamışlardır. Entegre raporların (IR) yayınlanması için bu sıklık yüzde 7'dir, bu da raporun 8 gözlem yılında üretildiği anlamına gelmektedir. Öte yandan, Sürdürülebilirlik Endeksi'nde (IDX) gözlemlenen sıklık yüzde 33, Kurumsal Yönetim Endeksi'nde (KURX) ise yüzde 37'dir.

Tablo 2. Tanımlayıcı İstatistikler

| | Gözlem Sayısı | Ortalama | Ortanca | Standart Sapma | Minimum | Maximum |
|----|---------------|----------|---------|----------------|----------|-----------|
| MV | 120 | 20.189,9 | 4.595,8 | 44.675,18 | 181,1 | 275.531,8 |
| BV | 120 | 14.042,8 | 3.778,4 | 34.512,17 | -486,0 | 293.105,5 |
| NP | 120 | 2.528,5 | 161,1 | 11.149,95 | -9.184,4 | 101.028,4 |
| SR | 120 | 0,36 | | 0,48 | | |
| IR | 120 | 0,07 | | 0,25 | | |

| | | | | | | |
|----------|-----|------|--|------|--|--|
| IDX | 120 | 0,33 | | 0,47 | | |
| KUR X | 120 | 0,37 | | 0,48 | | |

(Kaynak: R-studio (2023.12.1+402) yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır)

2.2. Model Tahmin Sonuçları

Hangi modelin daha uygun olduğunu belirlemek için çeşitli testler yapılmıştır. İlk olarak, sabit etkiler modelini havuzlanmış (OLS) modeli ile karşılaştırmak amacıyla F-testi uygulanmıştır. Daha sonra, sabit etkiler modelini rastgele etkiler modeline karşı test etmek için Hausman testi kullanılmıştır. Her iki testin sonucu da sabit etkiler modelini desteklemiştir. Tablo 3'te, havuzlanmış (OLS) modeli ve rastgele modelin sonuçları aynı olduğundan, yalnızca OLS modeli sunulmuştur. Sabit etkiler modelinde seri korelasyon ve değişen varyans testleri yapılmış, seri korelasyon görülmemesine rağmen değişen varyans tespit edilmiştir. Bu durumu dikkate almak için sağlam bir kovaryans matrisi kullanılmıştır. Tablo 3, model tahminlerini ve tüm test sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, net defter değerinin en önemli faktör olarak belirlendiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Kurumsal Yönetişim Endeksi'nin pozitif ve anlamlı bir etki yarattığı saptanmıştır. Sürdürülebilirlik raporu yayınlamanın etkisi anlamlı bulunmamakla birlikte olumlu yöndedir; buna karşılık, sürdürülebilirlik endeksine dahil olmanın, net kârın ve entegre raporlamanın ise olumsuz ancak anlamlı olmayan etkiler gösterdiği görülmüştür.

Table 3: Panel Regresyon Modellerinin Tahmin Sonuçları

| Bağımlı Değişken (karşıda) Açıklayıcı Değişkenler (aşağıda) | Sabit Etkiler Modeli | | Havuzlanmış (OLS) Modeli | |
|--|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| | Piyasa Değeri (MV) (milyon TL) | | Piyasa Değeri (MV) (milyon TL) | |
| | Tahminler | Sağlam değerler | Tahminler | Sağlam değerler |
| Kesişim Noktası | | | -2.860,4 | (-0,97) |
| Defter Değeri (BV) (milyon TL) | 0,77*** | (4,68) | 1,69*** | (9,63) |
| Net Kar (NP) (milyon TL) | -0,36 | (-1,12) | -1,71 | (-1,14) |
| Sürdürülebilirlik Raporu (SR) | 726,38 | (0,36) | -6.920,80 | (-1,42) |
| Entegre Rapor (IR) | -5.023,63 | (-0,35) | -39.785** | (-2,79) |
| Sürdürülebilirlik Endeksi (IDX) | -1.482,70 | (-0,58) | 16.949 | (1,10) |
| Kurumsal Yönetişim Endeksi (KURX) | 17.549,60 | (1,71) | 8.540,6 | (0,81) |
| R-Kare | 0,74 | | 0,85 | |

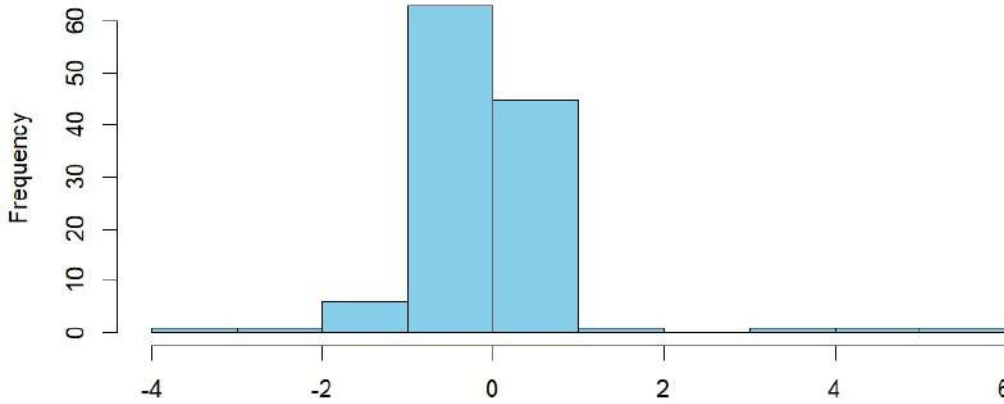
| | | |
|--|-------|-------|
| Düzeltilmiş R-Kare | 0,70 | 0,84 |
| Modelin anlamlılığını test etmek için F İstatistiği veya Ki-kare istatistiği | <0,05 | <0,05 |
| Sabit Etkiler için F-Testi | <0,05 | <0,05 |
| Sabit Etkiler için Hausman Testi | <0,05 | |
| Sabit Etkiler Modelinde değişen varyans için Breusch-Pagan testi | <0,05 | |
| Sabit Etkiler Modelinde seri korelasyon için Breusch-Godfrey/Wooldridge | >0,05 | |

(Kaynak: Tahmin sonuçları R-studio programı (sürüm 2023.12.1+402) kullanılarak elde edilmiştir).

Not: “****”, “***”, “**” ve “.” gösterimleri sırasıyla %0.1, %1, %5 ve %10 düzeyinde anlamlılığı göstermektedir. t-değerleri parantez içinde gösterilmiştir ve sağlam standart hatalara dayanmaktadır (HC3 ve Arellano)

Standartlaştırılmış artıklar, standart normal dağılımla büyük ölçüde tutarlıdır; çünkü çoğu değer -2 ile +2 arasındadır. Tüm gözlemler ise -4 ile +6 arasında dağılmıştır. Histogram sıfır etrafında merkezlenmiş olup, geniş omuzlara sahip olmasına rağmen çan şeklinde bir eğri göstermektedir (Şekil 1).

Şekil 1. Standartlaştırılmış Artıkların Histogramı



BULGULAR VE YORUMLAR

Delegkos ve arkadaşları (2022) entegre rapor ile şirketlerin piyasa değeri arasında negatif bir etki tespit eden çalışmaları sonucunda kullanıcılar rapora aşına oldukça bunun değişeceği

öngörüsünde bulundular. Bădițoiu ve arkadaşları (2023), entegre raporların yatırımcıların davranışları üzerinde kısa vadeli bir etkiye sahip olmamasının, onların orta ve uzun vadeli kararları hakkında fikir vermediğini ileri sürmüşlerdir. De Villiers ve arkadaşları (2017), şirketlerin ve paydaşların uzun vadede ER'i benimsemesinden elde edecekleri faydaları, iyileştirilmiş şirket içi karar alma süreçleri, azaltılmış itibar ve yasal düzenleme riskleri ile artan şeffaflık olarak sıralamıştır. Buna ek olarak, ER'nin şirketlerin finansal dayanıklılığını güçlendirme ve sürdürülebilir bir toplumu destekleme potansiyelinin de altını çizmişlerdir.

SONUÇLAR

Bu çalışma, enerji sektöründeki şirketler için entegre raporlamanın potansiyel faydalarını incelemektedir. Çünkü enerji sektörü iklim değişikliği ve buna bağlı çevresel sorunlardan en çok etkilenen sektördür ve bu sektörün sağlıklı işlemesi toplumların geleceği açısından hayati önem taşımaktadır. Literatürdeki çalışmalara bir katkı olarak, entegre raporlamanın şirketlerin piyasa değeri üzerindeki etkisine ilişkin analizimiz sürdürülebilirlik ve kurumsal yönetim göstergelerini de içermektedir. Bu iki ek değişken, bir şirketin entegre düşünce yaklaşımını değerlendirmeden önce kurumsal yönetimde belirli bir olgunluk ve başarı seviyesine ulaşması gerekebileceği için önemlidir. Borsa İstanbul'da işlem gören enerji şirketlerinin uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleri ve iş stratejileri doğrultusunda çevresel, sosyal ve yönetim faktörlerini karar alma süreçlerine ve raporlamalarına entegre etmeleri şiddetle tavsiye edilmektedir. Entegre raporlarının kalitesini ve şeffaflığını artırmak için analiz ve raporlamayı kolaylaştıran dijital araçlara yatırım yapmaları çok önemlidir. Şirketlerin entegre düşünceyi kurumsal kültürüne dahil etmeleri değer yaratma hedefine ulaşma yolunda kritik bir hamle olacaktır.

KAYNAKLAR

Aras, G., & Sarioğlu, G. U. (2015). Kurumsal Raporlamada Yeni Donem: Entegre Raporlama, TUSİAD, Yayın No: T/2015, 10-567.

Bădițoiu, B. R., Ioan, R., Munteanu, V. P., & Buglea, A. (2023). Investors' reactions on the publication of integrated reports. Evidence from European stock markets. *E a M: Economie a Management*, 26(2), 158–171. <https://doi.org/10.15240/tul/001/2023-2-010>

Busco, C., Frigo, M. L., Quattrone, P., & Riccaboni, A. (2014). Leading practices in integrated reporting: management accountants will guide their companies on the journey to value creation. *Strategic Finance*, (September), 23-32.

Delegkos, A. E., Skordoulis, M., Kalantonis, P., & Xanthopoulou, A. (2022). Integrated Reporting and Value Relevance in the Energy Sector: The Case of European Listed Firms. *Energies*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/en15228435>

De Villiers, C., Venter, E. R., & Hsiao, P. C. K. (2017). Integrated reporting: Background, measurement issues, approaches and an agenda for future research. *Accounting & Finance*, 57(4), 937–959. <https://doi.org/10.1111/acfi.12246>

IIRC. (2013). The international framework. Available at: <https://integratedreporting.org/wpcontent/uploads/2013/12/13-12-08-THE-INTERNATIONAL-IRFRAMEWORK-2-1.pdf>.

International Integrated Reporting Council (IIRC). (2020). 10 years summary. Retrieved August 25, 2024, from <https://integratedreporting.ifrs.org/10-years/10-years-summary/>

Piesiewicz, M., Ciechan-Kujawa, M., & Kufel, P. (2021). Differences in disclosure of integrated reports at energy and non-energy companies. *Energies*, 14(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/en14051253>

Singh, J. (2012). 2012 Integrated Reporting – a Comparison Between Developed and. Southeast Asia *Journal of Contemporary Business, Economics and Law*, 1, 2010–2013.

Sunde-Hansen, D. (2023). The Future of Energy: How can traditional energy companies transform? Deloitte. <https://www2.deloitte.com/no/no/blog/center-for-the-edge/2022/tranformation-energy-campanies.html>

Van Benthem, A. A., Crooks, E., Giglio, S., Schwob, E., & Stroebel, J. (2022). The effect of climate risks on the interactions between financial markets and energy companies. *Nature Energy*, 7(8), 690–697. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01070-1>

135: Karbon Fiyatlaması Yöntemleri ve Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Sektörü Açısından Önemi

Seyide Sevim Deniz

Elektrik Üretim A.Ş., Eurelectric Türkiye Taksonomi Alt Çalışma Grubu Başkanı

ÖZET

Bu çalışmada Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), Karbon Vergisi (KV) ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmalarından (SKDM) oluşan karbon fiyatlandırma yöntemleri tartışılarak AB Bölgesi tarafından 2026 yılı itibarıyla tam olarak yürürlüğe girecek olan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının Türkiye elektrik üretim sektörü açısından ülkemiz ekonomisine olası etkileri ve ülkemizin kendi karbon fiyatlandırma yöntemine sahip olmasının önemine değinilecektir. AB ETS’de karbonun ton başına fiyatı 2023 Şubat ayı itibarıyla 100 EURO seviyesine ulaşmıştır.² Ulusal ETS’nin hayata geçirilmesi halinde karbon ton fiyatının AB ETS ile aynı seviyede hesaplandığı senaryoda emisyonların azaltımı %34 seviyesinde hesaplanmaktadır.³ Karbonun ton başına 50EURO’dan hesaplandığı başka bir senaryoda ise 2032 yılına kadar 1,5 milyar EURO’ya varan kamu geliri elde edileceği öngörülmektedir.⁴ Ülkemizin elektrik üretiminde en büyük payın toplamda %65’e yakın bir oran ile doğal gaz ve kömüre ait olduğu görülmekte olup karbon temelli elektrik üretiminin ekonomimiz üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı emisyonlar açısından maliyeti göz ardı edilemeyecek boyuttadır. Bu çalışmanın amacı, karbon fiyatlandırmasının ülke ekonomisinde tutabilmenin yöntemleri ve elektrik üretim sektörünün yeniden yapılanması ile ne gibi kazançlar elde edilebileceği tartışılarak politika yapıcılara bir fikir sunabilmektir.

² <https://www.innoem.net/ab-karbon-fiyatlari-100-euroya-yukseldi/#:~:text=Avrupa%20Birli%C4%9Finin%20Emisyon%20Ticaret,%C3%B6ncesine%20g%C3%B6re%20%C3%B6nemli%20bir%200art%C4%B1%C5%9F.>

³ Potential Impact of Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy, Republic of Türkiye ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, Merch 2023, syf:3

⁴ Potential Impact of Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy, Republic of Türkiye ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, Merch 2023, syf:6

Anahtar Sözcükler: Karbon Vergisi, Sınırdaki Karbon Düzenlemesi, Emisyon Ticaret Sistemi, Elektrik Enerjisi Üretimi

ABSTRACT

In this study, carbon pricing methods consisting of Emissions Trading System (ETS), Carbon Tax (CV) and Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) will be discussed and the possible effects of the Carbon Border Adjustment Mechanism which will be fully implemented by the EU Region as of 2026, on the Turkish economy in terms of Turkey's electricity generation sector and the importance of our country having its own carbon pricing method will be mentioned. The price per ton of carbon in the EU ETS has reached EUR 100 as of February 2023. In the scenario where the price per ton of carbon is calculated at the same level as the EU ETS, the reduction of emissions is calculated at 34% if the National ETS is implemented. In another scenario, where the price of carbon is calculated at EUR 50 per ton, it is estimated that up to EUR 1.5 billion of public revenue will be generated by 2032. It is seen that the largest share of our country's electricity generation belongs to natural gas and coal with a total of nearly 65%, and the cost of carbon-based electricity generation on our economy in terms of both direct and indirect emissions cannot be ignored. The aim of this study is to provide policy makers with an idea by discussing the management of carbon pricing in the country's economy and what gains can be achieved by restructuring the electricity generation sector.

Keywords: Carbon Tax, Carbon Border Adjustment Mechanism, Emissions Trading System, Electric Power Generation

GİRİŞ

Sera gazı salınımlarının artışı günümüzde insanların ve diğer canlıların hayatını oldukça etkilemektedir, yaşanan ilkim felaketlerinin maddi zararları da bir o kadar hissedilmektedir. Bu bağlamda karbonun sosyal maliyeti (social cost of carbon, SCC) kavramı tartışılmaya başlanmıştır. Genel olarak salınan her bir ton karbonun dolar cinsinden maliyetini ifade eden bu kavramın ışığında sera gazı yaptırımları dünyada ilk kez 20. yy'ın son çeyreğinde öne sürülmüş ve 21. yy ile uygulamalar başlamıştır. En yaygın ve etkin olan yöntemler karbon

vergisini (KV) ve emisyon ticaret sistemi (ETS)dir. 2024 yılı itibariyle dünyada 75 tane faaliyet gösteren karbon fiyatlandırma enstrümanı vardır⁵. Bu uygulamaların en eskileri ve en etkin olanları AB tarafından hayata geçirilmiştir. 2050 yılı itibariyle karbon sıfır kıta olma hedefini belirleyen AB bölgesinin kendine ait ETS bulunmakta ve KV bazı bölgelerde uygulanmaktadır. Aynı zamanda günümüzde Dünyada 40'ı aşan ülkede KV veya ETS uygulanmakta ve karbon fiyatlandırması yapılmaktadır. Ayrıca 2024 yılı itibariyle dünya çapında uygulanan ETS'leri karbon salınımının %24'ünü kapsamaktadır⁶.

Karbon fiyatlandırmasının başlangıçta düşük tutulmasının fiyatlandırma sisteminin hayata geçirilmesi ve hedeflerine ulaşması açısından etkinliğini artırdığı söylenebilir ve artan SCC yüzünden karbon fiyatının düzenli olarak artırılması gereklidir⁷.

Dünya Bankası rakamlarına göre 2023 yılı itibariyle toplam sera gazı emisyonunun %23'ü fiyatlandırılmıştır. Fiyatlandırılan kısmın yaklaşık 2/3 kısmı ETS'ler tarafından, kalanı da KV olarak tahsil edilmiş ve 2022 yılında devletlerin karbon tahsilatından gelirleri toplam 95 milyar dolar seviyesine yükselmiştir⁸, 2024 yılı raporuna göre ise toplam sera gazı emisyonunun %24'ü fiyatlandırılmış olup 2023 yılı dünya hasılatı 104 milyar dolardır. Türkiye, Hindistan ve Brezilya'nın da potansiyellerine değinilen raporda bu ülkelerde karbon fiyatlandırması hazırlıklarının yapıldığı belirtilmiştir⁹.

⁵ <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/05/21/global-carbon-pricing-revenues-top-a-record-100-billion>

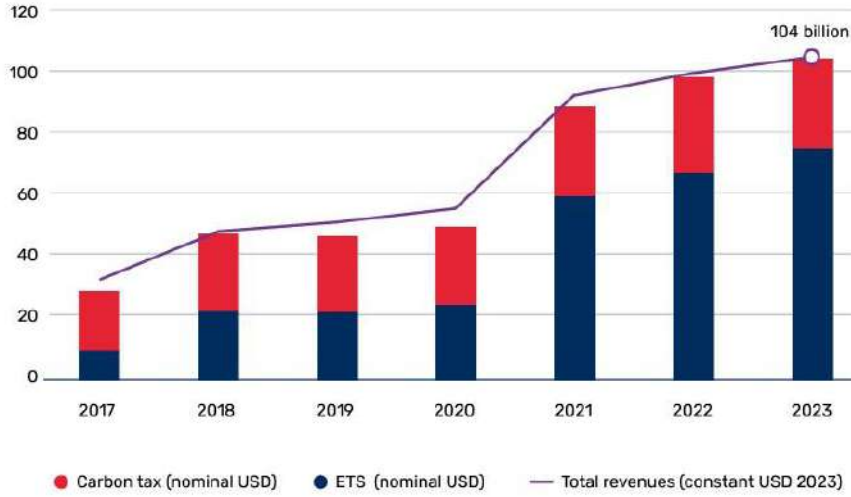
⁶ <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/05/21/global-carbon-pricing-revenues-top-a-record-100-billion>

⁷ Sera Gazı Emisyonu Azaltımı İçin Karbonun Fiyatlandırılması: Karbon Vergisi mi Emisyon Ticaret Sistemi mi?, Etem Karakaya, Gamze Akkoyun, Burcu Hiçyılmaz, Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi, yıl: 2023, sayı:8 8(4), sayfa:817

⁸ Sera Gazı Emisyonu Azaltımı İçin Karbonun Fiyatlandırılması: Karbon Vergisi mi Emisyon Ticaret Sistemi mi?, Etem Karakaya, Gamze Akkoyun, Burcu Hiçyılmaz, Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi, yıl: 2023, sayı:8 8(4), sayfa:817

⁹ <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/05/21/global-carbon-pricing-revenues-top-a-record-100-billion>

Grafik 1: Dünya Çapında Karbon Fiyatlaması Hasılatının Değişimi



(Grafik çevirisi: carbon tax: karbon vergisi, total revenues: toplam hasılat, Kaynak: Dünya Bankası)

Dünya geneli karbon fiyatlaması hasılatının 2020 yılından günümüze ivmesini artırdığı görülmektedir. Bunun en önemli sebebinin fiyatlama sistemlerinin yaygınlaşması, daha çok ülkede hayata geçirilmesi ve karbon ton fiyatının değişimidir.

YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikle karbon fiyatlaması için kullanılan temel yöntemler detaylandırılacak, güncel gelişmeler ve rakamlar ışığında ülkemiz ekonomisi açısından etkileri tartışılmak suretiyle ülkemizin elektrik üretimi sektörü profili incelenecektir. Çalışma boyunca kamu kurumları raporları, uluslararası kuruluşlara ait veriler ve akademik makaleler ve araştırmalar olmak üzere ikincil kaynaklar kullanılacaktır.

2.1. Karbon Vergisi (KV)

Karbon Vergisi (KV), çevresel tahribatın giderilmesine yönelik olarak siyasi otoritenin karbon salınmasına sebep olan faaliyetler üzerinden tahsis ettiği vergi türüdür. KV’de karbonun birim fiyatı önceden belirlenmiştir ve piyasa koşullarına göre değişiklik göstermez böylece verginin mükellefleri potansiyel karbon maliyetlerini hesaplayabilir. Bu mekanizmanın etkin olabilmesi için doğru kirleticiden vergi alınması, yönetimde istikrar, vergi oranının belirgin olması, vergi doğuran olayın tanımlanması gibi unsurlar önemlidir. Toplanan vergi hasılatının karbon salınımının azaltılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi ya da teşviklerin verilmesi gibi amaçlar için kullanılması şüphesiz ki bu yöntemin etkinliğini katbekat artıracaktır. Ancak ülkemizde ve dünyadaki uygulamalarda vergi gelirlerinin merkezi bütçede toplanması ve kamu harcamalarının genel bütçeden yapılması esastır.

KV, klasik vergiler gibi kamu geliri elde etmek amacıyla ve işlevi ile uygulamaya geçerse esas amacı olan ilkim değişikliğini durdurmak için ekonomiyi yeşil dönüşüme teşvik etmek geride kalacaktır. Bu yüzden bu verginin düzenlemesi ve elde edilen hasılatın harcanması kendine özgü olmalıdır. Bu verginin çıkış mantığı karbon salınımına sebep olan ek mali yükümlülük getirmesi böylece bu salınımı yapanların yöntemlerini değiştirmesini sağlamaktır. Böylece bu tür vergilerin mali olmayan çevresel amaçlar hizmet ettikleri söylenebilir¹⁰. KV Paris İklim Anlaşması çerçevesinde sera gazı emisyonlarını azaltmak üzere alınan en etkili yöntemlerden birisi olarak sayılır. Amacı işletmelerin emisyonlarını mali yaptırımlar ile azaltmaktır. KV ne gelir üzerinden ne servet üzerinden ne de harcama üzerinden uygulanabilir değildir bu yüzden klasik vergilerden farklı bir yer tutmaktadır. Çevre vergileri birincil çevre vergileri yani çevreye zarar verilmesinin önlenmesi ve ikincil çevre vergileri yani mali gelir elde etmeyi öncelik sayan vergiler olmak üzere ikiye ayrılırlar¹¹. Bu bağlamda KV’ni ikincil olarak değerlendirerek uygulamaya geçirmek verginin esas amacına hizmet etmesine engel olacaktır. Çevresel vergilerin hasılatlarının çevresel amaçlar için harcanması çok nadir karşılaşılan örneklerdir.

KV’nin üretim aşamasında karbon salınan ürüne uygulanması fosil yakıtları ile üretilen ürün ve hizmetlerin fiyatını artırır. Bu ürün ve hizmetler girdisi fosil yakıtları olan çıktı ürünlerin karlılığını azaltır, ücret ve tüketimi de kısıta uğrar, neticede karbon salınımı azalır. KV karbon

¹⁰ (kaynak: Dr. Öğ. Üyesi Emine Sevcan ARTUN, Karbon Vergisinin Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Yönlendirme Aracı Olarak Kullanılması, Yaşar Hukuk Dergisi, 2024, Cilt:6, Sayı:1, Syf:23)

¹¹ (kaynak: Dr. Öğ. Üyesi Emine Sevcan ARTUN, Karbon Vergisinin Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Yönlendirme Aracı Olarak Kullanılması, Yaşar Hukuk Dergisi, 2024, Cilt:6, Sayı:1, Syf:25)

yoğun üretim yapan ekonomik aktörler tarafından daha çok hissedilir. Ancak sonuçta emisyon azaltımı sosyal maliyetleri dengeler. Ayrıca KV'nin mevcut ÖTV aracılığıyla uygulamak işlevseldir¹². Enerji üretiminde yenilenebilir kaynağa ve enerji tüketiminde tasarrufa teşvik eder. Böylece fosil kaynaklı enerji girdisi olan ürünler için de hem birincil hem dolaylı emisyonlar azalmış olur.

Verginin uygulanması aşamasında ortaya çıkan başka bir konu vergi mükellefi kavramıdır. Emisyona sebep olan fosil yakıtı kullanan kişi ve işletmeler bu verginin mükellefi olacaktır. Vergi doğuran olan karbon üst sınırının aşılması ve verginin miktarının belirlenmesi ise ton başı fiyatlandırma ile sağlanacaktır.

KV'nin dünyada çeşitli ülkeler tarafından uygulamaları ve bu uygulamaların sonuçları mevcuttur. Örneğin, Fransa ETS'ne bağlı olan işletmeleri KV'den muaf tutarken Almanya KV'den elde edilen gelirleri çevre korunması için kullanma kararı almıştır. İngiltere ise KV sayesinde 10 yıldan kısa sürede kömürden elektrik üretiminde 10 kattan fazla düşüş sağlamıştır. Danimarka'da enerji yoğun sektörlerde faaliyet gösterenler için ekonomik rekabeti bozmamak adına enerji verimliliğini sağlamak adına taahhütlerde bulunmak şartı ile vergi muafiyeti olanağı sunulmuştur¹³.

KV kirleticiliği vergilendirmenin zor olması sebebiyle bazen etkinliğini yitirir. Yine de ton üretim başına karbon oranı ölçülebildiği durumlarda uygulanabilir. KV'nin en önemli sakıncalarından birisi karbon kaçağı riskidir. Vergi vermekten kaçınan üretici ülke dışı üretime yönelebilir.

2.2. Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)

ETS işletmelerin karbon tahsisatlarının alım satım yaptığı pazardır. Karbon emisyonu ile neden olunan negatif dışsallığın kirleticiler tarafından giderilmesi prensibi ile oluşturulan bu sistemde karbonun fiyatı piyasa tarafından belirlenir ve düşük emisyonlu üreticinin yüksek emisyonlu üreticiye hakkını satması sağlanır. Emisyon üst sınırı, sektörel kapsam, dahil olan gazlar, tahsisat kullanım süresi (yıllık veya daha uzun vadeli), sektör içi kapsam (çevre etkinliği, rekabetçilik, ekonomik verimlilik... gibi) unsurlar ETS'nin öğelerini oluşturur. ETS'nin sağlıklı

¹² (kaynak, Birol Ubay, Yüksel Bilgici, Karbon Fiyatlandırmasında Emisyon Ticaret Sistemi ve Önemi, Kırklareli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Yıl (Year): 2021, Cilt (Volume): 10, Sayı (Issue): 1, syf. 53).

¹³ (kaynak: Dr. Öğ. Üyesi Emine Sevcan ARTUN, Karbon Vergisinin Türkiye'de Yenilenebilir Enerjiye Yönlendirme Aracı Olarak Kullanılması, Yaşar Hukuk Dergisi, 2024, Cilt:6, Sayı:1, Syf:33)

işleyebilmesi için kapsam ve ögeleri açıkça belirlenmesi gerekir. Piyasanın istikrarlı çalışması için üst sınır, denkleştirme gibi mekanizmaların düzgün çalışması, emisyon tahsisatlarının piyasaya işlevsel dağıtılmış olması ve bu sayede karbon kaçağına engel olunabilmesi ticaretin hangi araçlar ile gerçekleşeceği, tahsisat kayıtları ile ilgili düzenlemelerin netlik kazanmış olması gerekir. ETS sektörel emisyon sınırları ve tahsisat yapma oranları ve yöntemleri (ihale, ücretsiz dağıtım.. gibi) merkezi otorite tarafından belirlenir¹⁴

ETS'nin etkin çalışabilmesi için ölçülebilir, raporlanabilen, kontrol edilebilir sektör ve sera gazları ile oluşturulması gereklidir. Bu yüzden başta elektrik üretimi olmak üzere fosil yakıtları ağırlıklı kullanılan sektörler ilk aşamada sisteme dahil edilmiştir. Farklı ETS'lerinin birbirine bağlanması ile karbon ton fiyatının piyasa mekanizması aracılığıyla dünyada tek geçerli bir ETS oluşturulması hedeflenmektedir¹⁵.

ETS'de emisyon türleri üçe ayrılır: Kapsam 1, işletmenin sahip olduğu araçlar, yaptığı faaliyetler veya doğrudan sebep olduğu emisyonlardır, işletmenin esas faaliyet konusu işlemler, araç yakıtı, üretimdeki kimyasal süreçler, gibi örnekleri ifade eder. Kapsam 2, enerji tüketimden kaynaklanan emisyonlardır, elektrik, ısınma, soğutma sistemleri gibi örnekleri ifade eder. Kapsam 3 ise, diğer dolaylı emisyonları kapsar, işletmenin girdilerindeki gömülü emisyonlar, hammadde, nakliye, atık imha süreci gibi örnekleri ifade eder.

AB ETS, Kyoto protokolü doğrultusunda 2005 yılında yürürlüğe girmiştir ve ilk faaliyete başlayan, dünyanın en büyük sistemidir. Çalışma yöntemi cap and trade (üst sınır ticareti)dir. Bu yöntemde karbon yoğun 54 grubun faaliyet gösteren firmalara üst sınırlar belirlenmiş ve süreye göre giderek azalan bedava alan/kota tanımlanmıştır. Kotasını doladuran firma başka bir firmadan kota satın alabilir. Gerekli karbon dönüşümünü yapmayan firmalar AB ile olan ticaretinde AB ETS'nin fiyatlandırmasına tabi tutulmaktadır¹⁶. Sisteme dahil edilen sektörlerin emisyonları için üst limitler belirlenerek iklim politikası devletler tarafından belirlenmekte ve limitler sera gazı emisyonlarını azaltmak için zamanla kademeli şekilde düşürülmektedir. Tahsisatlar ton başına Emisyon Hakkı Birimi (Emission Allowance Unit /EAU) olarak tespit edilerek ücretsiz tahsis/kota ya da açık artırma/ihale yoluyla sağlanmaktadır. Emisyonu

¹⁴ (Kaynak, Birol Ubay, Yüksel Bilgici, Karbon Fiyatlandırmasında Emisyon Ticaret Sistemi ve Önemi, Kırklareli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Yıl (Year): 2021, Cilt (Volume): 10, Sayı (Issue): 1, syf. 54).

¹⁵ (Kaynak: Behzat Ecem Koç, Selahattin Kaynak, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının Türkiye-AB-27 Dış Ticaret İlişkisi Üzerine Olası Etkisi, Verimlilik Dergisi, Vol.57, Sayı: 2, syf:276)

¹⁶ (Kaynak, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye'nin İhracatına Olası Etkileri, Evrim İmer Ertunga, Ömer Kayhan Seyhun, Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi, Cilt 13, sayı 1, 2022, syf. 5)

tahsisatından fazla olan işletmenin tahsisatı tamamen kullanmayan işletmeden emisyon hakkı satın alması ile karbon piyasası oluşmakta ve karbon fiyatı bu piyasada belirlenmektedir. Bu sistemde piyasa mekanizması işlemektedir. Avrupa Komisyonu emisyon tahsisat limitlerini belirleyerek sistemin arz tarafını, emisyonu sebep olan işletmeler ise sistemin talep tarafını oluşturmaktadır¹⁷.

ETS etkin bir sistem olmakla birlikte karbon maliyetlerini fiyatlara yansıtılması yüzünden vergi kaçığına ve sistemin yüklenicisinin nihai tüketici olmasına yol açması gibi sakıncaları bulunmaktadır. AB ETS’de de karbon fiyatlaması ile işletmelere maliyet artırıcı bir uygulama olduğu için sistem içi ve dışı üreticiler arasında rekabeti bozucu ve etkiye sahiptir ve sistem içi üreticilerin ETS olmayan yerlerde üretimlerini kaçırmalarını sebep olmaktadır. Bu aynı zamanda bu işletmelerin sağladığı istihdamın AB yerine ETS ülkesi olmayan yerlerde sağlanmasına da sebep olmaktadır. Bu sakıncaların önüne geçebilmek için SKDM yasalaşmış ve yürürlüğe girmiştir.

2.3. Avrupa Birliği Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması (ABSKDM)

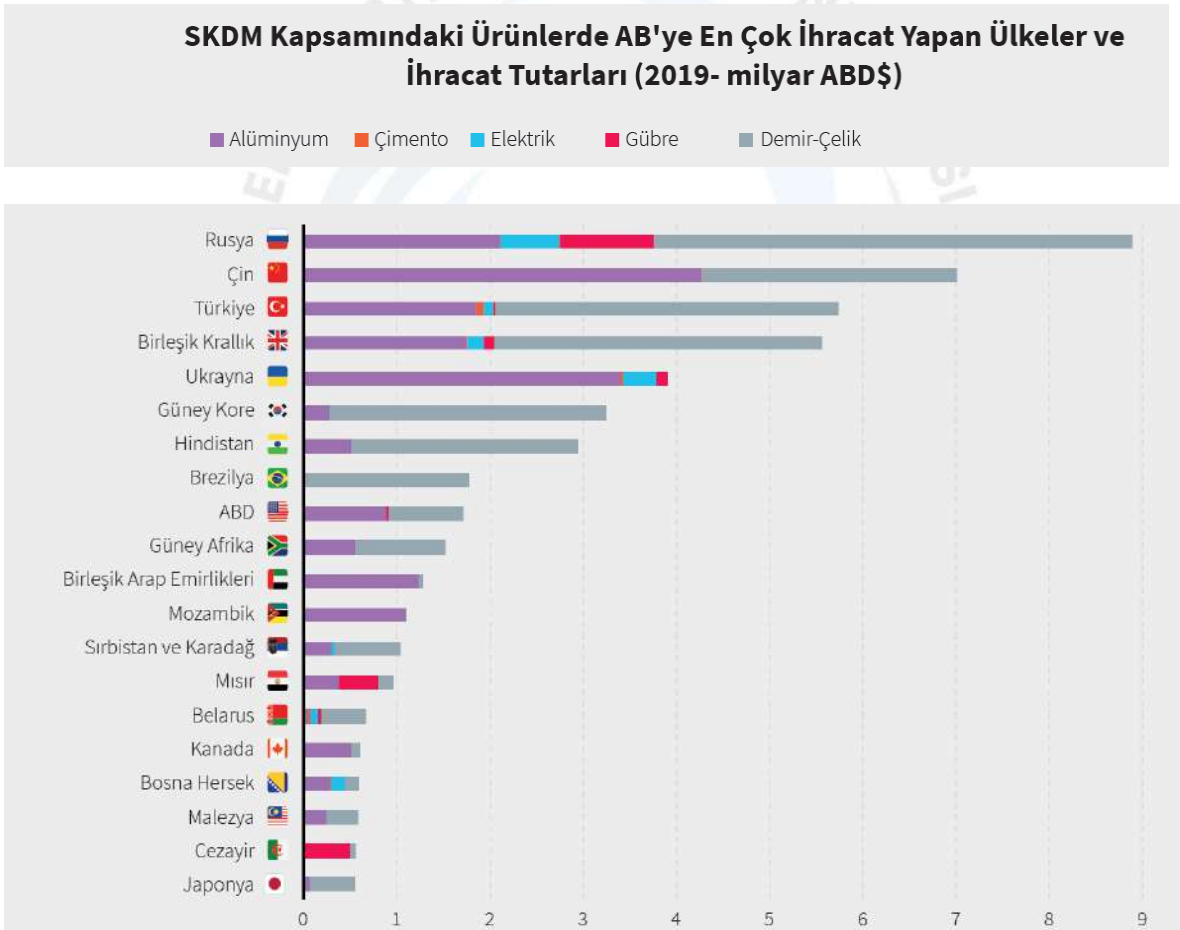
Avrupa Birliği Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması (AB SKDM) güncel halini alana kadar bir takım aşamalardan geçmiştir: ilk olarak 16 Mart 1998 Kyoto Protokolü daha sonra 12 Aralık 2015 Paris İklim Anlaşması, son olarak da 11 Aralık 2019 Yeşil Mutabakat ve 2021 yılı revizyonudur. İlk iki aşamanın yaptırımları olmadığı için etkinliği sınırlı olmuştur ancak 3. aşamanın somut hedefleri ve yaptırımları olduğu için daha etkindir. Yeşil Mutabakat 2021 yılı revizyonunda 1990 yılı düzeyine göre %40 emisyon azaltımı, %32 yenilenebilir enerji üretim payı gibi hedefler belirlenmiş olup, 2030 yılında %55 oranında azaltım, 2050 yılında ise karbon nötr kıta olma nihai hedefi vardır.

Yeşil Mutabakat araçlarından birisi SKDM olup 1 Ekim 2023’te yürürlüğe girmiştir. AB SKDM’si 2023-2025 arası geçiş dönemi ve 2026 sonrası tam uygulama dönemi olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci dönemde ithalatını beyan etmekle yükümlü olanlar gömülü emisyonu tespit etmek ve raporlamak zorundadır. İkinci dönemde ise bu raporlanan gömülü emisyonlar karşılığında karbon sertifikaları satın almak zorunlu hale gelecektir. 1. dönemde

¹⁷ (Kaynak: Behzat Ecem Koç, Selahattin Kaynak, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının Türkiye-AB-27 Dış Ticaret İlişkisi Üzerine Olası Etkisi, Verimlilik Dergisi, Vol.57, Sayı: 2, syf:275)

doğrudan etkilenecek sektörlerin karbon salınım verileri AB ithalatçı firması tarafından toplanarak ve rapor edilmesi istenilecek olup ulusal otorite bu ithalatçı firmalara karbon sertifikası satma yetkisi ve yükümlülüğü verecektir. Her yıl mayıs ayında bir önceki yıla ait ithal edilen ürünlerin ve karbon miktarı bildirmeleri gerekecektir.¹⁸ Bu düzenlemeden en çok etkilenecek ekonomik sektörler çimento, elektrik, gübre, demir-çelik ve alüminyumdur. Ülkemiz, bu sektörler kapsamında Rusya ve Çin'den sonra AB'ne en büyük ihracat payına sahip 3. ülkedir.

Grafik 2: SKDM Kapsamındaki Ürünlerde AB'ye en çok İhracat Yapan Ülkeler ve İhracat Tutarları



Kaynak: SHURASTAT

¹⁸ Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye'nin İhracatına Olası Etkileri, Evrim İmer Ertunga, Ömer Kayhan Seyhun, Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi, Cilt 13, sayı 1, 2022, syf. 4

SKDM'dan dolayı olarak etkilenecek sektörler de belirlenerek bunlardan toparlanacak veriler geçiş dönemi sonrası tüm ürün gruplarının karbon fiyatlaması için veri oluşturacaktır. Tam uygulama döneminde ise bu veriler sayesinde belirlenecek olan karbon vergileri doğrudan ve dolaylı etkilenen ürün gruplarının fiyatlamasında kullanılacaktır. SKDM'nin asıl amacı daha önce bahsedildiği gibi KV'ne tabi tutulan AB bünyesindeki işletmeler için rekabeti eşitleme, karbon kaçağını engelleme ve istihdamın devamlılığını sağlamaktır. Diğer taraftan AB'ne doğrudan bağlı olan gelişmekte olan ülkeler ya da küçük ölçekli ekonomiye sahip ülkeler açısından bu uygulama dış ticaret dengelerini sarsıcı niteliğe sahiptir. Ülkelerin karbon fiyatlamasına aynı uygulama ile tabi olması gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler açısından fırsat eşitsizliğine, dolayısıyla bu ülkeler arasındaki uçurumun artmasına sebep olacaktır¹⁹. Bu durumu değerlendirirken ülkelerin AB ile olan ihracat büyüklüklerinin yanı sıra bu ihracatın ülkelerin ekonomilerindeki payı da değerlendirmek doğru bir yaklaşımdır. AB ülkeleri ile ihracatının %40'dan fazlasını yapan Türkiye için de SKDM doğrudan etkileyici bir uygulamadır.

BULGULAR

3.1. AB SKDM'NİN Türkiye'ye Potansiyel Etkileri

Türkiye'nin dış ticaret hacminin en yoğun olarak gerçekleştiği AB Bölgesi özellikle 2026 yılından sonra uygulamaya geçecek yasal düzenlemeler karbon fiyatlandırması yoluyla, dış ticaret ortakları ile olan ilişkilerini temelden değiştirecek ve karlılık, rekabet ve maliyetleri yeniden oluşturacak bir sisteme giriş sağlayacaktır. Karbon fiyatlandırmasını 2005 yılından beri tüm kıtada Emisyon Ticaret Sistemi ve bölgede yer alan bazı devletlerin müstakil olarak uyguladığı Karbon Vergisi marifetiyle kendi içerisinde gerçekleştiren AB, bahsi geçen karbon fiyatlandırmaları ek maliyetler ve istihdam kaybı gibi ekonomik sonuçlara yol açarken, bu uygulamaların olmadığı yerler ile ticarette rekabet zorlukları ve karbon kaçağı gibi sonuçlar doğurmasından dolayı SKDM ile dış ticaret dengesini karbon piyasası olmayan ülkeler ile korumak adına eyleme geçecektir.

AB SKDM'nin kapsama aldığı karbon yoğun 6 sektörün ülkemizin dünyadaki ihracat rekabet gücü açısından değerlendirilmesine göre çimento sektöründe güçlü, demir çelikte orta güçlü,

¹⁹ Lim, B.; Hong, K.; Yoon, J.; Chang, J.-I.; Cheong, I. Pitfalls of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism. *Energies* **2021**, *14*, 7303. <https://doi.org/10.3390/en14217303>

alüminyumda zayıf olduğu; elektrik ve gübre sektörlerinde dezavantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak dezavantajlı bu sektörlerde AB ile ihracatta istikrarlı bir yükseliş trendi içerisinde olduğu da bulgular arasındadır.²⁰ Bu açıklamalara ek olarak Türkiye'nin AB'nin altıncı büyük ticaret ortağı olması Türkiye'ye AB bölgesine olan ihracatının %40'ını gerçekleştirdiği durumları göz önüne alındığında SKDM'nin önemi bir daha ortaya çıkmaktadır. Bu uygulamaya ilişkin olarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Mart 2023 tarihli rapora göre, AB SKDM tarafından karbonun ton başına 75 EURO olarak fiyatlanması durumunda 2027 yılına kadar 138 milyon EURO; karbonun ton başına 150 EURO olarak fiyatlanması durumunda ise 2032 yılına kadar 2,5 milyar EURO düzeyine ulaşacak, ülkemiz açısından ciddi maliyetler oluşacağı ortaya çıkmıştır.

Diğer taraftan ülkemizde oluşturulacak yerel bir ETS'de ülkemiz karbon maliyetlerinin karbonun ton başına 20 EUR olarak fiyatlanması durumunda 2027 yılında 56 milyon EURO; karbonun ton başına 50 EUR olarak fiyatlanması durumunda ise 2032 yılında 1,08 milyar EURO'ya düşeceği hesaplanmıştır.²¹ Karbon fiyatlamalarının alternatif senaryoları pek çok araştırmaya konu olmuştur, TÜSİAD tarafından daha eski tarihli raporda ise karbon fiyatının 30 Euro/tCO₂e ve 50 Euro/tCO₂e olduğu farklı fiyat senaryolarında karbon maliyetini sırasıyla yaklaşık 1 milyar Euro ve 1,8 milyar Euro olarak hesaplamıştır²².

3.2. Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Üretim Profili

Ülkemizin elektrik üretim sektörünü incelediğimize ise elektrik üretim kaynaklarını doğal gaz ve kömür olmak üzere fosil yakıtlar oluşturduğu ve bu kaynaklardan yıllık elektrik üretiminin yarısından fazlası gerçekleştirildiği görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının verilerine göre 2023 yılında elektrik üretimimizin %36,3'ü kömürden, %21,4'ü doğal gazdan elde edilmiştir²³. Kurulu güç açısından en büyük pay ise %30.9 ile hidrolik enerjiye ait olmasına rağmen üretim her yıl kurulu güç oranında ile gerçekleşmemektedir. Ülkemizde 2021 yılında 332.9 TWh elektrik tüketildiği belirlenmiş olup bu rakamın 2025 yılında 370 TWh'a, 2040

²⁰ Aktaş Çimen, Z. (2024). Sınırdaki Karbon Düzenlemesi ve Seçilmiş Sektörlerde Türkiye'nin Küresel Rekabet Gücü, Politik Ekonomik Kuram, 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.30586/1378742>, 2024

²¹ Potential Impact of the Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy, Quantification Of The Economic Impacts And Review Of Climate Policy Response Options, March 2023, sayfa 1

²² Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği (TÜSİAD). (2020). "Ekonomik Göstergeler Merceğinden Yeni İklim Rejimi". <https://tusiad.org/tr/yayinlar/raporlar/iten/10633-ekonomik-gostergeler-merceginden-yeni-iklim-rejimi-raporu>, (Erişim Tarihi: 16.07.2024)

²³ <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>

yılında ise 591 TWh'a çıkacağı tahmin edilmektedir²⁴. Karbon fiyatlandırması ile ülkemiz ithalatının ne ölçüde etkilenebileceği ve elektrik üretim sektörünün bu etkiye ne kadar dahil olduğunun önemine değinerek, son 20 yılda dünyada ve Türkiye'de karbon salınımı artarken yenilenebilir enerji kullanım payı arttıkça karbon salınım hızının düştüğü de saptanmıştır.²⁵ Yapılan araştırmalarda Türkiye'de CO2 emisyonunu etkileyen en önemli değişkenin yenilenebilir enerji tüketimi değişkeni olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Türkiye'de CO2 emisyonunu en önemli üç değişken sırasıyla yenilenebilir enerji tüketimi ile beraber birincil enerji tüketimi ve ihracat değişkenleridir. Ayrıca finansal gelişmenin CO2 emisyonunu üzerinde diğer değişkenlere göre daha az öneme sahip olduğu belirlenmiştir.²⁶

Halihazırda kurulu olan kömür santrallerinin AB SKDM yürürlüğe girdikten sonra karlılığını tamamen yitireceğini ve ülkemiz ekonomisine maliyet getireceğini ortaya çıkaran çalışmalar mevcuttur. Benzer durum daha az maliyetli olarak doğal gaz santralleri için de geçerlidir. Ülkemizin sera gazı emisyon rakamlarına bakıldığında 2021 yılında enerji alanında toplam emisyonu 402 milyon tonu geçmektedir.²⁷ Bu tabloda elektrik üretimi kendi sektörü açısından doğrudan, elektriğin girdi olarak kullanıldığı diğer sektörler açısından gömülü emisyonun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Elektrik sektöründeki gömülü emisyonlar elektrik üretimden kaynaklanan toplam emisyonun toplam elektrik üretimine bölünmesi ile hesaplanacak olup²⁸ fosil kaynaklı elektrik üretim payının azalması bu oranın düşürülmesi açısından olumlu olacaktır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Avrupa Birliğinin 2050 yılı karbon nötr kıta hedefini belirlemesi ve SKDM'nı hayata geçirmesi ile karbon fiyatlamasında dünyanın en etkin rolüne sahip politik aktör haline gelmesini sağlayacak ve gücünün meşruiyetini artıracaktır.²⁹ Ayrıca, dünyada uygulanan ve uygulanacak olan tüm karbon fiyatlandırma sistemleri birleştirilmek suretiyle ortak karbon fiyatlaması

²⁴ Seyda Özbektaş, Mahmut Can Şenel, Bilal Sungur, Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kurulum Maliyetleri, Mühendis ve Makine, 64, 711, 2023, syf: 346)

²⁵ İsmail Kavaz, Burak Kaya, Türkiyede Yenilenebilir Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme Ve Co2 Emisyonu Arasındaki İlişkinin Analizi: Ardl Sınır Testi Yaklaşımı, İşletme Ekonomi Ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, Yıl:2023, Sayı:2, Syf:223).

²⁶ Türkiye'de CO2 Emisyonlarının Belirleyicileri: Çok Katmanlı Yapay Sınır Ağları ile Bir Uygulama, Hasan SÖYLER ve Oktay KIZILKAYA, MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi, cilt: 12, sayı:OS, sayfa: 113

²⁷ <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672&di=1>

²⁸ Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Öğrenme Modülü, Elektrik Üretim Sektörü SKDM Kurs Notları, Ticaret Bakanlığı Kurs Notları, syf:11

²⁹ Lim, B.; Hong, K.; Yoon, J.; Chang, J.-I.; Cheong, I. Pitfalls of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism. *Energies* **2021**, *14*, 7303. <https://doi.org/10.3390/en14217303>

başarırsa küresel ekonomide dolarizasyon kadar etki sahibi olacak yeni bir unsur niteliğinde karbonizasyonun ortaya çıkacağını söylenebilir. Bu dönüşüm karşısında ülkemizin kendi karbon fiyatlandırma mekanizmalarını hayata geçirip karbon tahsisat ve tahsilatını yaparak bu maliyeti kendi ekonomisi içerisinde tutabilmesi, karbon fiyatlamasında etkin bir role sahip olması oldukça önem arz etmektedir. Ülkemizin doğrudan ve gömülü emisyonlarını fiyatlandırmak üzere raporlamaların yapılması ve tahsisat bedellerinin ülke bütçesinde tutulabilmesi adına acil eyleme geçmesi gerekmektedir. Kısa vadede AB SKDM'nın ülkemiz ekonomisine getireceği maliyetlerin önüne geçilebilmesini, dış ticaret dengesinin korunabilmesi ve iyileştirilebilmesini, ekonomimizin karbon düşük karbonlu üretime yönelmesini sağlamak adına ilk aşamada yerel ETS'nin oluşturulması ve karbon sertifikalarının temin edilmesi, diğer taraftan düşük karbonlu üretimi ve elektrik üretim sektörü özelinde yenilenebilir kaynaklara geçişin teşvikine yönelik KV'nin hayata geçirilmesi elzemdir.

Ülkemizde kullanılan enerji kaynaklarının yenilenebilir kaynaklara geçişinin sağlayabilmek doğrudan emisyonun, yenilenebilir kaynaklar ile elektrik üretiminin sağlanması ise elektriği girdi olarak kullanan tüm çıktı ürünlerde gömülü emisyonun önüne geçilmesine yardımcı olacaktır. Karbon fiyatlamasından elde edilen hasılatın da doğrudan elektrik üretim sektörünün karbonsuzlaştırılmasına yönelik kullanılması da verimliliği artıracaktır.

ESK
2024

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.innoem.net/ab-karbon-fiyatlari-100-euroya-yukseldi/#:~:text=Avrupa%20Birli%C4%9Fi'nin%20Emisyon%20Ticaret,%C3%B6ncesine%20g%C3%B6re%20%C3%B6nemli%20bir%20art%C4%B1%C5%9F.> (Erişim Tarihi: 12.04.2024)
- [2] Potential Impact of Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy, Republic of Türkiye ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, Merch 2023, syf:3,6, 2023
- [3] <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/05/21/global-carbon-pricing-revenues-top-a-record-100-billion> (Erişim Tarihi: 01.07.2024)
- [4] Karakaya, E.; Akkoyun, G.; Hiçyılmaz, B.; “Sera Gazı Emisyonu Azaltımı İçin Karbonun Fiyatlanması: Karbon Vergisi mi Emisyon Ticaret Sistemi mi?”, Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi, yıl: 2023, sayı:8 8(4), sayfa:817, 2023
- [5] ARTUN, Dr. Öğ. Üyesi Emine Sevcan, “Karbon Vergisinin Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Yönlendirme Aracı Olarak Kullanılması”, Yaşar Hukuk Dergisi, 2024, Cilt:6, Sayı:1, Syf:23, 25, 33, 2024
- [6] Ubay, B.; Bilgici, Y.; “Karbon Fiyatlandırmasında Emisyon Ticaret Sistemi ve Önemi, Kırklareli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi”, Yıl (Year): 2021, Cilt (Volume): 10, Sayı (Issue): 1, syf. 53, 54, 2021
- [7] Koç, B. E.; Kaynak, S.; “Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının Türkiye-AB-27 Dış Ticaret İlişkisi Üzerine Olası Etkisi”, Verimlilik Dergisi, Vol.57, Sayı: 2, syf:276, 275, 2023
- [8] Ertunga, E. İ.; Seyhun, Ö. K.; “Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye’nin İhracatına Olası Etkileri”, Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi, Cilt 13, sayı 1, 2022, syf. 5, 4, 2022
- [9] Lim, B.; Hong, K.; Yoon, J.; Chang, J.-I.; Cheong, I. “Pitfalls of the EU’s Carbon Border Adjustment Mechanism”, Energies **2021**, 14, 7303 <https://doi.org/10.3390/en14217303>
- [10] Aktaş Çimen, Z. (2024). Sınırdaki Karbon Düzenlemesi ve Seçilmiş Sektörlerde Türkiye’nin Küresel Rekabet Gücü, Politik Ekonomik Kuram, 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.30586/1378742>, 2024
- [11] Potential Impact of the Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy, Quantification Of The Economic Impacts And Review Of Climate Policy Response Options, March 2023, sayfa 1
- [12] Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği (TÜSİAD). (2020). “Ekonomik Göstergeler Merceğinden Yeni İklim Rejimi”, <https://tusiad.org/tr/yayinlar/raporlar/item/10633-ekonomik-gostergeler-merceginden-yeni-i-klim-rejimi-raporu>, (Erişim Tarihi: 16.07.2024)
- [13] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim Tarihi: 05.04.2024)
- [14] Özbektaş, S.; Şenel, M. C.; Sungur, B. “Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kurulum Maliyetleri”, Mühendis ve Makine, 64, 711, 2023, syf: 346, 2023
- [15] Kavaz, İ.; Kaya, B. “Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme Ve Co2 Emisyonu Arasındaki İlişkinin Analizi: Ardl Sınır Testi Yaklaşımı”, İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, Yıl:2023, Sayı:2, Syf:223, 2023
- [16] Söyler, H.; ve Kızılkaya, O.; “Türkiye’de CO2 Emisyonlarının Belirleyicileri: Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları ile Bir Uygulama”, MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi, cilt: 12, sayı: ÖS, sayfa: 113, 2023
- [17] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672&dil=1>, (Erişim Tarihi: 16.04.2024)
- [18] “Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Öğrenme Modülü, Elektrik Üretim Sektörü SKDM Kurs Notları”, Ticaret Bakanlığı Kurs Notları, syf:11
- [19] “State and Trends of Carbon Pricing 2024”, World Bank, syf:28

138: Türkiye’de Elektrikli Araçların Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Etkisinin Değerlendirilmesi

Seyit Cem Yılmaz

BEDAŞ

Aynur Eray

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Bu çalışmada Türkiye’deki büyük şehirlerden birinde ilgili dağıtım bölgesi SCADA verileri Digsilent PowerFactory yazılımında kullanılarak 36 adet güç trafosu içeren elektrik dağıtım şebekesi için, elektrikli araçların (EA) orta gerilim dağıtım şebekesine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla maksimum yüklenmenin gözlemlendiği gün için, 15 dakikalık çözünürlükte yük karakteristiği oluşturulup bu yük karakteristiği, tüm fiderlere dağıtılarak YG/OG güç trafolarından OG/AG dağıtım trafolarına kadar dağıtım şebekesi modellenmiştir. Yazılım ile gerçekleştirilen yük akış analizi sonucunda, maksimum yüklenme durumları, maksimum gerilim düşümü ve EA’lardan reaktif destek alındığı durumda reaktif güç ve güç faktörü değişimi incelenerek 2025 ve 2030 yılları için, rastgele şarj, parkta şarj ve gece tarifesi senaryoları ile;

- Binek kullanımında olan EA sayısının, karayollarındaki tüm otomobillere oranının %3-%18,5 aralığında değişen yaygınlaşma oranlarında olduğu
- Şarj istasyonlarının fidere dağılmış ve fiderin güç trafosuna en uzak noktasında bağlanmış olduğu
- EA’ların kontrollü şarj kapsamında reaktif katkı verdiği durumlar incelenmiştir.

Türkiye karayollarında 2025 ve 2030 yıllarında sırasıyla 0,5 ve 1,35 milyon elektrikli aracın olacağı öngörülmüştür. Bu da seçilen pilot şebeke bölgesinde sırasıyla %3 ve %7 yaygınlaşmaya (Karayollarındaki Binek EA Sayısının, Karayollarındaki Otomobil Sayısına Oranı) denk gelmektedir. Bu yaygınlaşmanın beklenenden daha fazla olması ihtimaline karşılık

olarak, analizler %15 ve %18,5 yaygınlaşma oranlarında (EA sayısının sırasıyla Türkiye karayollarında 2,7 milyon ve 3,4 milyon olması durumları) belirli bölge için tekrarlanmıştır. Kontrollü şarj durumunda elektrikli araçların OG şebekeye etkileri incelendiğinde;

- EA sayısının artmasıyla, yaygınlaşma oranı %18,5 olduğu durum için yüklenme oranı parkta şarj senaryosunda %93'e ulaşırken, gece tarifesinde %85 olması, EA şarjının geceye yönlendirilmesinin,
- EA'ların şebekeye reaktif katkı verebilmesi için EA şarj işleminin mümkün olduğunca geceye kaydırılması ve böylece mevcut gece yüklerinin düşük olması ve Orta Gerilim yer altı kablo uzunluğunun fazla olması nedeniyle şebekelerdeki kapasitif yüklenmenin, EA'ların sağlayacağı endüktif kompanzasyon ile üstesinden gelinebilmesinin,
- EA'ların şarj için fider sonundan şebekeye bağlanması, yönetmelikte yer alan sınırlar içerisinde kalınmasına karşın, gerilim düşümünde artışa neden olduğundan şarj istasyonlarının fider boyunca dağıtılmasının, elektrik şebekesi açısından olumlu bir etki yaratacağı sonucu çıkarılmıştır.

Sonuç olarak; reaktif oran limitlerinin dışına çıkan pek çok YG/OG Güç Trafosundan beslenen OG seviyesindeki Dağıtım Şebekesi, elektrikli araçların şarj olma süresi boyunca 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif yük çekmesi durumunda, özellikle gece saatlerinde şarjın teşvik edildiği durumda güç faktörü açısından iyileşme göstermekte ve limitler içerisine girmektedir. Şebeke yöneticisinin güç faktörünü anlık olarak otomasyon sistemleri ile takip edip şarj olan araçların şarj istasyonlarına sinyal göndererek sürekli olarak araçlardan farklı seviyelerde endüktif veya kapasitif güç faktörü talep etmesi bir hayli işletilmesi zor ve ek olarak işletme ve bakım maliyeti getiren bir senaryo olduğu için zaten kapasitif özellikte olan şebekeye sabit olarak 0,9 endüktif güç faktöründe EA yüklerinin bağlanması, eğer AG seviyesindeki şebekenin karakteristiği açısından da uygunsa, daha mantıklı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Dağıtım Şebekesi Etkisi, Reaktif Destek, Gerilim Düşümü, Maksimum Yüklenme

ABSTRACT

This study analyzes data from major cities in Turkey, utilizing SCADA data from relevant distribution zones within the Digsilent PowerFactory software to examine the electricity distribution network, which includes 36 power transformers. The focus is on assessing the impact of electric vehicles (EVs) on the medium voltage (MV) distribution network. For the day with the maximum observed loading, a 15-minute resolution load characteristic was

generated and distributed across feeders from HV/MV power transformers to MV/LV distribution transformers, thereby modeling the distribution network. The load flow analysis performed with the software assessed the conditions of maximum load, maximum voltage drop, and changes in reactive power and power factor with reactive support from EVs. Scenarios for the years 2025 and 2030 included random charging, park charging, and night tariff charging strategies.

Key findings are as follows:

- The EV penetration rates varied between 3% and 18.5% of all cars on the roads.
- Charging stations were distributed along feeders, connected to power transformers at the furthest points.
- The impact of EVs' reactive power contribution was evaluated under controlled charging scenarios.

For 2025 and 2030, Turkey is projected to have 0.5 and 1.35 million EVs, respectively, corresponding to 3% and 7% penetration rates in the pilot network area. Higher penetration rates of 15% and 18.5% were also considered, with the number of EVs reaching 2.7 million and 3.4 million, respectively.

Controlled charging of EVs revealed that:

- With increasing EV numbers, the penetration rate reaches 93% in the park charging scenario and 85% in the night tariff scenario, with a shift of EV charging to nighttime.
- Reactive contribution to the grid can be managed by shifting EV charging to nighttime, mitigating capacitive loading in MV underground cable networks.
- Although connecting EV charging from the end of the feeder stays within regulatory limits, distributing charging stations along the feeder is beneficial for reducing voltage drop.

In conclusion, the study indicates that connecting EV loads with a constant inductive power factor of 0.9 during the charging period, particularly during nighttime, improves the power factor and remains within regulatory limits. Real-time automation of the network manager's power factor and signaling the charging stations for different levels of inductive or capacitive demand could be challenging and costly. Thus, integrating EV loads with a constant inductive power factor of 0.9 is a more feasible approach, assuming it aligns with the characteristics of the LV level network.

Keywords: Electric Vehicles, Distribution Network Impact, Reactive Support, Voltage Drop, Maximum Loading

GİRİŞ

Elektrikli araçlar; derinleşen iklim krizi tehdidi altındaki dünyamızda, karbon emisyonlarını azaltmak, fosil yakıtlara olan ihtiyacı asgari düzeye indirmek ve şehirlerdeki hava kirliliğini önlemek gibi birçok faydaya sahiptir. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması ve beraberinde ona uygun şarj altyapıları ile haberleşme teknolojilerinin bu sistemlere entegrasyonu ile birlikte, elektrikli araçların dağıtım şebekelerine etkisinin değerlendirilmesi son derece önem kazanmaktadır.

Elektrikli araçların yaygınlaşması, bu araçların, özellikle kontrolsüz bir şekilde, şarj olurken elektrik şebekesini nasıl etkileyeceği sorusunu da beraberinde getirmektedir. Çok sayıda elektrikli aracın elektrik dağıtım şebekesine bağlanması, aşağıda kısaca bahsedildiği gibi birçok olumsuz etkiye sebep olabilir [1] [2]:

- **Güç talebinde artış:** Çok sayıda EA'nın, şarj olmak için şebekeye bağlanması elektrik enerji talebinin artmasına neden olacağından, dağıtım şebekesi altyapısı aynı hızla geliştirilmezse, şebekelerde güç talebini karşılamada problemler olabilir.
- **Elektriksel ekipmanların aşırı yüklenmesi:** Güç talebini karşılamaya yetse bile ekipmanların yüksek oranda yüklenmesi arızalanma ihtimalini ve yaşlanmayı artırmakta, dolayısıyla kullanım ömrünü kısaltmaktadır.
- **Gerilim düşümü, harmonik bozulmalar:** Elektrik şebekelerinde değişken güç akışından kaynaklanan gerilim düşümü ve harmonik bozulmalar da sıklıkla görülen güç kalitesi problemleridir.
- **Teknik kayıpların artması:** Güç kalitesi sorunlarının oluşması, şebeke hattındaki transformatörler/trafo ve kablolarda aşırı ısınmaya yol açabileceğinden, şebekeye bağlı cihazların arızalanması veya devre dışı kalmasına ve teknik kayıpların artmasına yol çacaktır.

Elektrikli araçların elektrik dağıtım şebekesine etkilerini ortaya koymak amacıyla, Türkiye'de bir büyük şehrin 36 adet güç trafosunu içeren elektrik dağıtım şebekesi üzerinde çalışma yapılarak;

- Dağıtım şebekesindeki güç trafoları, dağıtım merkezleri, indirici merkezler ve KÖK (Kesici Ölçü Kabin) binaları altındaki dağıtım ve iletim fiderleri ile birlikte, canlı manevralarda kullanılan en güncel tek-hat şemaları kullanılarak, Digsilent PowerFactory programında çizilmiş ve şebeke ekipmanlarına ait karakteristikler ve özellikler modelde tanımlanmış,

- Dağıtım fiderlerine ait, 1 Aralık 2019 – 1 Aralık 2020 tarihleri arasındaki, maksimum yükler, SCADA sisteminden alınmış ve bu yükler Digsilent PowerFactory programında tanımlanıp yük akış analizleri yapılarak ve güç trafolarının 1 yıl içerisindeki maksimum yüklendiği gün belirlenerek, o güne ait 15 dakikalık çözünürlükte yük karakteristiği oluşturulup bu yük karakteristiği, tüm fiderlere dağıtılarak, TEİAŞ güç trafolarından OG/AG dağıtım trafolarına kadar dağıtım şebekeleri modellenmiş,
- Türkiye ve modellenen pilot bölgeler için, 2025 ve 2030 yılları için elektrikli araç sayıları belirlenmiş,
- Elektrikli araçların farklı şarj algoritmaları çerçevesinde enerji kullanımlarını inceleyen literatür çalışmasının sonucu kullanılarak, elektrikli araç yükleri modellenmiş, ve üç farklı şarj senaryosu için, şebekelerin maksimum yüklenme durumları, maksimum gerilim düşümü ve EA'lardan reaktif destek alındığı durumda reaktif güç ve güç faktörü değişimi incelenerek, elektrikli araçların mevcut dağıtım şebekesine etkileri tartışılmıştır.

YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada izlenen yöntem ve kullanılan verilerin nasıl oluşturulduğu açıklanacaktır. Bu amaçla önce dağıtım şebekesinin sonra elektrikli araçların yüklerinin modellenmesi açıklanmış ve çalışmada kullanılan senaryolara yer verilmiştir.

2.1. Dağıtım Şebekesinin Modellenmesi

Elektrikli araçların yaygınlaşmasının 36 kV gerilim seviyesindeki elektrik dağıtım şebekesine etkilerini ortaya koymak amacıyla, Türkiye'nin büyükşehirlerinden bir tanesinde, 36 kV gerilim seviyesindeki elektrik dağıtım şebekesi, TEİAŞ güç trafolarından (bu trafolar dahil) OG/AG dağıtım trafolarına kadar (bu trafolar hariç), Digsilent PowerFactory programında modellenmiştir. Şehrin çevre yolu içerisinde kalan alan, çalışma alanı olarak belirlenmiş ve bu alandaki TEİAŞ'a ait 36 adet güç trafosu ve bu güç trafolarına bağlı elektrik şebekesi, dağıtım trafolarına kadar modellenmiştir. Modelleme sonucundaki yük akış analizi sonuçları **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. Güç Trafoları Yük Analiz Sonuçları

| Güç Trafosu | Kuru Güç (MVA) | Primer | Sekonder | | | | | | | |
|-------------|----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|----------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|
| | | Gerilim Değeri (p.u.) | Gerilim Değeri (p.u.) | Yüklenme Oranı (%) | Akım Değeri (A) | Aktif Güç (MW) | Reaktif Güç (MVAR) | Görünür Güç (MVA) | cos(Φ) | tan(Φ) |
| TR-1 | 100 | 1 | 1,0036 | 75 | 1250 | 75 | -7 | 75 | 0,9956 | -0,0945 |
| TR-2 | 100 | 1 | 0,9965 | 87 | 1448 | 86 | -2 | 86 | 0,9998 | -0,0200 |
| TR-3 | 100 | 1 | 0,9987 | 82 | 1374 | 82 | -3 | 82 | 0,9992 | -0,0401 |
| TR-4 | 50 | 1 | 0,9995 | 64 | 533 | 32 | -1 | 32 | 0,9990 | -0,0450 |
| TR-5 | 50 | 1 | 1,0004 | 65 | 546 | 33 | -2 | 33 | 0,9983 | -0,0579 |
| TR-6 | 50 | 1 | 0,9977 | 48 | 401 | 24 | 0 | 24 | 1,0000 | 0,0000 |
| TR-7 | 100 | 1 | 0,9941 | 81 | 1362 | 81 | 1 | 81 | 0,9999 | 0,0117 |
| TR-8 | 100 | 1 | 0,9977 | 60 | 1011 | 60 | -1 | 60 | 1,0000 | -0,0087 |
| TR-9 | 100 | 1 | 0,9989 | 60 | 1005 | 60 | -2 | 60 | 0,9997 | -0,0261 |
| TR-10 | 100 | 1 | 0,9963 | 77 | 1294 | 77 | -1 | 77 | 1,0000 | -0,0081 |
| TR-11 | 100 | 1 | 0,9994 | 62 | 1032 | 62 | -2 | 62 | 0,9994 | -0,0352 |
| TR-12 | 100 | 1 | 1,0023 | 79 | 1318 | 79 | -6 | 79 | 0,9969 | -0,0795 |
| TR-13 | 100 | 1 | 0,9999 | 71 | 1183 | 71 | -3 | 71 | 0,9989 | -0,0470 |
| TR-14 | 100 | 1 | 0,9975 | 68 | 1144 | 68 | -1 | 68 | 0,9999 | -0,0140 |
| TR-15 | 100 | 1 | 1,0012 | 59 | 994 | 59 | -4 | 59 | 0,9982 | -0,0605 |
| TR-16 | 100 | 1 | 1,0007 | 59 | 979 | 58 | -3 | 59 | 0,9986 | -0,0528 |
| TR-17 | 100 | 1 | 0,9987 | 83 | 1387 | 83 | -3 | 83 | 0,9992 | -0,0410 |
| TR-18 | 100 | 1 | 0,9982 | 80 | 1331 | 79 | -3 | 79 | 0,9995 | -0,0324 |
| TR-19 | 100 | 1 | 0,9997 | 76 | 1277 | 76 | -4 | 76 | 0,9989 | -0,0480 |
| TR-20 | 100 | 1 | 1,0028 | 77 | 1292 | 77 | -7 | 77 | 0,9965 | -0,0843 |
| TR-21 | 100 | 1 | 1,0044 | 81 | 1361 | 81 | -8 | 82 | 0,9947 | -0,1030 |
| TR-22 | 100 | 1 | 0,9997 | 76 | 1264 | 75 | -4 | 75 | 0,9989 | -0,0469 |
| TR-23 | 100 | 1 | 1,0025 | 79 | 1330 | 79 | -6 | 80 | 0,9967 | -0,0815 |
| TR-24 | 100 | 1 | 1,0007 | 77 | 1287 | 77 | -5 | 77 | 0,9982 | -0,0598 |
| TR-25 | 100 | 1 | 0,9988 | 68 | 1145 | 68 | -2 | 68 | 0,9995 | -0,0312 |
| TR-26 | 100 | 1 | 1,0014 | 63 | 1058 | 63 | -4 | 63 | 0,9980 | -0,0640 |
| TR-27 | 100 | 1 | 1,0015 | 82 | 1379 | 82 | -6 | 83 | 0,9974 | -0,0716 |
| TR-28 | 100 | 1 | 0,9954 | 60 | 998 | 59 | 2 | 59 | 0,9996 | 0,0280 |
| TR-29 | 100 | 1 | 0,9998 | 86 | 1445 | 86 | -5 | 86 | 0,9985 | -0,0541 |
| TR-30 | 100 | 1 | 1,0017 | 73 | 1229 | 73 | -5 | 74 | 0,9975 | -0,0709 |
| TR-31 | 100 | 1 | 1,0072 | 80 | 1344 | 80 | -11 | 81 | 0,9910 | -0,1349 |
| TR-32 | 100 | 1 | 0,9942 | 79 | 1326 | 79 | 1 | 79 | 0,9999 | 0,0137 |
| TR-33 | 100 | 1 | 1,0087 | 73 | 1217 | 72 | -11 | 73 | 0,9876 | -0,1587 |
| TR-34 | 100 | 1 | 1,0050 | 59 | 990 | 59 | -7 | 59 | 0,9929 | -0,1201 |
| TR-35 | 100 | 1 | 1,0005 | 80 | 1345 | 80 | -5 | 80 | 0,9983 | -0,0592 |
| TR-36 | 100 | 1 | 1,0008 | 57 | 956 | 57 | -3 | 57 | 0,9985 | -0,0548 |

2.2. Elektrikli Araç Sayılarının Belirlenmesi

Elektrikli araç sayılarının, 2025 ve 2030 yıllarında Türkiye ve modellenen pilot bölge için belirlenmesinde, Avrupa'da 2025 ve 2030 yıllarında kaç elektrikli binek araç olacağı ve hâlihazırda Türkiye binek araç pazarının Avrupa binek araç pazarına oranı bilgilerinden yararlanılmıştır.

Türkiye'deki binek araç sayısının Avrupa'daki binek araç sayısına oranının, yaklaşık % 4,63, benzer politikalar çerçevesinde elektrikli binek araçta da geçerli olacağı varsayılırsa Türkiye'de elektrikli binek araç sayısı 2025 yılı için 491.701 adet; 2030 yılı için ise 1.351.426 adet olacağı söylenebilir. Modellenen bölgedeki elektrikli binek araç sayısı hesaplanırken yine TÜİK'ten alınan verilere göre oranlama yapılmıştır. Elektrikli araç hesaplama yöntemi, kullanılan oranlamayı içerecek şekilde, **Tablo 2**'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Elektrikli Araç Hesaplama Yöntemi

| | A | B | C | Veri Kaynağı / Kullanılan Formül |
|----|--|-------------|------------------|----------------------------------|
| 1 | İl Otomobil Sayısı | 2019 | 1.489.336 | TÜİK |
| 2 | Türkiye Otomobil Sayısı | 2019 | 12.503.049 | TÜİK |
| 3 | Avrupa binek araç sayısı | 2018 | 267.834.417 | ACEA |
| 4 | Türkiye binek araç sayısı | 2018 | 12.398.190 | TÜİK |
| 5 | Küresel EA Binek Araç Sayısı | 2019 | 7.167.826 | IEA EV 2020 Report |
| 6 | Avrupa EA Binek Araç Sayısı | 2019 | 1.756.557 | IEA EV 2020 Report |
| 7 | Küresel EA Binek Araç Sayısı | 2025 | 43.344.521 | IEA EV 2020 Report |
| 8 | Küresel EA Binek Araç Sayısı | 2030 | 119.131.233 | IEA EV 2020 Report |
| 9 | Avr/Küresel, EA Otomobil Oranı | 2019 | 24,51% | C6/C5 |
| 10 | Avrupa EA Otomobil Sayısı | 2025 | 10.622.066 | C7*C9 |
| 11 | Avrupa EA Otomobil Sayısı | 2030 | 29.194.459 | C8*C9 |
| 12 | Binek araç TR / Avrupa Oranı | 2018 | 4,63% | C4/C3 |
| 13 | TR EA Otomobil Sayısı | 2025 | 491.701 | C10*C12 |
| 14 | TR EA Otomobil Sayısı | 2030 | 1.351.426 | C11*C12 |
| 15 | Otomobil İl / TR Oranı | 2019 | 11,91% | C1/C2 |
| 16 | İl EA Otomobil Sayısı | 2025 | 58.570 | C13*C15 |
| 17 | İl EA Otomobil Sayısı | 2030 | 160.979 | C14*C15 |
| 18 | Metropol Bölgesi / İl Tüketim Oranı | 2020 | 85,99% | SCADA |
| 19 | Metropol Bölgesi EA Otomobil Sayısı | 2025 | 50.365 | C16*C18 |
| 20 | Metropol Bölgesi EA Otomobil Sayısı | 2030 | 138.426 | C17*C18 |

2.3. Elektrikli Araç Yüklerinin Modellenmesi

Elektrikli araç yükleri belirlenirken, Zhou ve diğerleri [3] tarafından yayımlanmış araştırma makalesinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada elektrikli araçların farklı şarj algoritmaları çerçevesinde enerji kullanım durumları ortaya konmuştur. Ayrıca birden fazla parametre optimum hale getirilerek çok amaçlı bir şarj stratejisi önerilmiştir. MATLAB kodlarını açık kaynak olarak yayımlayan makale yazarları, Wang ve diğerleri [4] tarafından 2014 yılında yayımlanan “Pekin Binek Araç Seyahat Anketi” çalışmasından yararlanmışlardır. Pekin’de 112 elektrikli binek araçtaki GPS’ler üzerinden 4892 adet veri toplanan seyahat profili çalışmasında Haziran 2012’den Mart 2013’e kadar kayıt alınmış ve hafta içi günlerinde elde edilen 5 göstereye ait ortalamalar **Tablo 3**’te verilmiştir.

Tablo 3. Elektrikli Araç Seyahat Profilini Oluşturan 5 Göstere [4]

| Gösterge | Birim | Ortalama Değer |
|------------------------|-------|----------------|
| Günlük Toplam Mesafe | km | 35,4 |
| Yolculuk Başına Mesafe | km | 15,5 |
| Seyahat Süresi | saat | 1,51 |
| Yolculuk Başına Süre | saat | 0,63 |
| Günlük Seyahat Sıklığı | defa | 2,29 |

EA modelleme çalışmasında;

- Batarya kapasitesinin 23 kWh,
- Enerji tüketiminin 0,175 kWh/km,
- Araçların şarj kapasitesinin 15 kW,
- Aracın şarjda kalma süresinin 5 saat

olduğu göz önüne alınmıştır [3]. Bu ortalama değerler temel alınarak MATLAB’da açık kaynak kodlu olarak yapılan modelleme [3] çalışmasından faydalanılmıştır.

2.4. Senaryoların Belirlenmesi

Zhou ve diğerleri [3] çalışmasında bulunan şarj senaryolarından “Rastgele” ve “Parkta Şarj” stratejileri bu çalışma kapsamında kullanılmış; bunlara ek olarak kullanıcıların yarısının gece 00:00 – 08:00 saatleri arasında araçlarını şarj edeceği bir tarife ile yönlendirildikleri durum için ise “Gece Tarifesi” isimli şarj stratejisi ortaya konmuştur. 240.000 elektrikli binek araca ait 24-saatlik elektrik talep yük profili; rastgele şarj stratejisi için **Şekil 1**'de, parkta şarj stratejisi için **Şekil 2**'de ve gece tarifesi stratejisi için **Şekil 3**'te verilmiştir.

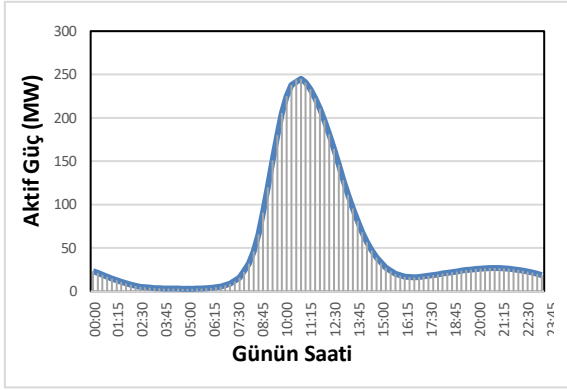
Elektrikli araç kullanıcıları araçlarını şarj ederken farklı şarj stratejileri izleyeceklerdir. Örneğin, araçlarını eve geldikten sonra ve aracın tamamını şarj etmeye yetecek kadar zaman olduğu durumda şarj ediyorsa bu strateji, Zhou ve diğerleri [3] tarafından “Charging at Parking” stratejisi olarak adlandırılmıştır. İlgili strateji, bu çalışmada kullanılırken “Parkta Şarj” olarak ifade edilmiştir.

Elektrikli araç sahiplerinin araçlarını şarj ederken tamamen rastgele davranış gösterdikleri ya da diğer bir deyişle onları herhangi bir stratejiye yönlendirecek amaç taşımadıkları durum için “Randomness” (“Rastgele”) şarj stratejisi tekdüze dağılımdan matematiksel olarak üretilmiş; bunun sonucunda elektrikli araç şarj yükü, bir şarj stratejisi olmadığı için doğrudan sürüş profilini oluşturan göstergelerden en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonu yaratıldıktan sonra stokastik simülasyon yöntemi olan Monte Carlo simülasyonları neticesinde elde edilmiştir [3].

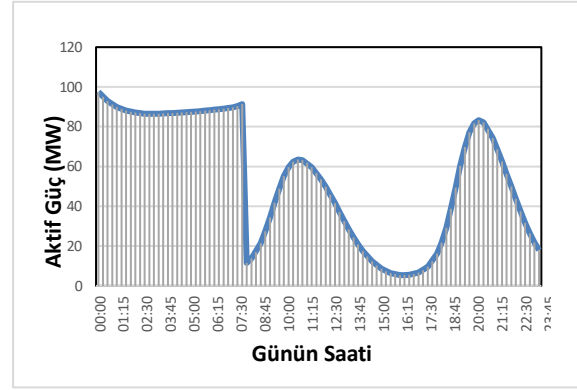
Kontrolsüz şarj senaryoları dâhilinde elektrikli araçların yaygınlaşması durumunda en çok, evde şarj ve işte şarj durumlarının ortaya çıkacağı tahmin edilmekte bunun da gündüz ve akşam puantını artıracığı öngörülmektedir. Bu durum, yukarıda şarj stratejileri açıklanan rastgele ve parkta şarj senaryolarının kullanılmasının makul bir yaklaşım olacağını göstermektedir.

Yukarıda söz edilen iki stratejiye ek olarak bu çalışma kapsamında üretilmiş şarj stratejisi ise gece tarifesi ismi verilen şarj stratejisidir. Gece tarifesi, uygun teşvikler ile araçların yarısının gece 00:00 ile 08:00 arasında şarj olacağı ve şebeke yöneticisinin bu saatler arasında araç gruplarını şebekeye eşit yük oluşturacak şekilde sırayla devreye alıp çıkaracağı, araç tüketim tarifesine uymayan kullanıcıların (diğer yarının) ise yine gündüz ve akşam saatlerinde şebeke puantını artırdıkları şarj stratejisidir.

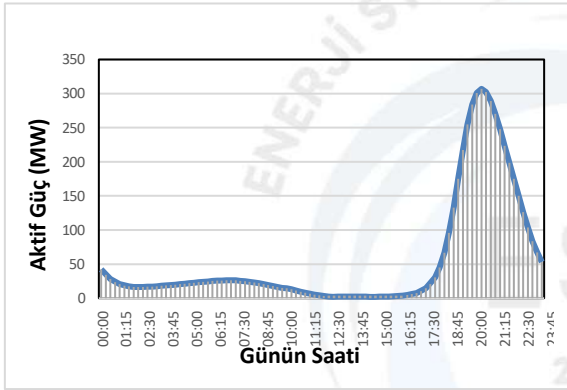
Şekil 1. Rastgele Şarj Stratejisi ile EA Yük Profili



Şekil 3. Gece Tarifesi Stratejisi ile EA Yük Profili



Şekil 2. Parkta Şarj Stratejisi ile EA Yük Profili



ENERJİ STRATEJİLERİ KONFERANSI

SK

2024

BULGULAR VE YORUMLAR

Kesim 2.4'te açıklanan rastgele şarj stratejisi, parkta şarj stratejisi ve gece tarifesi stratejisinin mevcut durumda yüksek oranda yüklü bir güç trafosu üzerindeki etkisini görmek amacıyla, TR-27 özelinde; EA sayısı 1,3 milyon ve 3,4 milyon alınarak, her üç senaryo için yapılan analiz sonucu elde edilen, maksimum yüklenme grafikleri, maksimum gerilim düşümü grafikleri ve güç faktörü grafikleri bu bölümde verilmiştir.

Bu bölümdeki tablo ve şekillerde, maksimum yüklenme ile gerilim düşümü için en yüksek sonuçlara; güç faktörü [$\cos(\Phi)$] için ise en düşük sonuçlara yer verilmiştir.

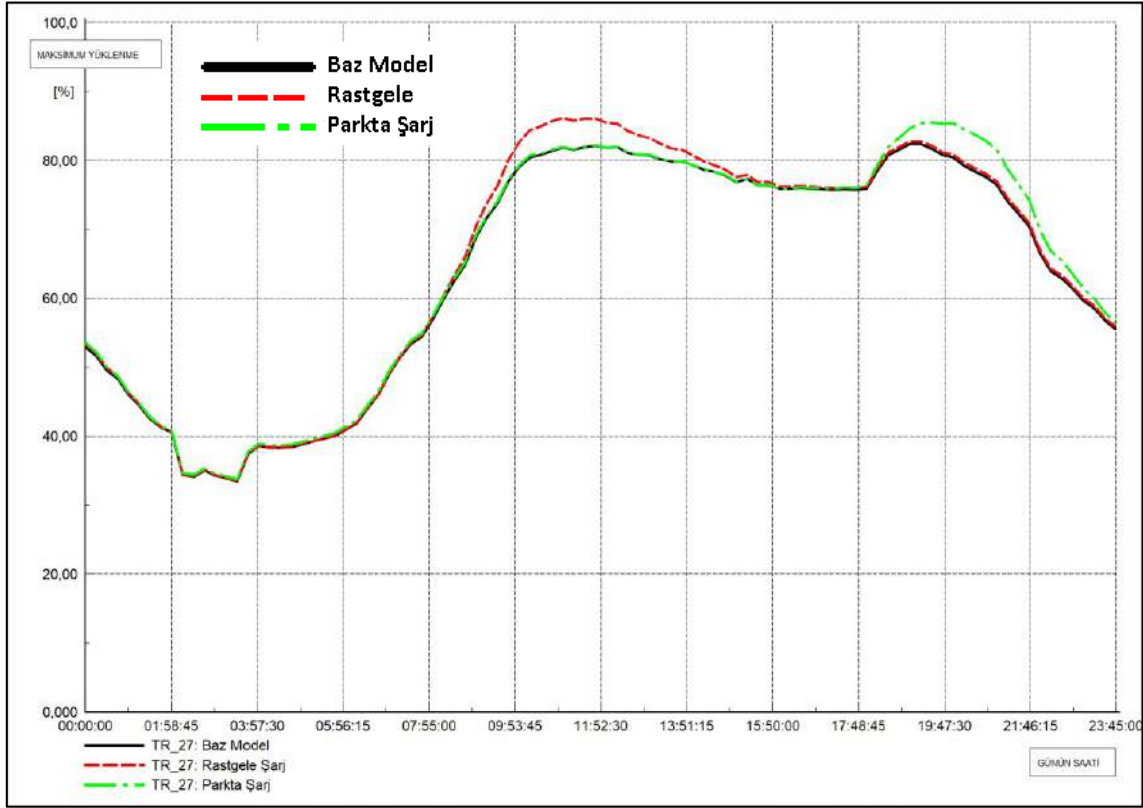
3.1. Kontrolsüz Şarj Durumu

Türkiye'nin 2030 yılında 1 milyon 350 bin elektrikli binek araca sahip olacağı düşünülerek ve bu sayı Yöntem Kesimi'nde bahsedildiği üzere ilgili katsayılarla orantılanarak güç trafosu bölgelerindeki elektrikli binek araç sayıları hesaplanmış ve analizler buna göre tüm şebekede tekrarlanmıştır. Farklı yük profilindeki 6 güç trafosu bölgesine ait sonuçlar **Tablo 4**'te verilmiştir.

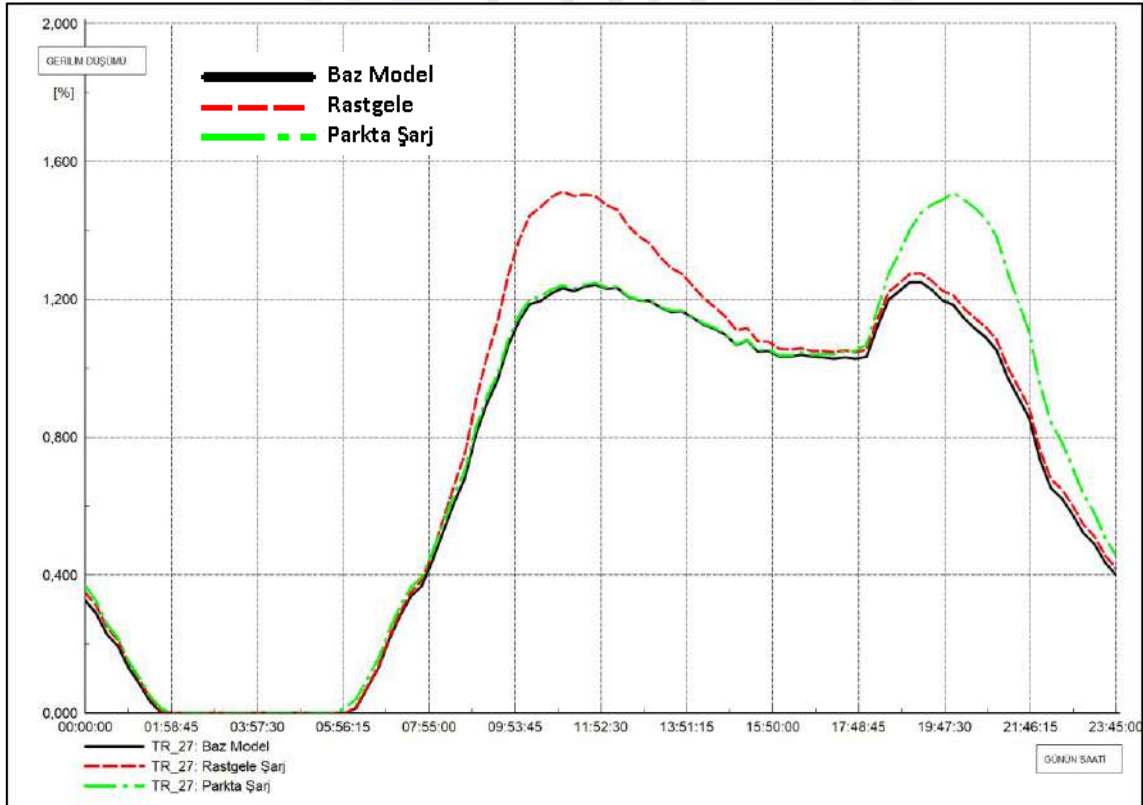
Tablo 4. Kontrolsüz Şarj Durumunda EA Yaygınlaşması Analiz Sonuçları

| Şarj Sınıfı | İncelenen Kriter | Öngörüt Yılı | Senaryolar | Türkiye Elektrikli Araç Sayısı | TR-1 | TR-2 | TR-27 | TR-33 | TR-34 | TR-36 |
|-----------------|--------------------|--------------|---------------|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Kontrolsüz Şarj | Mak. Yüklenme (%) | 2030 | Baz Model | 1,3 Milyon | 75 | 87 | 82 | 73 | 59 | 57 |
| | | | Rastgele Şarj | | 78 | 91 | 86 | 74 | 59 | 57 |
| | | | Parkta Şarj | | 75 | 87 | 86 | 73 | 60 | 59 |
| | Gerilim Düşümü (%) | | Baz Model | | 1,7 | 2,6 | 1,3 | 0,1 | 2,5 | 1,6 |
| | | | Rastgele Şarj | | 1,9 | 2,9 | 1,5 | 0,3 | 2,5 | 1,6 |
| | | | Parkta Şarj | | 1,7 | 2,7 | 1,5 | 0,3 | 2,5 | 1,7 |

Şekil 4. Maksimum Yüklenme Grafiği (2030)



Şekil 5. Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği (2030)



OG Elektrik Şebekesinde 6 farklı dağıtım bölgesi için elektrikli araçların maksimum gerilim düşümü ve maksimum yük bakımından OG şebekede sınırlı bir etkisinin görülmesi literatürdeki bazı çalışmalarla da benzerlik göstermektedir [5], [6].

3.2. Kontrollü Şarj Durumu

Bu kesimde, genellikle metropol bölgesi şebekelerinin yoğun yer altı kablo yatırımları sonucunda kapasitif yüklenmesi nedeniyle, elektrikli araçlardan 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif katkı alınması durumunda, farklı şarj stratejisi senaryoları için şebeke yüklenmesi, gerilim düşümü ve güç faktörünün nasıl değiştiği incelenmiştir.

3.2.1. Kontrollü Şarj ve Beklenen EA Yaygınlaşması Durumu

Gece şebeke yükünün az olmasından ötürü kapasitif yüklenme artmakta ve mevcut 2 senaryoda EA' lar gündüz veya akşam (problem gece saatlerinde yaşanmakta) şebekeyi kompanze edebildikleri için şebekenin kapasitif yüklenmesine bir çözüm üretilememektedir.

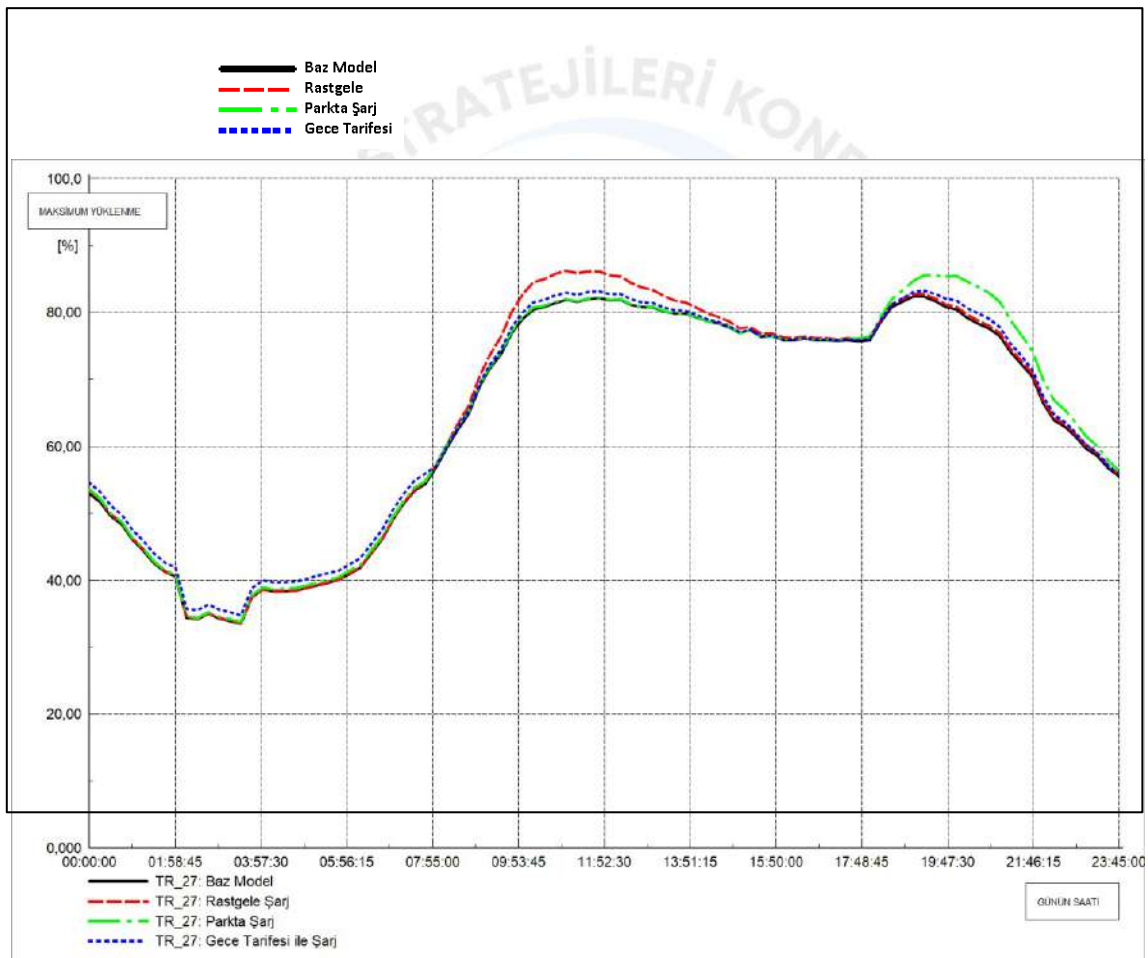
Tablo 5. Kontrollü Şarj Durumunda EA Yaygınlaşması Analiz Sonuçları

| İncelenen Kriter | Öngörü Yılı | Çalışılan Trafo Bölgesi | Senaryolar | Türkiye Elektrikli Araç Sayısı | TR-27 |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------|-------|
| Mak. Yüklenme (%) | 2030 | Mesken ve Ticarethane Ağırlıklı | Baz Model | 1,3 Milyon | 82 |
| | | | Rastgele | | 86 |
| | | | Parkta Şarj | | 86 |
| | | | Gece Tarifesi | | 83 |
| Gerilim Düşümü (%) | | | Baz Model | | 1,4 |
| | | | Rastgele | | 1,7 |
| | | | Parkta Şarj | | 1,7 |
| | | | Gece Tarifesi | | 1,5 |
| cos(Φ) (en düşük) | | | Baz Model | | 0,979 |
| | | | Rastgele | | 0,979 |
| | | | Parkta Şarj | | 0,980 |
| | | | Gece Tarifesi | | 0,984 |

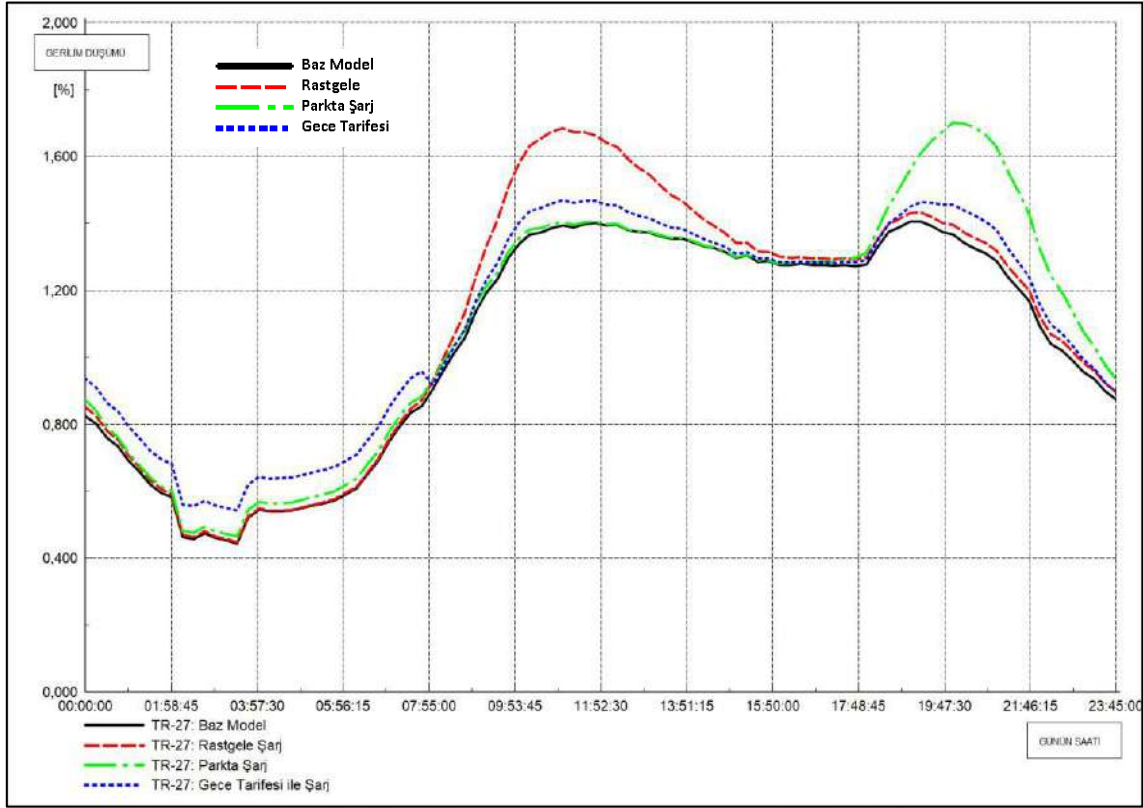
Ayrıca, ilk iki şarj stratejisi ile cos(Φ)'nin kapasitif yönde ancak birim değere yakın olduğu gündüz ve akşam saatlerinde şarjdaki elektrikli araçların sabit olarak 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif katkı sunması bu saatlerde, Şekil 8'de görüldüğü gibi, şebekenin güç faktörünü kapasitif yönden endüktif yöne bile taşıyabilmektedir.

Elektrikli araçların gece şarj olması ve şebeke yöneticisi tarafından şarj saatlerinin yönetilmesi durumu olarak özetleyebileceğimiz gece tarifesi stratejisi ile şebekeye bağlanacak EA'ların yarısının gece saatlerinde şarj olması durumunda; gündüz ve akşam için puant yükü daha az artmakta, dolayısıyla gerilim düşümü azalmakta ve gece saatlerinde daha çok bozulan güç faktörünü düzeltme imkânı oluşmaktadır. **Şekil 8** ve **Tablo 5**'ten görüldüğü gibi gece tarifesi şarj stratejisinde güç faktörünün limit dışında kaldığı süre azalmış (02.00-05.15) ve $\cos(\Phi)$ değeri artmıştır. Gece aktif yükün düşmesi ile kapasitif yükün çok artması sebebiyle EA'lar gece tarifesi stratejisi ile şarj edilse bile güç faktörü, gece 02.00 – 05.15 arasında limit değerler dışında kalmıştır.

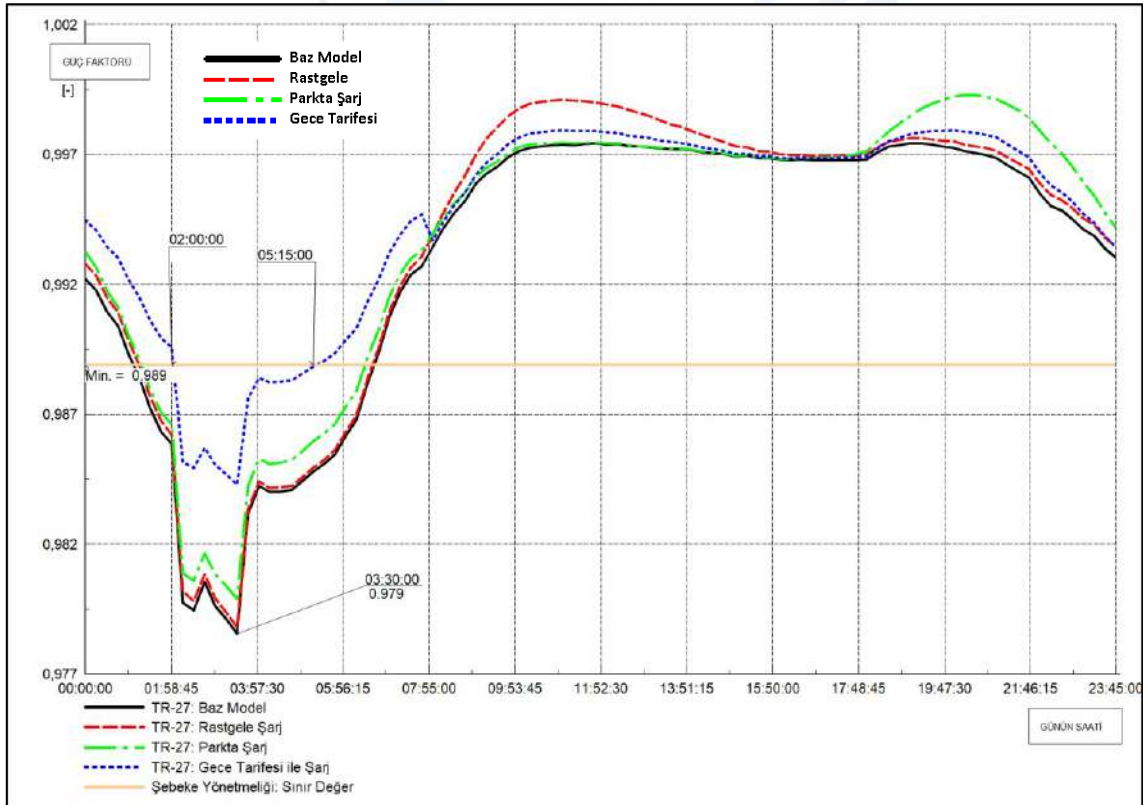
Şekil 6. Maksimum Yüklenme Grafiği (2030 – 1,3M EA)



Şekil 7. Maksimum Gerilim Düşümü (2030 – 1,3M EA)



Şekil 8. Güç Faktörü Grafiği (2030 – 1,3M EA)



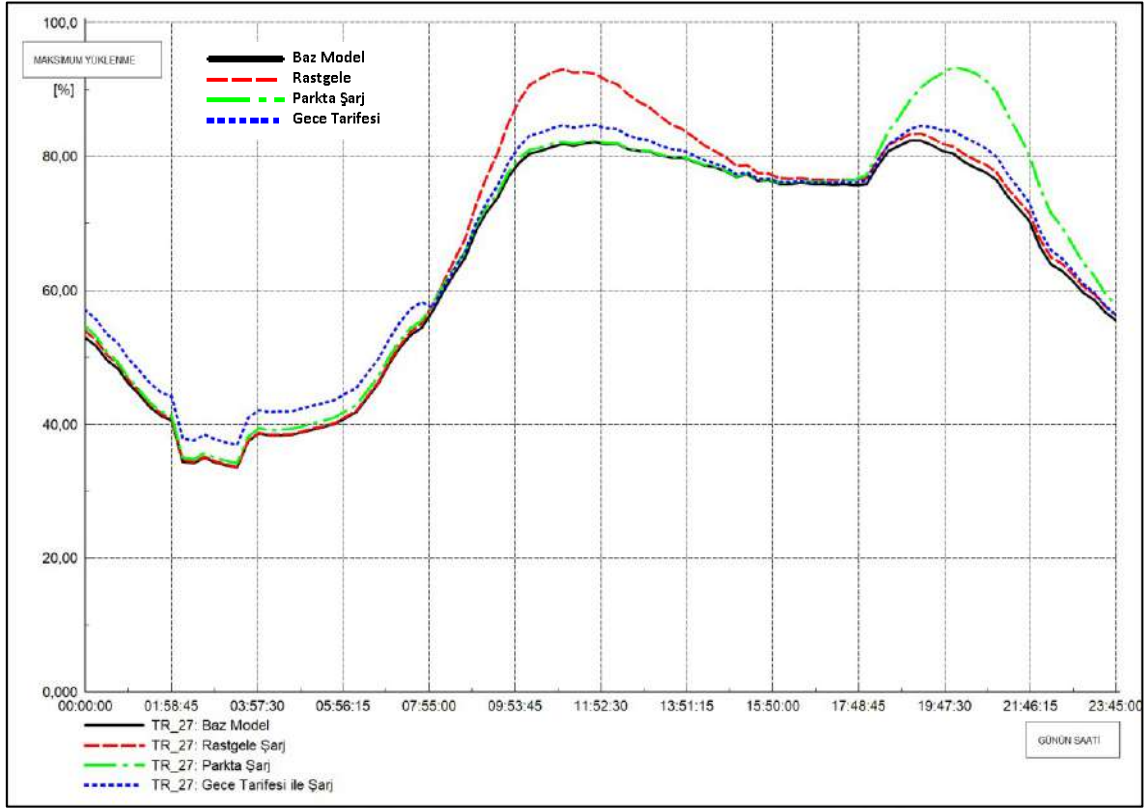
3.2.2. Kontrollü Şarj ve Beklenen EA Yaygınlaşmasının Üstünde Yaygınlaşma Durumu

Yöntem Kesimi'nde bahsedildiği üzere Türkiye karayollarındaki otomobil sayısının Avrupa karayollarındaki otomobil sayısına oranı %4,63'tür. Bu oranın elektrikli araçlar yaygınlaşmasında da korunacağı düşüncesi üzerinden Türkiye karayollarında 2030 yılında 1,35 milyon elektrikli aracın olacağı öngörülmüştür. Bu yaygınlaşmanın beklenenin 2,5 katı olması durumunda (Türkiye elektrikli binek araç sayısının 3,4 milyon olması durumu) için analizler tekrarlanmıştır.

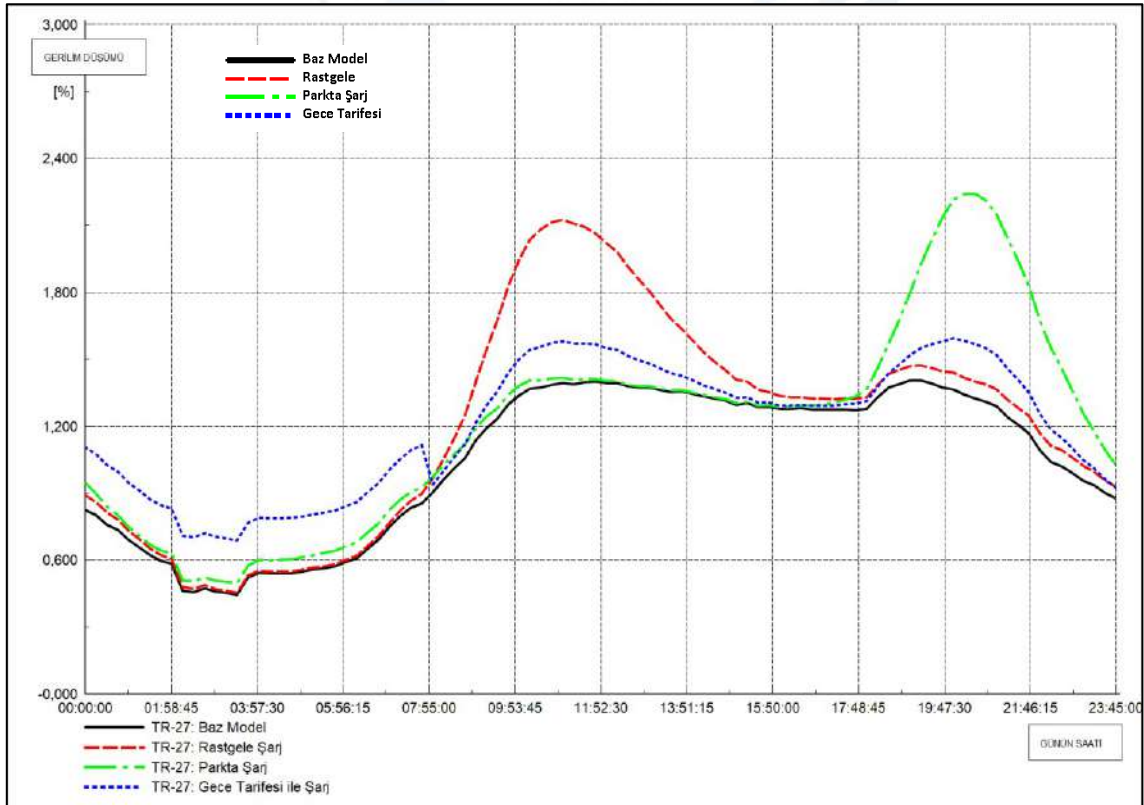
Tablo 6. Kontrollü Şarj ve 2030 Yılında Türkiye EA Sayısının Tahminlerin Üstü Yaygınlaşması Durumu İçin Analiz Sonuçları

| İncelenen Kriter | Öngörü Yılı | Çalışılan Trafo Bölgesi, | Senaryolar | Türkiye Elektrikli Araç Sayısı | TR-27 |
|----------------------|-------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------|-------|
| Maksimum Yükleme (%) | 2030 | Mesken ve Ticarethane Ağırlıklı | Baz Model | 3,4 Milyon | 82 |
| | | | Rastgele | | 93 |
| | | | Parkta Şarj | | 93 |
| | | | Gece Tarifesi | | 85 |
| Gerilim Düşümü (%) | | | Baz Model | | 1,4 |
| | | | Rastgele | | 2,1 |
| | | | Parkta Şarj | | 2,2 |
| | | | Gece Tarifesi | | 1,6 |
| cos(Φ) (en düşük) | | | Baz Model | | 0,979 |
| | | | Rastgele | | 0,979 |
| | | | Parkta Şarj | | 0,982 |
| | | | Gece Tarifesi | | 0,991 |

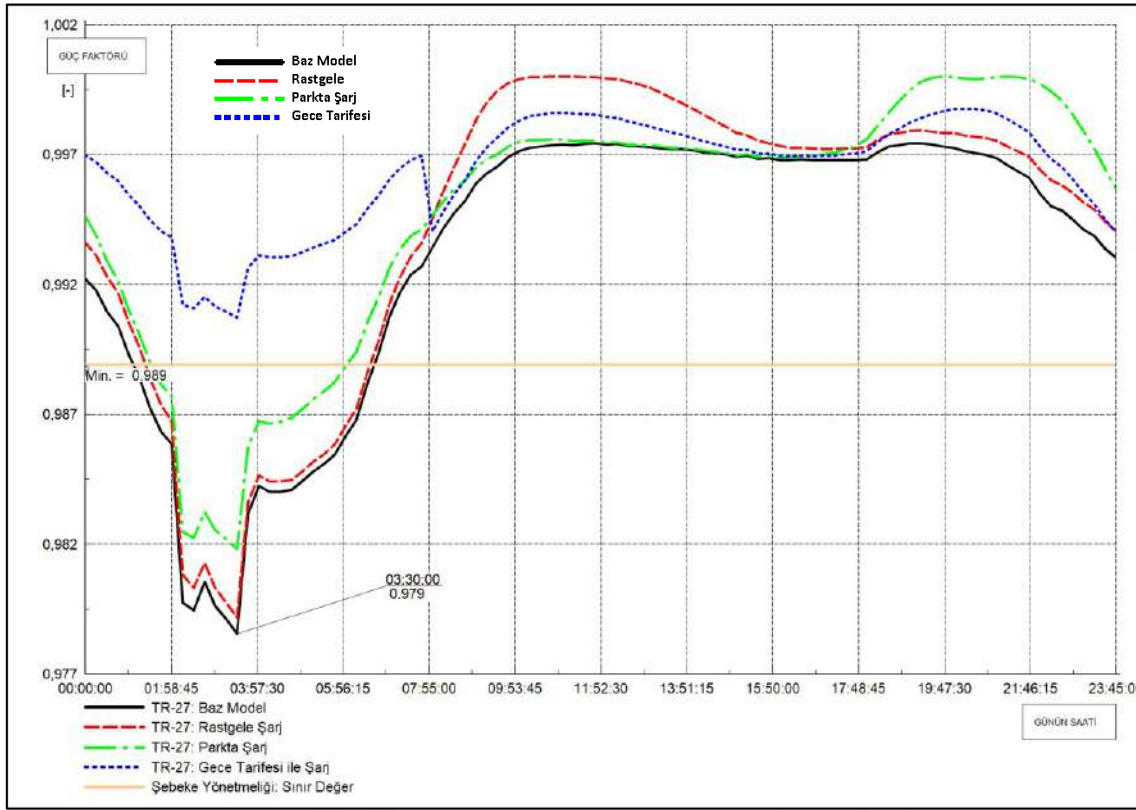
Şekil 9. Maksimum Yüklenme Grafiği (2030 - 3,4M EA)



Şekil 10. Maksimum Gerilim Düşümü (2030 – 3,4M EA)



Şekil 11. Güç Faktörü Grafiği (2030 – 3,4M EA)



Türkiye'deki elektrikli binek araç sayısının 3,4 milyon adet olması durumunda bile gündüz puantı da akşam puantı da en fazla %93 oranına ulaşmaktadır. Maksimum gerilim düşümü %1,4'ten %2,2'ye çıkmaktadır. Güç faktörü düzeltilmesi yine gece tarifesinde anlamlı iken diğer senaryoların, araç sayısı yüksek oranda artmış olduğu halde, güç faktörüne katkısı sınırlı olmaktadır.

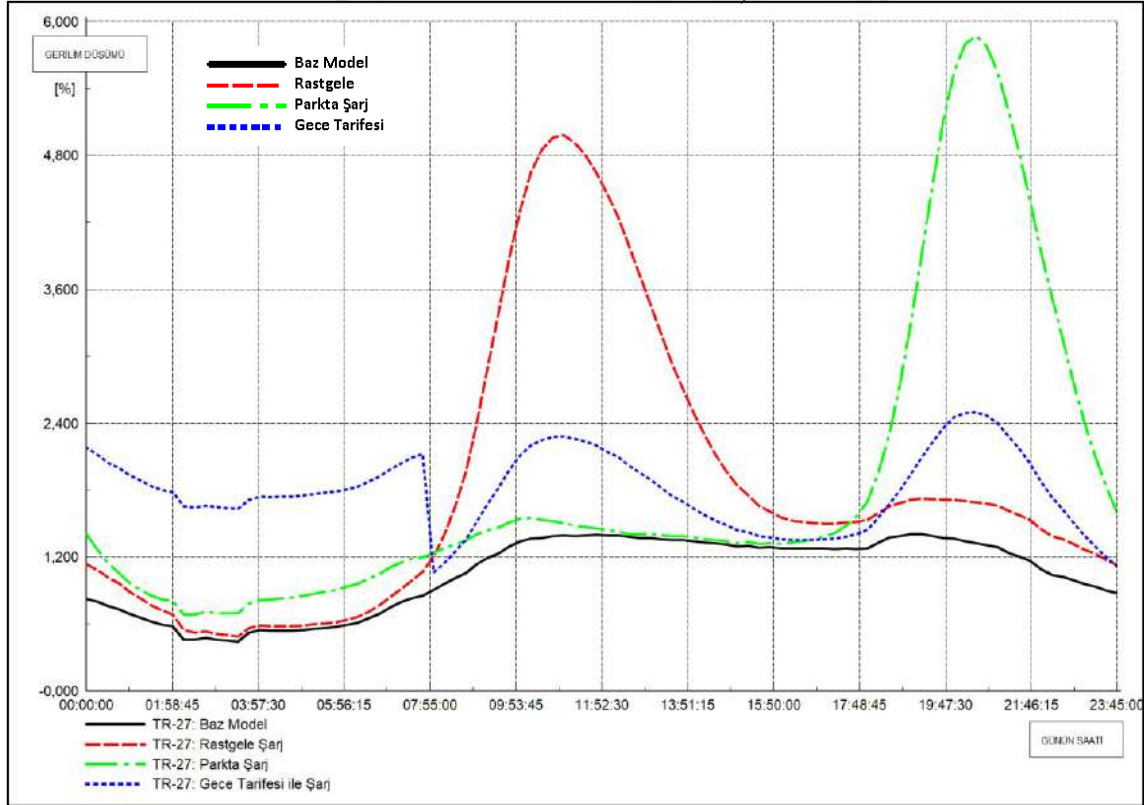
3.2.3. Kontrollü Şarj ve En Kötü Durum (Beklenen EA Yaygınlaşmasının Üstünde Yaygınlaşma ve Şarj İstasyonlarının Toplu Şekilde Fider Sonunda Yer Alması)

Şarj noktası uzaklığının etkisini değerlendirmek için, aynı trafo bölgesinde tüm elektrikli araç şarj istasyonları aynı fiderin en uzak noktasında (bu modelde yaklaşık 20 km'ye denk gelmektedir) olduğu durumda, elektrik araç sayısını, bu çalışmada alınan en yüksek değer olan, 3,4 milyon seçerek, her üç senaryo için, gerilim değişimlerine olan etkisi incelenmiş ve Şekil 12 ile Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kontrollü Şarj ve 2030 Yılında Türkiye EA Sayısının Tahminlerin Üstü Yaygınlaşması ve Şarj İstasyonlarının Fider Sonunda Kurulması Durumu İçin Gerilim Düşümü Analiz Sonuçları

| EA Şarj İstasyonları Konumu | İncelenen Kriter | Öngörü Yılı | Trafo Bölgesi | Senaryolar | Türkiye Elektrikli Araç Sayısı | TR-27 |
|-----------------------------|--------------------|-------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------|-------|
| Fider Sonunda | Gerilim Düşümü (%) | 2030 | Mesken ve Ticarethane Ağırlıklı | Baz Model | 3,4 Milyon | 1,4 |
| | | | | Rastgele | | 5,0 |
| | | | | Parkta Şarj | | 5,9 |
| | | | | Gece Tarifesi | | 2,5 |

Şekil 12. Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği (2030 – 3,4M EA – Şarj İstasyonlarının Toplu Şekilde Fider Sonunda Kurulması)



SONUÇLAR

Elektrikli araçların OG dağıtım şebekesine etkisi, yük profilinde ve gerilim düşümündeki değişimler açısından çok sınırlı oranda olmaktadır.

Elektrikli araçların reaktif katkı vermesi hem gerilimi düzenleyici bir rol oynamakta hem de güç faktörünü düzenleyerek şebekedeki kayıpları ve fazladan yüklenmeleri ortadan kaldırmaktadır.

Metropol bölgesinde yapılan 36 güç trafosunun yük akış analizleri, bu bölgenin tamamında yer altı kablusunun fazlalığından kaynaklı olarak kapasitif yüklerin fazla olduğunu, buna bağlı olarak güç trafolarının orta gerilim barasında gerilim yükselmesi olduğunu göstermektedir, **Tablo 1**.

Bu çalışmanın sonuçları göstermektedir ki; reaktif oran limitlerinin dışına çıkan pek çok güç trafosu şebekesi, elektrikli araçların şarj olma süresi boyunca 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif yük çekmesi durumunda özellikle gece saatlerinde şarjın teşvik edildiği durumda güç faktörü açısından iyileşme göstermekte ve limitler içerisine girmektedir [7]. Şebeke yöneticisinin güç faktörünü anlık olarak otomasyon sistemleri ile takip edip şarj olan araçların şarj istasyonlarına sinyal göndererek sürekli olarak araçlardan farklı seviyelerde endüktif veya kapasitif güç faktörü talep etmesi bir hayli işletilmesi zor ve ek olarak işletme ve bakım maliyeti getiren bir senaryo olduğu için zaten kapasitif özellikte olan OG dağıtım şebekelerinde, eğer OG/AG dağıtım trafosunda ve alçak gerilim şebekesinde engel bir durum yok ise, sabit olarak 0,9 endüktif güç faktöründe elektrikli araç yüklerinin bağlanması son derece faydalı bulunmuştur.

Türkiye için orta gerilim seviyesinde hem elektrikli araçların negatif etkisini minimize etmek hem de onlardan reaktif katkı sağlayarak EA yaygınlaşmasını avantaja çevirmek amacıyla önerilen sistem, belirlenecek tarifelerle araçların en azından yarısını gece 00:00 – 08:00 aralığına kaydırmak ve EA'ları 0,9 endüktif güç faktöründe şarj etmek olarak belirtilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] C.H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, T.K. Saha, Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid, 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011, pp. 1-8.
- [2] R.C. Green, L. Wang, M. Alam, The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook, IEEE PES General Meeting, 2010, pp. 1-8.
- [3] Y. Zhou, Z. Li, X. Wu, The multiobjective based large-scale electric vehicle charging behaviours analysis, Complexity, 2018 (2018).
- [4] H. Wang, X. Zhang, L. Wu, C. Hou, H. Gong, Q. Zhang, M. Ouyang, Beijing passenger car travel survey: implications for alternative fuel vehicle deployment, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 20 (2015) 817-835.
- [5] C. Farkas, G. Szűcs, L. Prikler, Grid impacts of twin EV fast charging stations placed alongside a motorway, 2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), 2013, pp. 1-6.
- [6] A. Rautiainen, A. Mutanen, S. Repo, P. Järventausta, A. Tammi, R. Ryymin, J. Helin, A. Unkuri, M. Pekkinen, Case studies on impacts of plug-in vehicle charging load on the planning of urban electricity distribution networks, 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013, pp. 1-7.
- [7] S.C. Yılmaz, "Türkiye'de elektrikli araçların orta gerilim dağıtım şebekesine etkisinin değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temiz Tükenmez Enerjiler Ana Bilim Dalı, Danışman: Prof. Dr. Aynur Eray, 2021. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.

141: Adil Geçiş Kapsamında Güney Afrika Cumhuriyeti Örneği**Selma Ülker**

Elektrik Üretim A.Ş.

ÖZET

Gerek Birleşmiş Milletler gerekse Avrupa Birliği tarafından iklim değişikliği tehdidine karşı alınan tedbirler tüm dünyayı harekete geçirmeye çalışmaktadır. Paris İklim Anlaşması'na taraf olan 174 ülke ve Avrupa Birliği, bilim camiasının tavsiyeleri doğrultusunda ekonomilerini nasıl karbondan arındıracıklarını bulmaya odaklanmışlardır. Bu çalışmada, elektriğinin %80'nden fazlasını kömürden elde eden bir ülke olmasına rağmen yeşil dönüşüm konusunda büyük tedbirleri hayata geçirmeye çalışan Güney Afrika Cumhuriyeti'nin bu alandaki gelişiminin incelenerek, ülkemiz net sıfır yolculuğuna ışık tutması amaçlanmaktadır.

Hâlihazırda bir taraftan aşırı yoksulluk, eşitsizlik ve işsizlikle mücadele eden Güney Afrika, diğer taraftan iklim değişikliği tehdidi ile karşı kaşıya kalmış olup iklim değişikliği ile mücadele etmek için bir dizi hedefi hayata geçirmeye çalışmaktadır. Bu hedefleri gerçekleştirirken de adil bir geçiş gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu "Adil Geçiş"i finanse etmek ve yönetmek için ihtiyaç duyduğu yabancı yatırımı ve finansmanı çekmek amacıyla karbondan arındırma planlarını ekonomik toparlanma çabalarıyla uyumlu hale getirmeye çaba göstermektedir. Aynı zamanda, Güney Afrika'nın yenilenebilir enerjiye geçişi ve adil bir geçişe odaklanmasının, küresel enerji dönüşümünün kadranını değiştireceğine, yatırım çekeceğine, istihdam yaratacağına ve bunların sonucu olarak da Güney Afrika ekonomisinin büyümesine yardımcı olacağına inanılmaktadır. Böylece eşitsizlik azalacak ve enerji geçişinde kimse geride kalmayacaktır. Güney Afrika Cumhuriyeti gibi enerji kaynakları ve ekonomide dezavantajları olan, yoğun kömür kullanımı olan bir ülke, Türkiye gibi ülkelere de ilham kaynağı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Yeşil dönüşüm, Adil Geçiş, Güney Afrika Cumhuriyeti, Paris İklim Anlaşması

ABSTRACT

The measures taken by both the United Nations and the European Union against the threat of climate change have been trying to mobilize the whole world. European Union and 174 countries that are parties to the Paris Climate Agreement are focused on figuring out how to decarbonize their economies in the light of the recommendations of the scientific community. This study aims to shed light on our country's net zero journey by examining the development of the Republic of South Africa, which is trying to implement major measures in green transition despite being a country that obtains 83% of its electricity from coal.

South Africa, which is already struggling with extreme poverty, inequality and unemployment on the one hand, is faced with the threat of climate change on the other hand and has been trying to implement a series of goals to combat climate change. While achieving these goals, the country aims to achieve a just transition. Country strives to align decarbonization plans with economic recovery efforts to attract the foreign investment and financing which needs to finance and manage this “Just Transition.” At the same time, it is believed that South Africa's focus on renewable energy and a just transition will effect the global energy transition, attract investment, create employment and, as a result, help the South African economy grow. Thus, inequality will decrease and no one will be left behind in the energy transition. A country like the Republic of South Africa, which has disadvantages in energy resources and economy and intensive coal use, will also be a source of inspiration for countries like Turkey.

Key Words: Green transformation, Just Transition, Republic of South Africa, Paris Climate Agreement

GİRİŞ

Küresel olarak, iklim değişikliğinin etkileri giderek daha görünür hale gelmektedir. Aşırı kuraklıklar, seller, sıcak hava dalgaları, kasırgalar ve orman yangınları daha sık görülmekte ve dünyanın dört bir yanındaki insanları, özellikle de iklim krizine en az katkıda bulunanları etkilemektedir. İklim değişikliği halihazırda hiç insan katkısı olmasa dahi ortaya çıkabilecek bir olgu olmasına karşın, aşırı karbon salınımı, çevre kirliliği gibi insan eliyle gerçekleşen etkileri olabildiğince minimize etmek, zararı en aza indirmeye katkı sağlayacaktır. Özellikle fosil yakıtlardan vazgeçip yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek en önemli tedbirlerin başında gelmektedir.

Düşük karbonlu ekonomiye geçişin hem etkili hem de adil olmasını ve süreçte kimsenin geride bırakılmamasını sağlamak için adil bir enerji dönüşümüne ihtiyaç vardır. Ancak, enerji dönüşümü son derece karmaşık ve zorlu bir yolculuktur. Adil bir şekilde yapılmadığı takdirde eşitsizliği besleyebilir. Adil bir enerji geçişi olmadan, bazı grupların geride kalma riski vardır, özellikle iklim değişikliğinin etkilerine karşı en savunmasız olanlar ve geçim kaynakları için karbon yoğun endüstrilerde çalışanlar en büyük risk altındadır. Bu durum, sosyal ve ekonomik eşitsizliklere yol açabilir, mevcut eşitsizlikleri daha da kötüleştirebilir ve bazı toplulukları dezavantajlı hale getirebilir.

Öte yandan, adil bir enerji dönüşümü, planlı bir şekilde tasarlanıp yürütülürse, topluluklara büyük faydalar sağlayabilir. Buna halk sağlığını iyileştirmek, yeni yeşil işler yaratmak, enerji bağımsızlığını teşvik etmek, enerji maliyetlerini düşürmek ve toplumun tüm üyeleri için uygun fiyatlı ve güvenilir enerjiye erişimi artırmak da dahildir. Dahası, adil bir enerji dönüşümü, yerel toplulukların enerji geleceklerini aktif olarak şekillendirmelerini ve çeşitli gruplar arasında iş birliğini ve dayanışmayı teşvik ederek sosyal uyumu teşvik etmelerini sağlayabilir.²

² Just Energy Transition - <https://taracclimate.org/just-energy-transition/>-(Erişim Tarihi: 12.04.2024)

İklim değişikliğinin başlıca sebebi olan aşırı karbon salınımının başlangıcı kabul edilen Sanayi Devrimi sonrası en yoğun karbon salan ülkeler gelişmiş ülkeler olmuştur. Diğer taraftan, özellikle yoksullukla mücadele eden ve iklim değişikliğinden fazlaca etkilenen ülkeler için iklim krizine karşı tedbir almak büyük zorluklar yaratmıştır. Bu ülkelerden biri olan Güney Afrika Cumhuriyeti bir yandan yoksullukla mücadele ederken diğer yandan iklim değişikliğinin olumsuz etkileriyle yoğun bir mücadele içine girmeyi hedeflemiştir. Bu hedefi gerçekleştirirken ihtiyacı olan finansman kaynaklarına erişmek üzere girişimlerde bulunmuş, kömürden çıkış için hamleler yapmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, tüm dünyanın gündemini meşgul eden iklim krizi ile mücadele ederken adil bir geçiş gerçekleştirmeyi hedefleyen, fakat aynı zamanda fosil yakıt yoğun enerji endüstrisine sahip Güney Afrika Cumhuriyeti'nin dezavantajlarına rağmen bu konuda attığı adımlar ve yaşadığı zorlukları inceleyerek ülkemizin de net sıfır hedefi yoluna ışık tutmak amaçlanmaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikle iklim değişikliği ve adil geçiş ile ilgili bilgilere yer verilecek daha sonra Güney Afrika Cumhuriyeti özelinde iklim değişikliği ile mücadele edilirken geçişin adil bir şekilde gerçekleşmesi için ne gibi hamleler yapıldığı incelenecektir. Sonuç itibarıyla Güney Afrika örneğinden ülkemiz adına çıkarılabilecek dersler ortaya konacaktır. Çalışma boyunca Güney Afrika resmi dokümanları, uluslararası kuruluşların raporları, akademik makaleler ve araştırmalar olmak üzere ikincil kaynaklar kullanılacaktır.

BULGULAR

3.1.Adil Geçiş

Adil geçiş kavramı ilk olarak 1970'lerde sanayi kaynaklı çevre ve sağlık sorunlarına dikkat çekilen işçi hareketleri ile gündeme gelmiştir. 1990'lara gelindiğinde kavram, ABD'de çevre mevzuatı ve kontrollerinin sıkılaştırılması ve hükümetin kirletici sanayilere yönelik önlemleriyle, işçi sendikaları çevre korumayı desteklerken istihdamın kaybolması riskine karşılık işçilere destek programı oluşturulması talebiyle yeni bir boyut kazanmıştır. Amaç, kirletici sektörlerde çalışan işçilerin ve toplulukların işlerinin ve gelirlerinin korunması, çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve sağlıklı bir çevrede yaşama imkânlarının sağlanması olmuştur.

2000'lerin ortasından itibaren, adil geçiş talepleri küresel ölçekte yayılmaya başlamış ve 2010'ların başından itibaren ise uluslararası iklim siyasetinde ana akımlaşan bir kavram hâline gelmiştir. Adil geçiş için dönüm noktası 2015'te Paris'te düzenlenen, dünya iklim siyasetinin yol haritası niteliğinde olan Paris Anlaşması'nın imzalandığı COP21 olmuştur. Adil geçişe işaret eden "ulusal düzeyde tanımlanmış kalkınma öncelikleri doğrultusunda, iş gücünün adil geçişi ile insana yakışır ve nitelikli işler oluşturmanın gerektirdiği şartları dikkate alınması" ifadesi Paris Anlaşması'nın giriş bölümünde yer almıştır.³

³ Neden Adil Geçiş?- <https://komursuzmilas.org/neden-adil-gecis> (Erişim Tarihi: 05.04.2024)

Paris İklim Anlaşması, dünyanın gündemini yaklaşık 40 yıldır meşgul etmekte olan küresel iklim değişikliği konusunda atılan en etkili adımlardan biri olmuştur. Geçtiğimiz 40 yıl süresince hem gelişmiş ülkeler hem de gelişmekte olan ülkelerin katılımıyla düzenlenen toplantılarda, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için kararlar alınmakta ve protokoller imzalanmaktadır. Ancak gelinen süreçte önceki dönemde alınan kararların işlevlerini yitirmesi yeni ve daha kapsayıcı bir iklim anlaşması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle ortaya çıkan Paris Anlaşması; ulusal katkılar, azaltım, uyum, kayıp/zarar, finansman, teknoloji geliştirme ve transferi, kapasite geliştirme, şeffaflık, durum değerlendirmesi konularına ilişkin uygulama usulleri belirlenmek üzere bir çerçeve oluşturmuştur. Emisyon azaltımı hususunda anlaşma, gelişmiş ülkelerin mutlak emisyon azaltımı hedeflerini sürdürmeleri; gelişmekte olan ülkelerin ise emisyon azaltımı hedeflerini yükselterek farklı milli koşulları uyarınca, zaman içinde tüm ekonomiyi kapsayacak yeni, artırılmış hedefler benimsemelerini telkin etmektedir.

Öte yandan, bölgesel anlamda Avrupa Yeşil Mutabakatı da hem Avrupa kıtasındaki hem de bu ülkelerle ticaret yapan ülkeleri kapsayacak şekilde önemli düzenlemeler ortaya koymuştur. Bu tedbirler alınırken “kimseyi geride bırakmama” ilkesini şiar edinerek “Adil Geçiş Mekanizması adı altında çeşitli finansman kaynakları oluşturulmuş ve atmosferi kirleten enerjiden uzaklaşıp temiz, yenilenebilir enerjiye doğru bir geçişin herkes için adil bir şekilde yapılması hedeflenmiştir.

Bu bağlamda, gerek Paris İklim Anlaşması gerekse Avrupa Yeşil Mutabakatı dezavantajlı durumdaki ülkeler için çeşitli kolaylıklar sağlamayı hedeflemiş ve adil bir enerji dönüşümü için bu ülkelere finansman olanakları ortaya konmuştur.⁴

Bu olanaklardan en önemlisi; Kasım 2021'de düzenlenen COP 26'da imzalanan, Fransa, Almanya, Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği tarafından desteklenen **Adil Enerji Dönüşüm Ortaklığı**'dır (JETP).⁵

Başkanlığını İngiltere'nin yaptığı JETP bir finansman mekanizmasıdır. JETP finansmanı hibeler, krediler veya yatırımlar yoluyla sağlamaktadır. Bu Ortaklıkta, gelişmiş ülkeler, gelişmekte olan ülkelerin kömürü aşamalı olarak kaldırma ve temiz enerjiye geçiş yolunu desteklerken sosyal sonuçları da ele alarak kömüre bağımlı olan ülkeyi finanse eder.

Burada konunun sosyal yönü de büyük önem taşımaktadır. JETP, planlarında nüfusun önemli bir kısmının etkileneceği öngörüsü ile hareket etmektedir. Yeniden beceri kazandırma, beceri geliştirme, yeni işler yaratma gibi olanaklar yaratarak enerji geçişinin toplum üzerinde oluşturacağı dezavantajları minimize etmeyi hedefler.

Glasgow'da Kasım 2021'de gerçekleştirilen COP 26'da ilk Adil Enerji Geçiş Ortaklığı'nın Güney Afrika Cumhuriyeti ile yapılacağı duyurulmuştur.

3.2.Güney Afrika Cumhuriyeti Adil Geçiş Süreci

JET-P Ortaklığı'nın Güney Afrika Cumhuriyeti ile olması elbette tesadüf değildir. Güney Afrika, iklim değişikliğinin yıkıcı etkisinden en fazla etkilenen ülkelerin başında gelmektedir.

⁴ What is a just energy transition?-<https://www.oxfamamerica.org/explore/stories/what-is-a-just-energy-transition/>-(Erişim Tarihi: 01.07.2024)

⁵ Joint Statement: South Africa Just Energy Transition Investment Plan https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_22_6664-(Erişim Tarihi: 08.08.2024)

Güney Afrika topraklarının %80'inden fazlası kuraktır ve bu durum ülkenin aşırı su stresi yaşadığının göstergesidir. Diğer yandan, Güney Afrika, Afrika'da en yüksek karbon emisyonu yapan ülkedir. Bunun yanı sıra, dünyada da en çok sera gazı emisyonu yapan 25 ülke arasındadır. Bunun en önemli sebebi, ülkenin enerji ve elektrik tedarikinin %80'nden fazlasının kömürden elde edilmesidir. Güney Afrika'nın iç kesimlerinde ısınma, küresel ortalama oranın yaklaşık iki katı oranında gerçekleşmektedir. Küresel sıcaklığın 2°C artması durumunda, Güney Afrika sıcaklığında 4°C'ye kadar artış beklenmektedir. İklim değişikliğiyle mücadele çabalarının düşük veya başarısız olduğu bir gelecekte, sıcak hava dalgaları, yangın tehlikesi yüksek günler ve insan sağlığını ve konforunu etkileyen bunaltıcı sıcaklıklar gibi olaylarda daha da büyük artışlar beklenmektedir.

Çok sayıda insanın yoksul olduğu ve eşitsizliğin yüksek olduğu bu ülkede, iklim değişikliğinin bu etkilerine yönelik olarak harekete geçilmediği takdirde sayısız türün ve ülkenin en değerli ekosistemlerinin yok olmasına, deniz seviyesinde aşırı artışlara ve insan geçim kaynaklarının tahrip olmasına yol açacaktır.⁶

Güney Afrika tarihi boyunca türlü sıkıntılarla mücadele etmek zorunda kalan bir ülkedir. Yoksulluk, susuzluk gibi oldukça zorlayıcı koşulların yanı sıra uzun yıllar süren ırkçılık mücadelesi de ülkenin gelişimini sekteye uğratan en önemli unsurlardan biridir. Ülkede 1948 - 1994 yılları arasında azınlık konumunda bulunan beyazların, ülkenin asıl sahibi olan siyahlara uyguladığı ırkçı kurumsallaşmış yönetim sistemi sadece ekonomik anlamda bölgeyi sömürmekle kalmamış; bölgede hak ve özgürlük anlamında da sınıfsal bir sömürü düzeni kurmuştur. Apartheid Rejimi olarak adlandırılan bu rejime karşı 1990'lı yıllara doğru ülke içerisindeki ve dışarısındaki memnuniyetsizlik fazlaca artmış, geniş çaplı işçi grevleri baş göstermiş ve hükümetin silahlı kuvvetleri hedef haline gelmeye devam etmiştir. Birçok tutuklu açlık grevine başlayarak hükümetin ve uluslararası kamuoyunun dikkatini çekmeye çalışmıştır.

1994 yılında Apartheid sona erdiğinde ülkede yoksulluk oranı oldukça yüksek rakamlara ulaşmış ve vatandaşların insani ihtiyaçlara dahi ulaşması oldukça güç hale gelmiştir. Bu ihtiyaçlardan biri olan elektrik, Güney Afrikalıların sadece %36'sının evinde bulunmaktaydı. Bunun bir sonucu olarak, Güney Afrika'nın ilk demokratik seçimini kazanan Nelson Mandela'nın başkanlığını yaptığı Afrika Ulusal Kongresi'nin seçimi kazanmasındaki en büyük etkenlerden biri "Herkes İçin Elektrik" vaadi olmuştur. Hükümet, "Kalkınma Programı"nda, 2000 yılına kadar 2,5 milyon eve elektrik vererek mevcut sayıyı ikiye katlamayı vaat etmiştir.

Güney Afrika'da elektrik faaliyetleri 1923 yılında kurulan kamuya ait elektrik şirketi ESKOM tarafından yürütülmektedir. Apartheid sonrasında ESKOM, ülkenin yeni yöneticileri ile işbirliği içinde Güney Afrika'nın elektrifikasyonunu hızlandırmış olup ülke çapında 300.000'den fazla elektrifikasyon gerçekleştirilmiştir. Ardından bu sayı 1997'de yarım milyona ulaşmış her yıl yaklaşık üç milyon Güney Afrikalı şebekeye bağlanmıştır.⁷

⁶ Climate Change In South Africa: 21 Stunning Facts About South Africa's Climate Breakdown- <https://www.greenpeace.org/africa/en/blogs/54171/climate-change-in-south-africa-21-stunning-facts-about-south-africas-climate-breakdown/> - (Erişim Tarihi: 03.08.2024)

⁷ African Renaissance - "Powering transformation"- <https://www.eskom.co.za/heritage/history-in-decades/eskom-1993-2002/> - (Erişim Tarihi: 30.07.2024)

Elektrifikasyonun artması bir yandan ülkede eşitsizliğin azalmasına neden olurken diğer yandan elektrik üretiminin %90'ını kömürden sağlayan ülke için yeni sorunları beraberinde getirmiştir. Güney Afrika'nın elektrik üretimi için birincil yakıt kaynağı olarak kömüre olan bağımlılığı, onu dünyanın en büyük 15 sera gazı (GHG) yayıcısından biri yapmıştır. 2022'deki net emisyon 405 metrik ton CO₂'ye ulaşmış olup bu miktar, 2000 yılına göre %10'luk bir artışa tekabül etmektedir. İklim değişikliğinin başlıca sebebi olan karbon salınımı ile mücadele, ülke için zorunlu hale gelmiştir. Zira iklim değişikliği Güney Afrika ekosistemlerini, ekonomilerini ve geçim kaynaklarını şimdiden değiştirmeye başlamıştır. 1990'dan beri, ulusal ortalama sıcaklık küresel sıcaklıkların iki katı kadar hızlı artmıştır. Güney Afrika'nın Ulusal Uyum Planı'na göre, aşırı hava olayları ve sıcak hava dalgaları artış göstermiş, kuraklık süreleri uzamış ve yağış yoğunluğu artmıştır. Ülkenin bazı bölgelerinde su kıtlığı nedeniyle daha sık kuraklık yaşanmaktadır. Sıcaklık uçlarındaki öngörülen değişiklikler, artan hastalık yükü de dahil olmak üzere sağlık sistemine ek yük bindirmekte ve altyapı, hizmetler, ilaç ve tıbbi malzemelerin bulunabilirliği ve acil servisler gibi yönleri etkilemektedir.

Bütün bu olumsuzlukların yaşandığı Güney Afrika Cumhuriyeti, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak ve iklim değişikliğine adaptasyon için harekete geçmiş ve bu kapsamda, Güney Afrika Kabinesi tarafından, bir "İklim Komisyonu" kurulmak suretiyle, Güney Afrika'nın "Düşük Emisyonlu Kalkınma Stratejisi", "Ulusal İklim Değişikliği Uyum Stratejisi", "Karbon Vergisi ve Adil Geçiş Çerçevesi"nin oluşturulması da dahil olmak üzere temel iklim eylemleri onaylanmıştır.⁸

Bunları müteakip, Güney Afrika Cumhurbaşkanı tarafından, 2020 yılında ülkenin iklim değişikliğine tepkisine ilişkin öneriler sunmak ve düşük karbonlu ve iklim değişikliğine dayanıklı bir ekonomi ve toplum için adil geçişi desteklemek amacıyla çok paydaşlı bir organ olan "Başkanlık İklim Komisyonu" (PCC) kurulmuştur. PCC'ye verilen görevlerden en önemlisi, Güney Afrika için adil bir geçiş çerçevesi tasarlamaktır.

"Adil Geçiş Çerçevesi", düşük emisyonlu, iklime dirençli bir ekonomiye adil bir geçiş sağlamanın ilk yapı taşı olarak tanımlanmıştır. Çerçeve, Ağustos 2022'de Kabine tarafından kabul edilmiş olup Güney Afrika'daki adil geçiş planlamasının koordinasyonuna ve tutarlılığına yardımcı olması beklenmektedir. Adil Geçiş Çerçevesi, geçişin vizyonlarını, uygulanabilir ilkelerini, politikalarını ve yönetimini özetlemektedir. Çerçeve, çeşitli çalışmalar, politikalar ve istişareler yoluyla ve uluslararası en iyi uygulamalardan yararlanılarak hükümet, iş dünyasının aktörleri, sivil toplum kuruluşları, akademik gruplar ve işçi sendikaları gibi çeşitli tarafların işbirliğiyle geliştirilmiştir. Geliştirme süreci sırasında PCC, ihtiyaçlarının daha kapsamlı bir resmini elde etmek için bu geçişten etkilenen topluluklarla doğrudan istişarede bulunmuştur. Ancak Güney Afrika, adil bir geçiş için 'herkese uyan tek çözüm' yaklaşımının bulunmadığının bilincindedir. Bu nedenle her sosyal ortağın, çerçevede dile getirilen spesifik koşullar,

⁸ South Africa Climate Change Country Profile- <https://www.usaid.gov/climate/country-profiles/south-africa#:~:text=The%20South%20African%20Cabinet%20has,and%20a%20Just%20Transition%20Framework.-> (Erişim Tarihi: 21.04.2024)

sorumluluklar, etki alanı, vizyon, ilkeler ve müdahaleler doğrultusunda kendi politika ve programlarını tasarlaması beklenmektedir. Ek olarak, çerçevenin uygulanmasında cinsiyet boyutu, gençler ve kayıt dışı sektördeki işçiler de dikkate alınmaya çalışılmaktadır.

Tasarıda adil geçişin tanımı şu şekilde yapılmıştır:

- Adil bir geçiş, iklimin olumsuz etkilerine uyum sağlama yeteneğinin artırılması, iklim direncinin desteklenmesi ve mevcut en iyi yöntemlere uygun olarak 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonuna ulaşılması bağlamında tüm Güney Afrikalılar için kaliteli bir yaşam elde etmeyi amaçlamaktadır.
- Adil bir geçiş, herkes için insana yakışır iş, sosyal katılım ve yoksulluğun ortadan kaldırılması hedeflerine katkıda bulunur.
- Adil bir geçiş, insanları, özellikle de en çok etkilenenleri (yoksullar, kadınlar, engelliler ve gençler) karar alma sürecinin merkezine yerleştirir ve onları gelecekteki yeni fırsatlar için güçlendirir ve donatır.
- Adil bir geçiş, doğal kaynakları korumak, su kaynaklarına adil erişimi sağlamak, kişilerin sağlığına ve refahına zarar vermeyen bir ortam sağlamak ve başta en savunmasız olanlar olmak üzere herkes için sürdürülebilir, adil ve kapsayıcı bir düzen oluşturmak suretiyle, merkezi olmayan yenilenebilir enerji sistemleri aracılığıyla ekonominin ve insanların dayanıklılığını temin eder.

Bu kapsamda, “Güney Afrika Anayasası”nın ikinci bölümünde haklar beyanında adil bir geçişin ilkeleri oluşturulmuştur. Barınma, sağlık, gıda, su ve sosyal hizmetler gibi sosyo- ekonomik hakların yanı sıra demokratik ve siyasi haklarla ilgili hakları da tanımlamaktadır. Diğer haklar arasında kültürel ve dilsel topluluk hakları ile çevresel ve sürdürülebilir kalkınma ve kolektif örgütsel ve ekonomik faaliyetler gibi kolektif kalkınma hakları yer almaktadır. Bu haklar, insanları karar vermenin merkezine koyan ilkeleri, üreticilerin ve kirleticilerin sorumluluklarını ve çevresel kaynaklara eşit erişimi kapsayan “Ulusal Çevre Yönetimi

“Ulusal İklim Değişikliği Uyum Stratejisi’nde, en önemli uyum hedefleri arasında; kurumsal kapasiteyi geliştirmek, yönetişimi ve yasal çerçeveleri artırmak; uyum için fon seferber etmek yer almıştır.

Güney Afrika bütün bu uyum hedeflerini gerçekleştirmek üzere fon arayışına başlamış ve aynı zamanda 2025 ve 2030 için emisyon azaltım hedeflerini rafine ederek her iki yıl için de sabit seviyeli hedef aralıkları oluşturmuştur. Azaltım için belirlenen kritik sektörler; enerji, atık, endüstriyel süreçler ve ürün kullanımı, tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımı olarak belirlenmiştir. Azaltım hedeflerinin sunulduğu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP26), ABD, Birleşik Krallık, Fransa, Almanya ve Avrupa Birliği ile birlikte **Güney Afrika ile Adil Enerji Geçiş Ortaklığı (JETP)** duyurulmuştur. Devlet Başkanı Cyril Ramaphosa, “Adil Enerji Geçiş Ortaklığı”nı (JETP) “bir dönüm noktası” olarak nitelerken; dönemin İngiltere Başbakanı Boris Johnson tarafından ise “oyunu değiştiren bir ortaklık” olarak nitelenmiştir. Ortaklık, Güney Afrika'nın kömürden uzaklaşarak hızlandırılmış enerji geçişini desteklemeyi ve ulusal iklim hedeflerine ulaşan düşük karbonlu bir ekonomi için bir yol haritası çizmeyi amaçlamaktadır. Bu ortaklık küresel bir ilk niteliği taşımakta olup dünya çapında adil bir geçişi desteklemek için iyi bir örnek haline gelme olasılığı yüksektir.

JETP siyasi bildirgesi kapsamında, çok taraflı ve ikili hibeler, imtiyazlı krediler, garantiler, özel yatırımlar ve adil geçişi sağlamak için teknik destek gibi finansal araçların bir kombinasyonu yoluyla beş başlıca ülke ve AB'den üç ila beş yıl içinde yaklaşık 8,5 milyar dolarlık bir başlangıç miktarının Güney Afrika için harekete geçirilmesi taahhüt edilmiştir. 9

Bu fonun kullanımı; zaman dilimini, hedeflerini, dağıtımını ve bölüştürülmesini içeren “Adil Enerji Geçiş Ortaklığı Yatırım Planı”nda (JETP-IP) detaylandırılmıştır. Yatırım planı aynı zamanda adil bir geçiş sağlamak için gereken proje ve faaliyetleri de tanımlamakta ve taahhüt zamanda adil bir geçiş sağlamak için gereken proje ve faaliyetleri de tanımlamakta ve taahhüt edilen fonların kullanımına ilişkin rehberlik sağlamaktadır. Ayrıca bu plan, Güney Afrika'daki JETP sürecinin idari yapısına da biraz ışık tutmaktadır.

⁹ South Africa Climate Change Country Profile - <https://www.usaid.gov/climate/country-profiles/south-africa#:~:text=The%20South%20African%20Cabinet%20has,and%20a%20Just%20Transition%20Framework.> (Erişim Tarihi: 21.04.2024)

JETP-IP'deki üç müdahale alanı aşağıdaki gibi olacaktır:

- Kömür üretimini aşamalı olarak azaltmak ve kömüre bağımlı bölgelerde kömürü çeşitlendirmek ve kömürden uzaklaşmak
- Toplumsal olarak içten yanmalı motorlu araç üretimi ve bakımından uzaklaşmak
- Elektrik de dahil olmak üzere yenilikçi üretken sektörlerde ulusal çeşitliliği ve endüstriyel gelişmeyi teşvik ederek karbondan arındırmak.

JETP-IP'deki bu hedefleri gerçekleştirmek üzere Güney Afrika aşağıdaki spesifik hedefleri belirlemiştir:

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve yenilenebilir enerjiye yönelik yeni yatırımlara uyum sağlamak için iletim şebekesinin güçlendirilmesi de dahil olmak üzere Güney Afrika elektrik sektörünün karbondan arındırılmasının hızlandırılması.
- Fosil yakıtlardan uzaklaşmaya bağlı olarak bu sektörde çalışan işçiler için yeni iş alanları oluşturulması
- Adil bir geçişin uygulanması için gereken elverişli ortamın güçlendirilmesi amacıyla devam eden reform süreçlerinin desteklenmesi.
- Mayınlı arazilerin rehabilitasyonu da dahil olmak üzere geçişin çevresel boyutlarının karşılanması.
- Maden sahalarının yeniden kullanılmasına yönelik destek (örneğin yenilenebilir enerji ve tarım için).
- Yeşil hidrojen ve elektrikli araç sektörü de dahil olmak üzere yeşil ve kaliteli işler yaratmak için teknolojik yeniliklerin ve kamu ve özel yatırımların geliştirilmesinin desteklenmesi.¹⁰

Görüldüğü üzere JET-P Güney Afrika için halihazırda yaşanan iklim krizinden çıkış yolu sunarak, eski, maliyetli kömürle çalışan elektrik santrallerini giderek daha ucuz yeşil alternatiflerle değiştirmesini hızlandırmasına olanak tanımıştır. Öte yandan, uluslararası alanda,

¹⁰ Overview of the South African Just Energy Transition Partnership https://www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch_irid_overview_of_the_south_african_jet-p_2023.pdf (Erişim Tarihi: 13.08.2024)

JET-P, yeşil endüstrileşme hedefleri olan orta gelirli bir ülkede yeşil bir dönüşümün nasıl gerçekleşebileceğine dair iyi bir örnek teşkil etmektedir.¹¹ Kasım 2021'deki COP26'dan bu yana Güney Afrika'nın JETP'sinde bir miktar ilerleme kaydedilmiştir. Sürecin başında 11,6 milyar dolar tutarında taahhütte bulunulmuştur. Pilot bölge olarak Mpumalanga'da yeniden beceri kazandırma ve ekonomik çeşitlendirme projeleri başlamış olup enerji politikası reformları devam etmektedir. Öte yandan özel sektörde yenilenebilir enerji yatırımları yaygınlaşmaya başlamış ve önemli sayıda iş imkanları ortaya çıkmıştır. Ayrıca, elektrikli araçlara, yeşil hidrojene ve iletim finansmanına yatırımları hızlandırmak üzere bir dizi proje ortaya konmuştur.

Ancak, her ne kadar JETP kapsamında ilerleme kaydedilse de Güney Afrika'nın devam eden elektrik tedarik krizi nedeniyle hükümet tarafından enerji arz güvenliği önceliklerini yönetmek için kömür santrallerinin devre dışı bırakılmasına ilişkin takvimler yeniden değerlendirilme kararına yol açmıştır. Hatta bu nedenle emekliye ayrılan santrallerin yeniden güçlendirilmesi ve yeniden işletmeye başlatılması gibi kararlar alınmıştır.¹² Güney Afrika'da güvenilir elektrik kaynaklarının eksikliği nedeniyle kömür santrallerinin kapanması gecikmekte ve bu durum "yük atma" olarak bilinen elektrik kesintilerine yol açmaktadır. Bu nedenle ülkenin elektrik kurumu Eskom tarafından krize yanıt olarak üç kömürle çalışan elektrik santralının kapatılmasının erteleneceği ifade edilmiştir.

Eskom temiz enerjiyi taşımak için iletim kabloları inşa etmeye çalışmakta ancak şirketin borç batağında olması ve JETP aracılığıyla yeni kredi alma konusunda isteksiz olması nedeniyle ilerleme yavaşlamıştır.

Bu arada hükümetin tüm departmanları tarafından yenilenebilir enerjiye hızlı bir geçiş arzu edilmemektedir. Maden Kaynakları ve Enerji Bakanlığı tarafından yakın zamanda güneş ve rüzgâr enerjisinin yaygınlaştırılmasında keskin bir yavaşlama ve bunun yerine kömürden gaz santrallerine daha fazla geçiş öngören bir "Enerji Planlama Belgesi" yayınlamıştır.

¹¹ Two years into South Africa's Just Energy Transition Partnership: How real is the deal?- <https://ecdpm.org/work/two-years-south-africas-just-energy-transition-partnership-how-real-deal/> (Erişim Tarihi: 03.04.2024)

¹² COP28 update on progress in advancing the South Africa Just Energy Transition Partnership- <https://www.gov.uk/government/news/advancing-the-south-africa-just-energy-transition-partnership/> (Erişim Tarihi: 18.05.2024)

Bu nedenlerden, özellikle de yenilenebilir enerjiye geçme konusundaki belirgin çekingenlikten dolayı anlaşma kapsamındaki fon akışlarının hızı yavaşlamış bulunmaktadır. Özellikle Adil Enerji Geçiş Yatırım Planı kapsamında Ekim 2022'de 1.000 megavat elektrik kapasitesine sahip Komati Termik Santrali'nin kapatılması ülkedeki diğer adil geçiş girişimleri için bir örnek oluşturacağı için önemli dersler çıkarılması gereken bir adım olmuştur. Aynı zamanda, fosil yakıtlardan uzaklaşmak için yapılan en büyük küresel "yeniden işlevlendirme" projelerinden biri olarak duyurulan Komati projesi için Dünya Bankası, 150 MW güneş, 70 MW rüzgar ve 150 MW pil depolama ile çalışan yenilenebilir enerji üretim tesisine dönüştürmek amacıyla 497 milyon dolar fon tahsis etmiştir. Kasaba tamamen tesisin etrafında inşa edildiğinden dolayı özellikle işçiler üzerinde büyük endişe hakim olmuştur. Komati Santrali kullanım ömrü tamamlandıktan sonra kapatılmış ve Eskom tarafından güneş, rüzgar ve gıda çiftliğine, güneş mikro şebekesi montaj fabrikasına ve eğitim tesisine dönüştürülmüştür. Eskom, son kömür üniteleri devre dışı bırakıldığında çalışanlarından hiçbirinin işini kaybetmediğini ve birçoğunun başka enerji santrallerine transfer edildiğini iddia etmiştir. Ancak iddia edildiği gibi her işçi transfer edilmemiş ve işçilerin yaklaşık %30'u işsiz kalmış ve bu bölgede yer alan yerel misafirhaneler ve diğer küçük işletmeler, kapanmanın bir sonucu olarak zorluk çekmişlerdir.¹³

Dünya Bankası yetkilileri planlamanın daha iyi yapılmış olması gerektiğini vurgularken Güney Afrika Cumhurbaşkanlığı İklim Komisyonu, Komati'den alınan dersleri ayrıntılarıyla anlatan bir rapor yayınlamıştır. Raporunda daha iyi "ekonomik çeşitlendirme planlarına" ihtiyaç duyulduğunu belirtilmiştir. Komisyon başkanı Crispian Olver, tarafından "Komati hem yerel hem de küresel olarak bir test vakası. Bize Eskom'un yerel ekonomiyi çeşitlendirmesinin ve geçişte işçileri desteklemesinin ne kadar önemli olduğunu gösterdi. Gerçek şu ki, kömür piyasası aşamalı olarak sona erecek ve geleceğe yönelik planlamayı engellemeye çalışanlar, geçişte yardım alabilecek işçilerin geçim kaynaklarını baltalıyor. Kömür ağırlıklı bir ekonomiyle devam edersek, Avrupa, Avustralya ve hatta ABD'deki piyasalardan dışlanacağız. Bir ihracat ülkesi olmaktan çıkacağız ve tüm bu işleri kaybedeceğiz." şeklinde beyanda

¹³ Komati Power Station: Repowering and Repurposing Environmental and Social Reports-<https://www.eskom.co.za/about-eskom/just-energy-transition-jet/komati-power-station-repowering-and-repurposing/>- (Erişim Tarihi: 02.06.2024)

bulunmuştur. 14 Ayrıca Dünya Bankası tarafından tahsis edilen finansmanın sadece %26'sının yerel şirketlerce kullanıldığı, kalan %74'lük bölümün fon tahsis eden gelişmiş ülkelere kullanılmış olması hususu da eleştiri konusu olmuştur. Bunun yanı sıra söz konusu fon Adil Geçiş için kullanılması gerekirken büyük çoğunluğu elektrik alt yapıları, yeşil hidrojen gibi alanlarda kullanılmıştır. Bu da fondan optimum düzeyde yararlanılmadığı anlamına gelmektedir.

Komati vakası ve ülkedeki elektrik kesintileri nedeniyle, Güney Afrika hükümeti tarafından Grootvlei, Camden ve Hendrina Kömür Santrallerinin emeklilik tarihleri 2030'a uzatılmıştır. Söz konusu santrallerin kapatılmasının ertelenme gerekçesi olarak hükümet yetkilileri Söz konusu santrallerin kapatılmasının ertelenme gerekçesi olarak hükümet yetkilileri tarafından öncelikle ülkenin enerji arz güvenliğinin sağlanmasının yanı sıra geçişin toplumsal sonuçlarıyla başa çıkmak için daha iyi bir planlama yapmak için de zaman kazandıracağı, geçiş planına hala bağlı oldukları ifade edilmiştir. Yine hükümet yetkilileri tarafından plana bağlı kalındığı takdirde elektrik şebekesine, yeşil hidrojene, elektrikli araçlara, ekonomik çeşitliliğe ve beceri geliştirmeye büyük yatırımlar geleceği inancı vurgulanmaya devam edilmektedir.

SONUÇ

Ülkemizin 2053 net sıfır hedefi ve her ne kadar Güney Afrika kadar yoğun olmasa da kömüre dayalı elektrik üretimi bulunmaktadır. Türkiye'nin 2021'de net sıfır karbon hedefini açıklamasının ardından, yapılan çalışmalarda ve yayınlanan politika dokümanlarında adil dönüşüm özellikle istihdam boyutuyla odak noktalardan biri haline gelmiştir. 2022'de düzenlenen İklim Şurası'nın sonuç raporunda “yerinde istihdam”, “insana yakışır istihdam”, “sosyal koruma” ve “çalışanların refahı” kavramlarının vurgulandığı, istihdam politikalarının bölgesel kalkınma ile ilişkilendirildiği kararlar yer almıştır. Son dönemde yayımlanan yeşil ve dijital dönüşümü odağına alan 12. Kalkınma Planı gibi ulusal plan dokümanlarında da yeşil dönüşüm sürecinden çalışanların olumsuz etkilenmemesi için adil geçiş mekanizmalarının kurulması hedeflenmektedir.¹⁵ Bunların yanı sıra Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı bünyesinde bir “Adil Geçiş İhtisas Komisyonu” oluşturulmuştur.

¹⁴ A cautionary tale from South Africa's 'just energy transition'-<https://www.ft.com/content/c0e68f17-7b4d-41dc-85c9-cc40f0eda5f1> -(Erişim Tarihi: 15.08.2024)

¹⁵ Adil Dönüşüm ve Bölgesel İstihdam: Türkiye İçin Politika Seçenekleri - <https://shura.org.tr/adil-donusum-ve-bolgesel-istihdam-turkiye-icin-politika-secenekleri/> (Erişim Tarihi: 05.04.2024)

Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınmayı hedeflemesi, net sıfır karbon taahhütlerine ve küresel ölçekte gerçekleşen yeşil dönüşüme uyum sağlaması için bütünsel bir politika yaklaşımına ihtiyaç bulunmaktadır. Özellikle enerji ve sanayi sektörlerindeki süreçlerin sanayi, ulaştırma, finans ve ticaret politikalarıyla birlikte ele alınarak adil geçiş ilkeleri çerçevesinde yürütülmesi büyük önem taşımaktadır. Piyasa koşullarından ve taahhütlerden kaynaklanan nedenlerle geçiş süreci zaten başlamış olduğundan kapsamlı planlama için hızlı hareket etmek önemlidir. Ayrıca istihdamın bölgesel boyutu da planlama aşamasından başlayarak geçiş sürecinin her aşamasına dahil edilmelidir. Bütün planlama aşamaları da geniş katılımlı çalışmalarla gerçekleştirilmelidir. Sadece kamu değil, akademi, özel sektör, sivil toplum kuruluşları da sürece dahil edilmeli ve yerel bazda pilot uygulamalar gerçekleştirilmelidir.

Bunun yanı sıra Güney Afrika Cumhuriyeti'nin de dahil olduğu Adil Geçiş Ortaklığı gibi uluslararası fon imkanlarından yararlanmak için planlamaların hızlı yapılması, yine Avrupa Birliği'nin "Adil Geçiş Mekanizması" kapsamındaki programlara başvuruların gerçekleştirilmesi gibi fonlama mekanizmalarından yararlanılması, sürecin finansmanı açısından da oldukça yararlı olacaktır. Ancak bu finansmanın başka alanlara aktarılmadan sadece adil geçiş ile ilgili alanlara aktarılması ve özellikle ulusal kalkınmaya katkısının da gözetilerek yerli şirketlerce kullanılmasına özen gösterilmesi de önemli bir husustur.

Güney Afrika örneğinde görüldüğü üzere iyi bir planlama yapılmadığı takdirde enerji arz güvenliği tehlikeye girebileceği gibi sektör çalışanlarının mağduriyetleri söz konusu olacaktır. Yeşil dönüşümün adil bir şekilde gerçekleşmesine yönelik alınacak tüm tedbirler ülkemizin refahı ve gelecek nesillere sürdürülebilir bir ülke bırakmamız açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Just Energy Transition -<https://taraclimate.org/just-energy-transition/> (Erişim Tarihi: 12.04.2024)
- [2] Neden Adil Geçiş? -<https://komursuzmilas.org/neden-adil-gecis> (Erişim Tarihi: 05.04.2024)
- [3] What is a just energy transition?-<https://www.oxfamamerica.org/explore/stories/what-is-a-just-energy-transition/> (Erişim Tarihi: 01.07.2024)
- [4] Joint Statement: South Africa Just Energy Transition Investment Plan
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_22_6664 (Erişim Tarihi: 08.08.2024)
- [5] Climate Change In South Africa: 21 Stunning Facts About South Africa's Climate Breakdown- <https://www.greenpeace.org/africa/en/blogs/54171/climate-change-in-south-africa-21-stunning-facts-about-south-africas-climate-breakdown/> (Erişim Tarihi: 03.08.2024)
- [6] African Renaissance - "Powering transformation"-
<https://www.eskom.co.za/heritage/history-in-decades/eskom-1993-2002/> - (Erişim Tarihi: 30.07.2024)
- [7] South Africa Climate Change Country Profile - <https://www.usaid.gov/climate/country-profiles/south-africa#:~:text=The%20South%20African%20Cabinet%20has,and%20a%20Just%20Transition%20Framework.> (Erişim Tarihi: 21.04.2024)
- [8] South Africa Climate Change Country Profile - <https://www.usaid.gov/climate/country-profiles/south-africa#:~:text=The%20South%20African%20Cabinet%20has,and%20a%20Just%20Transition%20Framework.> (Erişim Tarihi: 21.04.2024)

- [9] Overview of the South African Just Energy Transition Partnership-
https://www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch_irid_overview_of_the_south_african_jet-p_2023.pdf (Erişim Tarihi: 13.08.2024)
- [10] Two years into South Africa's Just Energy Transition Partnership: How real is the deal?-
<https://ecdpm.org/work/two-years-south-africas-just-energy-transition-partnership-how-real-deal> (Erişim Tarihi: 03.04.2024)
- [11] COP28 update on progress in advancing the South Africa Just Energy Transition Partnership-
<https://www.gov.uk/government/news/advancing-the-south-africa-just-energy-transition-partnership> (Erişim Tarihi: 18.05.2024)
- [12] Komati Power Station: Repowering and Repurposing Environmental and Social Reports-
<https://ecdpm.org/work/two-years-south-africas-just-energy-transition-partnership-how-real-deal> (Erişim Tarihi: 02.06.2024)
- [13] A cautionary tale from South Africa's 'just energy transition'-
<https://www.ft.com/content/c0e68f17-7b4d-41dc-85c9-cc40f0eda5f1> (Erişim Tarihi: 15.08.2024)
- [14] Adil Dönüşüm ve Bölgesel İstihdam: Türkiye İçin Politika Seçenekleri-
<https://shura.org.tr/adil-donusum-ve-bolgesel-istihdam-turkiye-icin-politika-secenekleri/>
(Erişim Tarihi: 05.04.2024)

142: Elektrik Enerjisi Ve Elektrik Enerjisi Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynaklarının İthalatının Döviz Kuru (ABD \$) Üzerindeki Etkisi: Hatemi-J Asimetrik Nedensellik Analizi

Nizamettin Başaran

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Ulukışla MYO

Hüseyin Serdar Yalçınkaya

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya Ereğli Kemal Akman MYO

Tuncay Belen

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

ÖZET

Ekonomi üzerine yapılan araştırmalarda enerji ve özellikle elektrik enerjisi konuları önemli bir paya sahiptir. Elbette üretimin ve dinamizmin en önemli unsurunun enerji olması ekonomik araştırmalarda enerji maliyetlerinin incelenmesini de zorunlu hale getirmektedir. Özellikle sanayi devrimi sonrası ekonomik araştırmalarda kömür ve petrol gibi farklı enerji kaynakları odak noktasını oluştururken, günümüz ekonomilerinde yoğun bir şekilde elektrik enerjisi ön plana çıkmaktadır. Ancak günümüzde elde edilen elektrik enerjisi birincil bir enerji kaynağı olmayıp, birincil enerji kaynakları üzerinden dolaylı olarak elde edilmektedir. Bu nedenle elektrik kullanımının ekonomiye olan etkileri araştırılırken elektrik enerjisinin elde edildiği kömür, petrol, nükleer, hidroelektrik, güneş, rüzgar ve benzeri tüm temel enerji kaynakları göz ardı edilmemelidir. Elektrik enerjisinin elde edilmesindeki söz konusu birincil enerji kaynaklarının dünya genelinde dengeli dağılmadığını bilmekteyiz. Söz konusu dengesiz dağılım enerji kaynaklarının dış ticareti ile dengelenmeye çalışılmaktadır. Enerjiye bağlı ortaya çıkan dış ticaret ise uluslararası döviz piyasalarında volatiliteye neden olmaktadır. Birincil enerji kaynakları açısından pek te şanslı olmayan Türkiye’de ise elektrik üretiminin önemli bir kısmı ithalat yolu ile temin edilmektedir.

Yapmış olduğumuz bu çalışma ile elektrik üretimi için ithal edilen birincil enerji kaynaklarının (Doğal Gaz, İthal Kömür ve Fuel Oil) ve doğrudan ithal edilen elektrik enerjisinin döviz kurları üzerinde bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Araştırmada kullanılan veriler Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu’na ait Şeffaflık Platformu olan EPIAŞ veri tabanından alınmıştır. EPIAŞ veri tabanının sınırları çerçevesinde 01/01/2014 ile 31/12/2023 tarihleri arasındaki farklı enerji kaynaklarından günlük elde edilen elektrik üretimi ve doğrudan ithal edilen elektrik (Mwh) değerleri ile enerji dış ticaretinde yoğun kullanılan günlük ABD \$ döviz kuru verileri araştırmanın veri setini oluşturmuştur. Oluşturulan veri seti üzerinde enerji kaynaklarının günlük miktarlarındaki pozitif ve negatif dalgalanmaların döviz kurundaki günlük pozitif ve negatif dalgalanmalarına olan etkisi Hatemi-J Asimetrik Nedensellik analizi ile test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda enerji ithalatındaki artışlar döviz kurundaki artışları etkilediği, enerji ithalatında yaşanan azalmanın ise döviz kuruna pozitif ya da negatif bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ulaşılan bu sonuçlara göre enerji ithalatının artışı ABD \$ kuru üzerinde pozitif bir baskı oluşturmaktadır. ABD \$ döviz kuru üzerindeki baskıyı kaldırmak için enerji ithalatını azaltıcı gelecek planlarının yapılması rasyonel bir önerme olacaktır.

Anahtar Kelimeler: İthal Enerji Kaynakları, Döviz Kur Riski, Asimetrik Nedensellik

GİRİŞ

Yaşamın hatta tüm evrenin çalışmasını sağlayan en temel unsur enerjidir. Enerji yokluğu tüm çalışan sistemlerin yok olmasına neden olacaktır. Elbette ekonomik unsurların her biri çalışan bir sistemin parçası olduğu için enerjinin yokluğu ya da azlığı tüm ekonomik sistemin bozulmasına neden olacaktır. Enerjiye olan bu bağımlılık çok çeşitli kaynaklardan giderilebilmekle birlikte ekonomik kullanıma dönüşebilmesi için farklı enerji kaynakları çoğunlukla elektrik enerjisi formuna dönüştürülerek ekonomide kullanılmaktadır. Tüm ekonomik kaynaklarda olduğu gibi enerji kaynakları da dünyada homojen dağılmamaktadır. Enerji kaynaklarının heterojen dağılımı ülkeler arası ekonomik eşitsizliklere neden olmaktadır. Enerji kaynağı fazla olan ülkeler maliyeti daha düşük rant gelirleri elde ederken diğer ülkeler maliyeti daha yüksek gelir elde etmek zorunda kalmaktadır. Bu maliyet farkına bağlı ekonomik dengesizliği ortadan kaldırmak için ülkeler katma değeri yüksek ürünleri üretmeye odaklanmakta ve bu durum ülkenin daha fazla enerji ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Söz konusu döngü sonucunda enerji kaynağı yetersiz ülkeler enerji bağımlısı ülkelere dönüşmektedirler. Enerjiye bağımlı olan ülkeler birbirleri ile siyasi ve özellikle ekonomik bakımdan daha farklı ilişki kurma durumundadır (Erdal ve Karakaya, 2012:108). Elbette ekonomik kalkınma için enerjiye çok büyük oranda ihtiyaç vardır, ancak iç enerji kaynakları yetersiz ülkeler enerji konusunda dış ticarete yönelecek ve bu durum ülke ekonomisini daha kırılgan bir yapıya dönüştürmekle birlikte siyasi gücünde de zayıflamaya neden olacaktır (Özdemir ve Yüksel, 2006: 2). Enerji ithalatı ve enerji fiyatları arttıkça kullanılan enerji maliyetleri de yükselmektedir. Makro ekonomik açıdan ise enflasyon, döviz kuru, cari açık, ekonomik büyüme yönünden olumsuz etkiler gözlemlenmektedir (Soydal, Mızrak ve Çetinkaya, 2012: 131, Acaravcı, Yıldız: 2018). Enerji kaynağı yetersizliğinde ülkelerin karşılaşılabileceği mikro ve makro problemler içerisinde ülkelerin döviz kuru problemleri büyük bir yer tutmaktadır. Özellikle enerji fiyatları ile döviz kurları arasındaki ilişkinin varlığı ve yapısı bir çok çalışmaya konu olmuştur. Literatür incelendiğinde bu çalışmalarda en çok petrol fiyatları ile döviz kurları arasındaki ekonomik ilişkinin irdelendiği anlaşılmaktadır.

Petrol fiyatları ile döviz kuru arasındaki ilişkiyi araştıran öncül çalışmalar Krugman (1980) ve Golub'a (1983) aittir. Bu öncül çalışmalarda enerji açığı olan ülkelerde petrol fiyatlarındaki artışın o ülkenin döviz kurunda düşüşe neden olacağını, petrol ihraç eden ülkelerde ise tam tersi kendi para birimlerinde artış olacağını iddia etmişlerdir. Amano ve Van Norden (1998) tarafından yapılan çalışmada analitik olarak petrol fiyatındaki dalgalanmanın döviz kuru dalgalanmalarını etkili bir şekilde açıklayabildiği belirtilmektedir. Yapılan bu çalışmalarda petrol fiyatlarının döviz kurlarını etkilediği sonucuna ulaşılrken, sonraki dönem araştırmalarda döviz kurundaki değişikliğin petrol fiyatları üzerinde değişikliğe neden olacağı ortaya konulmuştur. Bu çalışmalardan bir tanesinde Bloomberg ve Harris'e (1995) ait olup, petrol ticaretinin ABD Doları üzerinden gerçekleştiği kabul edilmekte ve buna bağlı olarak ABD Dolarının yabancı bir para birimi karşısında değer kaybetmesinin o ülkede görece petrol fiyatının düşmesine ve talebinin artmasına neden olacağı ortaya konulmaktadır. Bu durumda ise bir taraftan ülkenin satın alma gücü artarken aynı zamanda petrol talebi artacak ve petrol fiyatlarında genel bir artışın olması beklenecektir. Bloomberg ve Harris'e ait bu teorinin Sadorsky (2000), Indjehagopian vd. (2000), Akram (2009), Özsöz ve Akinkunmi (2011), Hassan ve Zahid (2011) ve Şahbaz vd. (2014) çalışmalarında geçerli olduğu ortaya konulmuştur. Zhang ve Diğerleri (2008) ise böylesi bir ilişkinin kısa dönem için geçerli olacağını ancak uzun dönemde kaybolacağını iddia etmektedir.

Literatürde konu ile ilgili çalışmaların bir kısmı ise değişkenler arasında çift yönlü ilişkinin bulunduğunu iddia etmektedir (Adıgüzel, Bayat ve Kayhan: 2016, 243). Sonuç olarak, yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle enerji fiyatları ile döviz kurları arasındaki ilişki incelenmiştir. Enerji kullanımı ve özellikle ithal enerji kaynak kullanımının döviz kurları üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. Yapılan bu çalışma ile literatürde önemli bir eksiğin giderileceği düşünülmektedir.

LİTERATÜR

Enerji kaynakları ve döviz kuru üzerine yapılan çalışmalar; enerji kaynağının fiyatındaki değişimin döviz kuru üzerine olan etkisini araştırmaktadır. Söz konusu bu etkiyi araştıran birçok araştırmacı ve makale bulunmakta olup bu çalışmaların bir kısmı aşağıda sunulmuştur.

Altıntaş (2013) 1987-2010 yılları arasında üçer aylık veriler kullanılarak petrol fiyatı ve döviz arasında ilişkinin varlığı araştırılmıştır. Yapılan çalışmada petrol fiyatları ve döviz arasında çift yönlü nedensellik tespit edilmiştir.

Uçan (2015) “Enerji Büyüme İlişisine Ampirik Bir Yaklaşım” isimli çalışmasında 1990- 2011 yılları verileri kullanılarak enerji kullanımı ve döviz kuru arasındaki ilişki nedensellik analizi ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kur değişkeninden enerji kullanımına bir nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir.

Lebe ve Akbaş (2015) 1991-2012 yılları arası verilerini kullanarak petrol fiyatları ile cari açık ve döviz kurları arasındaki ilişkiyi nedensellik analizleri ile araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre petrol fiyatları cari açığın bir nedeni iken döviz kurlarının bir nedeni olmadığı tespit edilmiştir.

Kaplan ve Aktaş (2016) 1995-2014 dönemi içerisinde ABD, Çin, Kanada, Meksika ve Rusya’ya ait veriler kullanılarak petrol fiyatları ve döviz kurları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda ABD ve Çin döviz kurları petrol fiyatlarından etkilenmezken, Kanada ve Meksika pozitif, Rusya ise negatif yönde etkilenmektedir.

Adıgüzel vd (2016) 2009-2015 yılları arasında aylık reel döviz kuru (TL/ABD Dolar) ve petrol fiyatları değişken olarak ele alınmış ve bu değişkenler üzerinden asimetric nedensellik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda petrol fiyatları döviz kurunun nedeni olduğu tespit edilmiştir.

Doğan ve Gürbüz (2017) 2002- 2015 yılları arasında enerji harcamaları ile cari açık arasında nedensellik araştırması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Türkiye’de gerçekleşen enerji harcamaları ile cari açık arasında çift yönlü nedensellik yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Sinan (2021) “Türkiye’de YEKDEM ile Döviz Kuru, Elektrik Tüketimi Arasındaki İlişki” isimli çalışmasında; uzun dönemde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM) aylık gerçekleşen birim fiyatları ile aylık toplam elektrik tüketimi ve aylık USD döviz kuru arasında bir ilişki olduğu sonucuna varmıştır. Ancak çalışmada ilişkinin yönü hakkında bir açıklama bulunmamaktadır.

Bilgin (2023) 2014- 2022 yılları arasında petrol fiyatları ile Türkiye’de oluşan enflasyon arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Yapılan çalışmada petrol fiyatları, TL/USD kuru ve enflasyon verileri kullanılarak nedensellik analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre petrol fiyatlarından TL/USD Dolar endeksine doğru bir nedensellik tespit edilmiştir.

Şişeci ve Yamaçlı (2020) “Enerji İthalatı, Döviz Kuru ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki” isimli çalışmalarında; reel GSYH’da yaşanan %1’lik artışın reel enerji ithalatını %0,2, reel efektif döviz kuru endeksinde yaşanan %1’lik artışın reel enerji ithalatını %3,7 artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Hatta çalışma bulgularından elde edilen sonuçlara göre, uzun dönemde reel efektif döviz kuru endeksinin reel toplam enerji ithalatı üzerindeki etkisi reel GSYH’nın reel toplam enerji ithalatı üzerindeki etkisinden daha güçlüdür. Başaran (2023) 2015-2023 yılları arasında Türkiye’nin günlük elektrik dış ticaret farkları ile TL/ABD Dolar kuru arasında çeşitli analizler gerçekleştirmiştir. Günlük veriler üzerinden kaos verileri oluşturulmuş ve bu veriler üzerinden asimetrik nedensellik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda; Türkiye elektrik dış ticaretinde pozitif farkı yakaladığında değişkenler arasında bir ilişki tespit edilememiştir, ancak negatif farkların olduğu bölümde ise elektrik dış ticareti döviz kurunun nedeni olmaktadır.

VERİ SETİ VE METODOLOJİ

Çalışmanın amacına uygun olarak; günlük elektrik enerjisi üretiminde kullanılmak üzere ithal edilen enerji kaymakları Mw/h birimi ile Enerji Piyasaları İşletme AŞ. (EPIAŞ) Şeffaflık Platformu internet veri tabanından elde edilmiştir. Elektrik üretiminde kullanılan ithal enerji kaynakları; doğal gaz, fuel oil, ithal kömürdür. Söz konusu enerji kaynaklarının yanında doğrudan elektrik ithalatının da hazırlanan endeks verisine ihtiyaç duyulmakta olup, ihraç edilen elektrik enerjisinin de endeksten çıkarılması gerekmektedir. Tüm bu hesaplamalar yapıldıktan sonra ortaya çıkan yıllık enerji ithalat endeksi aşağıdaki gibidir.

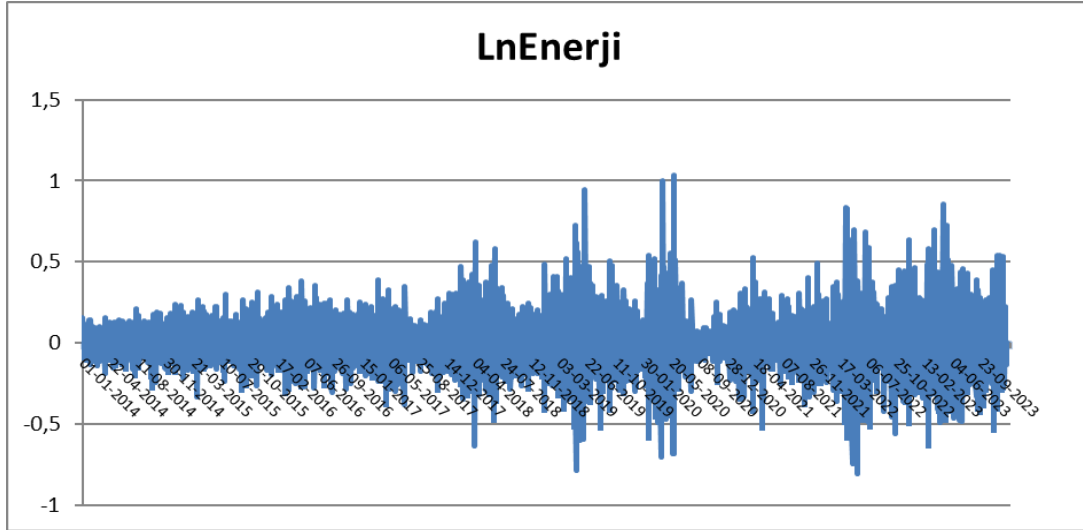
Tablo-1: İthal Edilen Enerji Kaynakları İle Yıllık Elektrik Tüketimi

| | Toplam Enerji Kullanımı (Mw/h) | İthal Enerji Kaynaklarından Kullanılan Enerji (Mw/h) | İthalatın Tüm Enerji Kullanımındaki Yüzdesi |
|------|--------------------------------|--|---|
| 2014 | 229690527.9 | 140429803.9 | 61.14% |
| 2015 | 241216688.7 | 125188558.4 | 51.90% |
| 2016 | 254201830.5 | 125247370.6 | 49.27% |
| 2017 | 273174508.4 | 145513967.7 | 53.27% |
| 2018 | 282571168.6 | 140219016.2 | 49.62% |
| 2019 | 280972677.1 | 102816862.2 | 36.59% |
| 2020 | 282392521.8 | 117384470.5 | 41.57% |
| 2021 | 307392138.9 | 147724058.6 | 48.06% |
| 2022 | 307044261.2 | 127545466.3 | 41.54% |
| 2023 | 306987724.1 | 132548324.5 | 43.18% |

Tablo-1’de görüldüğü üzere Türkiye’nin elektrik enerjisi tüketiminin büyük bir kısmı ithal enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Ancak son dönemlerde kullanılan ithal enerji kaynaklarının oranının düşme trendinde olduğu görülmektedir. 2014 yılında ithal enerji kaynaklarının oranı %61,14 iken 2023 yılında ise %43,18’e gerilemiştir. Araştırmada kullanılan diğer değişken olan ABD Dolar verisi TCMB veri tabanından elde edilmiştir.

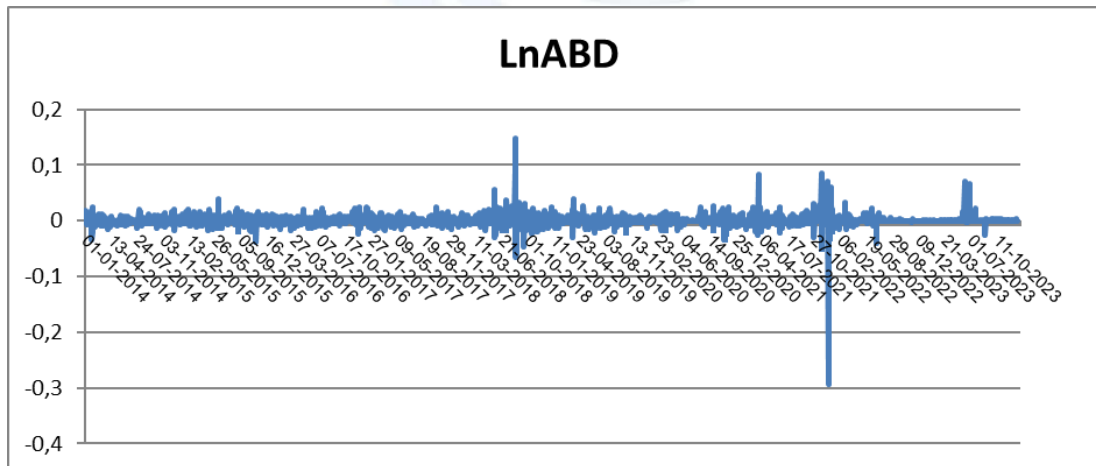
Elde edilen zaman serileri üzerinde gerekli analizleri yapabilmek için zaman serilerinin kendine özgü problemlerini de gidermek gerekmektedir. Zaman serileri ile analiz yapılmasında en çok karşılaşılan problem birim kök problemidir. Bu problemi ortadan kaldırmanın en kolay yolu ise zaman serisinin logaritmik fark yöntemidir. Yapmış olduğumuz bu çalışmada da birim kök probleminden kaçınmak için zaman serilerinin logaritmik farkları ($\ln(P_0/P_1)$) alınarak yeni zaman serileri oluşturulmuştur.

İthal enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin günlük logaritmik farklarını ($\ln\text{Enerji}$) gösteren Grafik-1 aşağıda görüldüğü gibidir.



Grafik-1: Logaritmik Farkı Alınmış İthal Enerji Kaynakları Zaman Serisi

Elde edilen $\ln\text{Enerji}$ zaman serisi incelendiğinde 2017 yılı, 2019, 2021 ve 2022 son çeyreğinde volatilitenin arttığı gözlemlenmektedir. Diğer değişken olan TL/ABD Dolar kur verisinin de enerji verisinde olduğu gibi logaritmik farkları alınarak yeni $\ln\text{ABD}$ endeksi oluşturulmuş olup Grafik-2'de gösterilmiştir.



Grafik-2: Logaritmik Farkı Alınmış ABD Dolar Zaman Serisi

Elde edilen $\ln\text{ABD}$ zaman serisi incelendiğinde 2018, 2020, 2021 ve 2023 yıllarında büyük volatilitenin varlığı kolaylıkla görülmektedir.

Logaritmik farkları alınan zaman serileri üzerinde birim kök sorununun varlığını test etmek amacı ile PP (Philipps & Perron) ve ADF (Augmented Dickey-Fuller) modelleri yeterli görülmüştür. Yapılan birim kök testlerinin sonuçları Tablo-2'de gösterilmektedir:

Tablo-2: Birim Kök Test Sonuçları

| PP Birim Kök Testi | | | |
|--------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | At Level | LnABD | LnEnerji |
| With Constant | t-Statistic | -54.2740 | -95.2848 |
| | Prob. | 0.0001 | 0.0001 |
| | | *** | *** |
| With Constant & Trend | t-Statistic | -54.3140 | -95.2620 |
| | Prob. | 0.0000 | 0.0001 |
| | | *** | *** |
| Without Constant & Trend | t-Statistic | -54.0526 | -95.3053 |
| | Prob. | 0.0001 | 0.0001 |
| | | *** | *** |
| ADF Birim Kök Testi | | | |
| | At Level | USD | TIELEK |
| With Constant | t-Statistic | -54.5480 | -14.6390 |
| | Prob. | 0.0001 | 0.0000 |
| | | *** | *** |
| With Constant & Trend | t-Statistic | -54.5895 | -14.6371 |
| | Prob. | 0.0000 | 0.0000 |
| | | *** | *** |

Tablo-2 sonuçlarından anlaşılacağı üzere elde edilen LnEnerji ve LnABD zaman serilerinde birim kök sorunu bulunmamaktadır. Bu aşamadan sonra çalışma zaman serileri üzerinde nedensellik analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Literatürde bir çok nedensellik analizi mevcuttur. Ancak zaman serilerinin üzerindeki volatilitenin asimetrik olma durumunda hatalı ya da eksik sonuçların ortaya çıkmasını engellemek amacı ile Hatemi-J asimetrik nedensellik analizinin kullanılmasına karar verilmiştir. Hatemi zaman serileri üzerindeki negatif ve pozitif şokları ayrı ayrı hesaplayarak, bir zaman serisi üzerinden negatif ve pozitif olmak üzere iki farklı zaman seri türetilmiştir. Türetilen bu zaman serileri üzerinden Var (Vector Autoregressive) analizi gerçekleştirilerek pozitif ve negatif şoklara bağlı nedensellik sonuçlarına ulaşılmaktadır (Hatemi, 2012; Mert ve Çağlar, 2019; 350). Hatemi_J Asimetrik Nedensellik Analizinin teorik yapısı bir çok çalışmada detaylıca açıklandığı için bu çalışmada modelin detaylı açıklamasına yer verilmeyecektir. Hatemi-J asimetrik nedensellik analizine uyumlu olarak LnEnerji ve LnABD pozitif ve negatif zaman serilerine dönüştürülmüş ve ortaya çıkan dört farklı zaman serisi arasında nedensellik ilişkisi araştırılmıştır. Yapılan analizin sonuçları Tablo-3'de gösterilmiştir.

Tablo-3: Hatemi-J Asimetrik Nedensellik Analiz Sonuçları

| | Wstat | %1 | %5 | %10 |
|-----------------------------|------------|--------|-------|-------|
| LnEnerji (+) ---→LnABD (+) | 26.207*** | 11.817 | 7.891 | 6.218 |
| LnABD (+) ---→ LnEnerji (+) | 49.307 *** | 11.706 | 7.987 | 6.404 |
| LnEnerji (+) ---→ LnABD (-) | 2.863 | 20.406 | 6.385 | 4.264 |
| LnABD (-) ---→ LnEnerji (+) | 1.531 | 7.128 | 1.318 | 0.245 |
| LnEnerji (-) ---→ LnABD (+) | 1.306 | 11.236 | 4.629 | 3.034 |
| LnABD (+) ---→ LnEnerji (-) | 0.529 | 0.025 | 0.000 | 0.000 |
| LnEnerji (-) ---→ LnABD (-) | 1.436 | 9.928 | 4.899 | 3.312 |
| LnABD (-) ---→ LnEnerji (-) | 1.217 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

***: %99 güven aralığında H_0 hipotezi ret, H_1 hipotezi kabul.

Tablo-3 incelendiğinde ithal enerji kullanımını arttıran, döviz kurunda artışı görülmektedir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse elektrik tüketimi için ithal edilen enerji kaynaklarının kullanımının artması ABD Dolar kurunun artmasına neden olmaktadır. Aynı değişkenleri tam tersine okuduğumuzda da benzer nedensellik ilişkisi ortaya çıkmaktadır. Yani döviz kuru arttığında ithal enerji kaynak kullanımında artmaktadır. Yapılan bu tespit ilk aşamada beklentinin dışında ve temel ekonomik modellerle uyumuyor gibi gözüksede literatürde de benzer sonuçlar tespit edilmiştir. Bu durum kur değişikliğinden dolayı ihracaatta avantaj sağlanmasına bağlı olarak üretimin ve dolaylı olarak elektrik tüketiminin artmasından kaynaklanıyor olabilir. Her iki zaman serisinin negatif hareketlerinde değişkenler arasında bir nedensellik ilişkisi bulunamamıştır. Dolayısıyla elektrik tüketiminin azalması ABD Dolarına herhangi bir etki etmemekte, ABD Dolarının değer kaybetmesi de elektrik tüketimi üzerinde etkili olmamaktadır.

SONUÇ

Yapmış olduğumuz bu çalışmada Türkiye'nin elektrik tüketimine bağlı olarak ithal edilen enerji kaynaklarının TL/ABD Dolar kuruna bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Literatür incelendiğinde çeşitli enerji kaynaklarının fiyat değişiminin döviz kuruna olan etkisi yoğun bir şekilde incelenmiştir. Söz konusu çalışmaların Türkiye özelinde olanları incelendiğinde, enerji kaynaklarının (özellikle petrol fiyatları) fiyatlarının döviz kurlarını etkilediği, döviz kurlarının enerji fiyatlarını etkilemediği tespit edilmiştir. Ancak bu iki değişken arasındaki etkileşimin yönü (pozitif veya negatif şoklar) konusunda çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca ithal enerji tüketimi ile döviz kuru arasındaki nedensellik ilişkisini araştıran bir çalışma uluslararası literatürde de tespit edilememiştir. Bu açıdan bakıldığında yapılan bu çalışma üzgün bir yapıya sahiptir.

Yapılan analiz sonucunda; ithal edilen enerji kaynaklarının artış gösterdiği dönemlerde ABD Doları da değer kazanırken, ithal edilen enerji kaynaklarının azaldığı dönemlerde ABD Dolar değerinde değişim tespit edilememiştir. Yapılan bu tespit genel literatürle kısmen tutarlıdır. İthal edilen enerji kaynak

kullanımının azalmasında ABD Dolar kurunun etkilenmemesi; iki değişken arasında asimetric bir ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen diğer bir tespit ise ABD Dolar kurunda yaşanan artış ithal edilen enerji kaynaklarının miktarını da arttırmaktadır. Ortaya çıkan bu sonuç genel literatürle tam uyumlu olmamaktadır. Bu uyumsuz durumun iki nedeni olabileceği tahmin edilmektedir:

- ABD Dolarında yaşanan değer artışının ihracaatta artış yaşanmasına sebep olmuş olabileceği, buna bağlı olarak üretimin ve dolaylı olarak enerji tüketiminin artmasına sebep olmuş olabileceği tahmin edilmektedir.
- Analiz için kullanılan zaman dilimi 2014-2023 yılları arasında günlük logaritmik fark değerlerinden oluşmaktadır. Bu kadar uzun zaman diliminde herhangi bir dönemde farklı nedensellik ilişkileri ortaya çıkmış, fakat oluşturulan model bunları tespit edememiş olabilir.

ABD Dolarının değer kazanması ile ithal edilen enerji kaynaklarının kullanım miktarındaki artışı açıklayabileceğini düşündüğümüz bu iki önermenin daha sonraki çalışmalarda özellikle araştırılması gerekmektedir.

İthal edilen enerji kaynaklarının kullanım miktarındaki azalma durumu incelendiğinde ABD Dolar kuru üzerinde bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca ABD Dolar kurundaki azalma da ithal edilen enerji kullanım miktarına bir etki yapmamıştır.

Elde edilen bu sonuçlara göre; ithal enerji kaynak kullanımındaki artış döviz kuru üzerinde risklerin artmasına sebep olmaktadır. Döviz kur riskini azaltmak için ithal enerji kaynaklarını sabit tutup, yerli enerji kaynaklarının artırılması doğru bir yaklaşım olacaktır.

KAYNAKLAR

Uçan, O. (2015). Enerji Büyüme İlişkinine Ampirik Bir Yaklaşım. *Verimlilik Dergisi*(2), 7-16

Sinan, O.B. (2021). Türkiye’de Yekdem İle Döviz Kuru, Elektrik Tüketimi Arasındaki İlişki (2012.1-2020.2). *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, Cilt.6 Sayı.2. <https://doi.org/10.29106/fesa.829643>

Şişeci, N. G. Sürekçi Yamaçlı, D. (2020). Enerji İthalatı, Döviz Kuru Ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Türkiye İçin Bir Araştırma, *Sinop Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4 (1). <https://doi.org/10.30561/sinopusd.715798>

Bilgin, M. S. (2023). ENERJİ (Petrol) FİYATLARI ve DÖVİZ KURUNUN ENFLASYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİ, TÜRKİYE ÖRNEĞİ: TODA-YAMAMOTO MODELİ ile AMPİRİK BİR ANALİZ (2014-2022). *Sakarya İktisat Dergisi*, 12(1), 1-14.

Lebe, F., & Akbaş, Y. E. (2015). İthal Ham Petrol Fiyatları İle Döviz Kurunun Cari Açık Üzerindeki Etkisi: Türkiye İçin Bir Araştırma. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(2), 170-196.

Kaplan, F., & Aktaş, A. R. (2016). Petrol bağımlısı ülkelerde reel petrol fiyatlarının reel döviz kuruna etkisi. *Business and Economics Research Journal*, 7(2), 103-113.

Soydal, H., Mızrak, Z., & Çetinkaya, M. (2012). MAKRO EKONOMİK AÇIDAN TÜRKİYE’NİN ALTERNATİF ENERJİ İHTİYACININ ÖNEMİ. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (11), 117-137.

Özdemir, A., & Yüksel, F. (2006). Türkiye’de enerji sektörünün ileri ve geri bağlantı etkileri. *Yönetim ve ekonomi dergisi*, 13(2), 1-18.

Acaravcı, A., & Yıldız, T. (2018). Türkiye’nin enerji bağımlılığı. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 4(2), 137-152.

Doğan, İ., & Gürbüz, S. (2017). Enerji fiyatlarının dış ticaret açığı üzerindeki rolü: doğrusal olmayan ilişkinin analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(2), 62-71.

Altıntaş, H. (2013). Türkiye’de petrol fiyatları, ihracat ve reel döviz kuru ilişkisi: ARDL sınır testi yaklaşımı ve dinamik nedensellik analizi. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi* 9(19), 1-30.

Krugman, Paul R. 1980. “Oil and the Dollar.” National Bureau of Economic Research Working Paper 554.

Golub, S. S. (1983), Oil Price and Exchange Rates. *The Economic Journal*, 93 (371), 576–593;

Amano, Robert A., and Simon van Norden. 1998. “Oil Prices and the Rise and Fall of the US Real Exchange Rate.” *Journal of International Money and Finance*, 17(2): 299-316.

Adıgüzel, U., Bayat, T., & Kayhan, S. (2016). Petrol fiyatları ve döviz kuru arasındaki ilişkinin ampirik analizi: Asimetrik nedensellik analizi.

Bloomberg, S. Brock, and Ethan S. Harris. 1995. “The Commodity-Consumer Price Connection: Fact or Fable?” *Federal Reserve Board Economic Policy Review*, October: 21-38

Indjehagopian, Jean Pierre, Frederic Lantz, and Vienne Simon. 2000. “Dynamics of Heating Oil Market Prices in Europe.” *Energy Economics*, 22(2): 225- 252.

Sadorsky, Perry. 2000. “The Empirical Relationship between Energy Futures Prices and Exchange Rates.” *Energy Economics*, 22(2): 253-266.

Zhang, Yue-Jun, Yin Fan, Hsien-Tang Tsai, and Yi-Ming Wei. 2008. “Spillover Effect of US Dollar Exchange Rate on Oil Prices.” *Journal of Policy Modeling*, 30(6): 973-991

Ozsoz, Emre, and Mustapha Akinkunmi. 2011. “An Evaluation of Price Based Determinants of Nigeria’s Real Exchange Rate.” *Social Science Research Network Paper* 1807163.

Şahbaz, A., Adıgüzel, U., Bayat, T., Kayhan, S. 2014. Relationship between oil prices and exchange rates: The case of Romania.

Akram, Q. Farooq. 2009. "Commodity Prices, Interest Rates and the Dollar." *Energy Economics*, 31(6): 838-851.

Hassan, Suleiman, and Mohammad Zahid. 2011. "The Real Exchange Rate of an Oil Exporting Economy: Empirical Evidence from Nigeria." *Forschungsschwerpunkt Internationale Wirtschaft Working Paper 72*.

Başaran, N. (2024). ANLIK ELEKTRİK İTHALAT/İHRACATI'NIN \$ KUR RİSKİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN KAOS VERİLERİ İLE İNCELENMESİ. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (63), 207-221.

Mert, M. ve Çağlar, A.E. (2019). *Eviews ve Gauss Uygulamalı Zaman Serileri Analizi*. Ankara: Detay Yayıncılık

Hatemi-J, A. (2012). Asymmetric Causality Tests With An Application. *Empirical Economics*, 43(1), 447 – 456. DOI 10.1007/s00181-011-0484-x

Erdal, L. ve Karakaya, E. (2012). Enerji Arz Güvenliğini Etkileyen Ekonomik, Siyasi ve Coğrafik Faktörler. *Uludağ Üniversitesi İİBF Dergisi*, 31(1), 107- 136.



144: Elektrik Yüklerinin Makine Öğrenmesi ile Sınıflandırılması**Necip Gözüaçık, Hasan Basri Çetinkaya, Can Murat Gül, Mehmet Cin**

SIEMENS

ÖZET

Enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji, enerji verisi ayrıştırma konusu altında ortaya çıkan önemli başlıklardır. Bu bağlamda, elektrik yüklerini sınıflandırmak, enerji tüketimini farklılaştırmak ve böylece geliştirilmiş enerji verimliliği için tüketici/son kullanıcılara önerilerde bulunmak için atılan ilk adımlardan biri olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmada, bilinen makine öğrenimi algoritmaları ve derin öğrenme algoritmaları, çoklu etiketli sınıflandırmaya bağlı olarak elektrik yükü türlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Veri seti için, güç kalitesi analizörü aracılığıyla ev aletlerinden gerçek veriler toplanmıştır. Bu çalışma, doğruluk açısından en iyi performansın, K-En Yakın Komşu ve AdaBoost algoritmalarıyla elde edildiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Enerji ayrıştırma, enerji verimliliği, makine öğrenmesi, sürdürülebilirlik, yapay zekâ

GİRİŞ

Günümüzde, sürdürülebilir, yenilenebilir ve güvenli kaynaklardan enerji sağlama daha önce hiç olmadığı kadar önem kazanmıştır. Enerjinin bulunabilirliği, coğrafya ve teknolojiye bağlıyken, bu enerjinin verimli kullanımı doğru enerji kullanım analizi ve bu analizin doğru yorumlanmasına, yeni kullanım alışkanlıklarının geliştirilmesine ve daha verimli sistemlerin geliştirilmesine bağlıdır. Bu nedenle, enerji kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesi ve kullanılması oldukça önemlidir [1].

Elektrikli cihazların enerji tüketimini ölçmek için birkaç farklı yöntem bulunmaktadır. Fiş seviyesinde donanım monitörleri, akıllı cihazlar, ev düzeyinde akım sensörleri en yaygın yöntemlerdir. Enerji ayrıştırma yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla en düşük maliyeti, en düşük kurulum çalışmasını ve en yüksek ölçeklenebilirliği sağlamaktadır. Bu da elektrik yükünün sınıflandırılması için enerji ayrıştırma yöntemini diğer seçenekler arasında uygun bir aday yapmaktadır.

Elektrikli cihazların sınıflandırılması, müdahaleci olmayan yük izleme, ev enerji yönetimi ve enerji ayrıştırma gibi konuları ile ilgili birçok çalışma ve makale yayınlanmıştır. Bir çalışmada elastik eşleştirme algoritmalarını kullanan bir enerji ayrıştırma mimarisi sunulmaktadır [2]. Bir makalede ise, enerji ayrıştırma görevinde regresyon için iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan çeşitli makine öğrenimi algoritmaları değerlendirilmektedir.

Özellikle, Girişimsiz Yük İzleme yaklaşımı ele alınmış ve K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor, K-NN), Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine, SVM), Derin Sinir Ağları (Deep Neural Networks, DNN) ve Rastgele Orman (Random Forest) algoritmaları, yedi farklı istatistiksel ve elektriksel özellik seti kullanılarak beş veri kümesi üzerinde değerlendirilmiştir [3].

Diğer bir çalışmada ise, enerji ayrıştırma görevi için WaveNet modellerinin uygulanmasını araştırılmıştır. 20 haneden 2 yıl boyunca toplanan gerçek dünya enerji veri setine dayanarak, WaveNet modellerinin enerji ayrıştırma için literatürde önerilen en son derin öğrenme yöntemlerinden hem hata ölçümleri hem de hesaplama maliyeti açısından daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir [4]. Müdahalesiz Yük İzleme, elektrikli cihazların şebeke üzerinden izlenmesi, tespit edilmesi ve özelliklerine göre sınıflandırılmasını hedefler. Bu yöntem üzerine hibrit algoritma kullanımının başarıyı artırdığına dair çıktılara [5] çalışmada yer verilmiştir.

Bu çalışmada, makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak, enerji analizörü ile toplanan veri setine dayanarak elektrik yüklerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Burada bahsi geçen senaryo, çoklu etiketli sınıflandırma olarak değerlendirilmektedir.

Bu bildirinin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölüm yöntem hakkında detayları vermektedir. Üçüncü bölüm ise bulgulara yer vermektedir. Son bölümde ise tartışma ve sonuçlar üzerine yorumlamalar yapılmıştır.

YÖNTEM

Bu çalışmada önerilen metodoloji, yapay zekâ (makine öğrenmesi ve derin öğrenme) algoritmalarının bir hane halkından toplanan gerçek bir veri seti üzerinde çok etiketli sınıflandırma problemi olarak uygulanmasından oluşmaktadır.

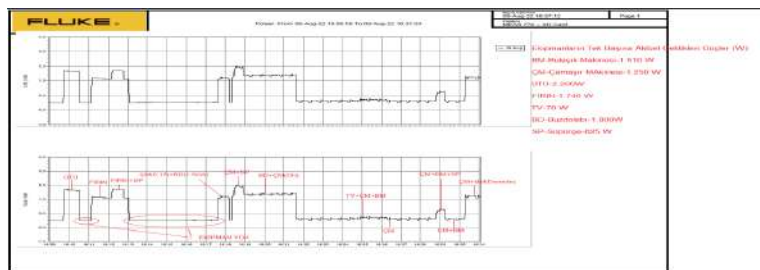
Veri Seti: Veri toplanması için Fluke marka üç fazlı bir güç analizörü kullanılmıştır. Fluke 435 güç kalitesi analizörleri, güç kalitesi ölçümleri için profesyonel ve hassas cihazlardır [6]. Yaklaşık 25 dakikalık bir ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen ölçüm cihazına dair bir görsel Şekil 1'de yer almaktadır.

Ölçüm: Bu işlem sırasında bulaşık makinesi, çamaşır makinesi, buzdolabı, ütü, fırın, elektrikli süpürge ve TV olmak üzere toplam 7 cihaz aktif olarak aralıklarla kullanılmıştır. Voltaj, akım ve güç bilgileri gibi 15 özelliği içeren 1326 adet ölçüm kaydedilmiştir. Ölçüm süresince ortaya çıkan güç tüketiminin değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 1: Enerji Ölçüm Cihazı



Şekil 2: Güç Tüketimi



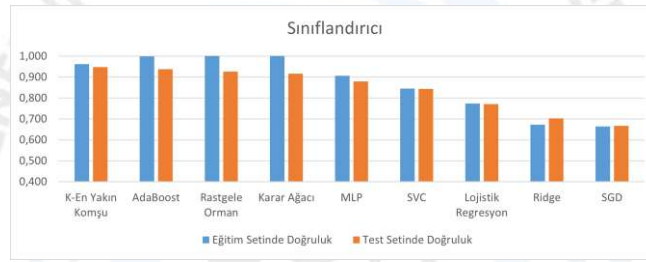
Ön İşleme: Toplanan veriler incelenerek bir ön işleme tabi tutulmuştur. Veri kümesinde hiçbir cihazın etkin olmadığı gözükten/işaretlenen boş satırlar veri kümesinden kaldırılmıştır. "Hedef" sütununun yapay zekâ algoritmaları tarafından kullanılabilmesi adına kategorik veriden sayısal veriye dönüştürme yapılmıştır. Bununla birlikte girdi olarak kullanılacak özellikler için de ölçeklendirme/standardizasyon yapılmıştır.

Model: Yapay Zekâ açısından, dokuz makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır. Bunlar K-En Yakın Komşu, AdaBoost, Rastgele Orman, Karar Ağacı (Decision Tree), Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP), Destek Vektör Sınıflandırıcısı (Support Vector Classifier, SVC), Lojistik Regresyon, Ridge ve Stokastik Gradyan İnişi (Stochastic Gradient Descent, SGD). Veri seti sırasıyla %80 ve %20 olmak üzere Eğitim ve Test kümelerine ayrılmıştır. Bununla birlikte Grid Search mekanizması, K-Fold çapraz doğrulama gibi yöntemler de hiper parametre optimizasyonu için kullanılmıştır. Algoritmaları performanslarına göre değerlendirmek için doğruluk metriği seçilmiştir.

BULGULAR

Önerilen metodoloji, hem Google Colaboratory [7] hem de lokal bilgisayar kaynakları kullanılarak test edilmiştir. Veri setinin işlenmesinde ve yapay zekâ modellerinin kullanılmasında Python programlama dili ve ilgili kütüphaneleri kullanılmıştır. Performans sonuçları ile ilgili karşılaştırma ve grafik Şekil 3'te görülebilir.

Şekil 3: Eğitim ve Test Seti Doğruluk Değerleri



Eğitim setindeki doğruluk metriği açısından en iyi sonuç Rastgele Orman ve Karar Ağacı algoritmalarına aittir. Ancak doğruluk değerleri neredeyse 1'e çok yakın olduğu için eğitim aşamasında aşırı öğrenme meydana geldiği şeklinde değerlendirilebilir. En kötü sonuç ise SGD algoritması için alınır.

Test setindeki doğruluk metriği açısından en iyi sonuç K-NN ve AdaBoost algoritmalarına aittir. Diğer algoritmaların doğruluk değeri ise ağırlıklı olarak 0,8 – 0,9 bandındadır. SGD algoritması için yine en kötü sonuç alınmıştır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmalar sonucunda en yakın komşu (K-NN) yaklaşımının, daha küçük veri seti ve veri örneklerinin belirli bir alt kümesi ile ilgili olarak başarılı görüldüğünü ortaya koymaktadır. Ek olarak, sınıf sayısı (ölçüme dahil edilen farklı elektrik karakteristiğine sahip cihaz sayısı) artarsa K-NN algoritmasının kırılabilir olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte Rastgele Orman ve Karar Ağacı algoritmaları da aşırı öğrenme riski barındırmakla birlikte gelişmiş sonuçlar da sağlamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, veri setinin hacmini artırmak ve enerji tüketimlerini ayrıştırmak için yöntemler geliştirmek planlanmaktadır. Uzun vadeli hedefler için enerji tüketimi hakkında alarm/sinyal üretmek ve enerji verimliliği açısından potansiyel müşterilere cihazların optimum kullanım zamanlarını önermek amaçlanmaktadır. Ayrıca endüstriyel tesislerde enerji verimliliği ve kestirimci bakıma yönelik, enerji dağıtım ve iletim sisteminde ise optimize edilmiş işletim ve olası arıza durumlarını tahmin etme konularında çalışmaların gerçekleştirilmesi de amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Verma, A., Anwar, A., Mahmud, M. A., Ahmed, M., & Kouzani, A. (2021). A comprehensive review on the NILM algorithms for energy disaggregation. arXiv preprint arXiv:2102.12578.
- [2] Schirmer, P. A., Mporas, I., & Paraskevas, M. (2020). Energy disaggregation using elastic matching algorithms. *Entropy*, 22(1), 71.
- [3] Schirmer, P. A., Mporas, I., & Paraskevas, M. (2019, July). Evaluation of regression algorithms and features on the energy disaggregation task. In 2019 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA) (pp. 1-4). IEEE.
- [4] Jiang, J., Kong, Q., Plumbley, M. D., Gilbert, N., Hoogendoorn, M., & Roijers, D. M. (2021). Deep learning-based energy disaggregation and on/off detection of household appliances. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, 15(3), 1-21.
- [5] Gürbüz, F. B., Bayındır, R., & Vadi, S. (2023). Elektrikli Ev Aletlerinde Müdahalesiz Yük İzleme, Sınıflandırma ve Kontrolünün Gerçekleştirilmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11(4), 1209-1222.
- [6] Peuscher, O. F. (2012). Design Proposal for the FLUKE Wireless Touch Power Quality Analyzer (Bachelor's thesis, University of Twente).
- [7] Bisong, E. (2019). Building machine learning and deep learning models on Google cloud platform (pp. 59-64). Berkeley, CA: Apress.

2024

148: Antik Yapılarda Hidrojen Depolama ve Enerji Üretiminin Sürdürülebilir Enerji Çözümleriyle Entegrasyonu

Hüsnügül Tekin, Elifnur Bayraktar Güneş

Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş., Ar-Ge Direktörlüğü, Uluslararası Projeler Yöneticiliği

Mustafa Çelikpençe

EKSİM Holding, Ar-Ge ve Dijital Süreç Yönetimi Direktörlüğü

Heybet Kılıç

Dicle Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik-Enerji

ÖZET

Küresel ısınma ve enerji kaynaklarının tükenmesi, sürdürülebilir çözümler arayışını hızlandırmıştır. Tarihi ve kültürel mirasımızın bir parçası olan yapıların enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak büyük önem taşımaktadır. Özellikle turizm amaçlı kullanılan tarihi yapılar, hem enerji tüketimi hem de karbon emisyonları açısından önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Bu binaların enerji verimliliği genellikle düşük olup, yalıtım eksikliği, eski teknoloji kullanımı ve yapısal değişikliklerin sınırlı olması gibi nedenlerle modern binalara kıyasla daha fazla enerji tüketirler. Bu sorunun çözülmemesi durumunda, enerji israfı ve karbon salınımı devam edecek, çevresel etkiler artacaktır.

Bu çalışmada, Diyarbakır'daki tarihi bir otelde enerji verimliliğini artırmak amacıyla güneş enerjisi ve hidrojen teknolojileri entegre edilerek yenilikçi bir çözüm geliştirilmiştir. Literatürde genellikle modern binalar için önerilen bu teknolojiler, tarihi yapılar için uyarlanmıştır. 120 kWp gücünde bir fotovoltaik (PV) sistemi kurulmuş, fazla enerji elektrolizör ile hidrojene dönüştürülmüş ve bu hidrojen gece veya bulutlu havalarda enerji talebini karşılamak için kullanılmıştır.

Simülasyon sonuçları, bu çözümün enerji verimliliğini artırmada etkili olduğunu ve şebeke bağımlılığını azalttığını göstermektedir. Ancak, çalışmanın tek bir otelde yapılmış olması nedeniyle, sonuçların diğer tarihi binalara genellenebilirliği konusunda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu çalışma, tarihi binalarda sürdürülebilir enerji uygulamaları için önemli bir adım sunmakta ve enerji dönüşüm politikalarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Böylece, tarihi yapılarımızın korunması ile birlikte, enerji verimliliğinin artırılması konusunda da ciddi ilerlemeler kaydedilebilir.

Anahtar Kelimeler: Mikro Şebeke, HOMER Pro, Hidrojen Enerjisi, Sürdürülebilir Enerji, Kültürel Miras

GİRİŞ

Küresel ısınma ve enerji kaynaklarının tükenmesi gibi önemli çevresel sorunlar, tüm dünyada sürdürülebilir çözümlere yönelik arayışları hızlandırmıştır [1]. Bu bağlamda, tarihi ve kültürel mirasımızın bir parçası olan yapıların enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak büyük önem taşımaktadır [2]. Özellikle turizm amaçlı kullanılan tarihi yapılar, hem enerji tüketimi hem de karbon emisyonları açısından önemli bir potansiyel barındırmaktadır [3]. Tarihi otellerin enerji tüketimi, çeşitli nedenlerle modern binalardaki otellere kıyasla daha yüksek olabilir. Örneğin, tarihi binalar genellikle modern binalar kadar etkili yalıtım sistemlerine sahip değildir, bu da ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının daha fazla enerji gerektirmesine yol açabilir. Ayrıca, bu otellerde kullanılan enerji sistemleri genellikle eski teknolojilere dayanır ve modern enerji verimli sistemlere göre daha fazla enerji tüketir. Estetik ve mimari özelliklerin korunması amacıyla tarihi binalarda enerji verimliliğini artıracak yapısal değişiklikler genellikle sınırlı kalır, bu da enerji tüketimini artırabilir. Ayrıca, tarihi otellerdeki aydınlatma ve havalandırma sistemleri, modern standartlara göre daha fazla enerji tüketebilir, çünkü bu binalar doğal ışık ve hava sirkülasyonu açısından da dezavantajlı olabilir. İstatistiksel çalışmalara [4, 5] göre, bina enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler alınırsa, bina sektöründe potansiyel %20-40 enerji tasarrufu sağlanabileceği tahmin edilmektedir. Bu sebeplerle, tarihi otellerin enerji tüketimi modern binalara kıyasla daha fazla olabilir. Hem tarihi dokuyu koruyacak hem de enerji verimliliğini artıracak bir çözüm bulunması büyük önem taşımaktadır.

Tarihi yapıların enerji verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla başlattığımız bu analiz çalışmasında, güneş enerjisi ve hidrojen teknolojilerini bir araya getirerek yenilikçi bir çözüm ürettik. Bu çalışmanın amacı, tarihi otellerimiz için sürdürülebilir bir enerji dönüşümü modeli sunmak ve aynı zamanda Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine katkı sağlamaktır.

Literatür taraması, tarihi yapıların enerji verimliliği konusunda yapılan çalışmalarda genellikle güneş enerjisi, biyokütle ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanıldığını göstermektedir. Özellikle, hidrojen teknolojilerinin tarihi binalarda kullanımı üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Mevcut çalışmalarda, genellikle modern binalarda hidrojen depolama ve kullanımına yönelik çözümler önerilmektedir. Örneğin, Arsalis ve arkadaşları [6], hibrit fotovoltaik-hidrojen yakıt hücresi mikro şebeke sistemlerinin potansiyelini vurgularlarken, Erdemir ve Dincer [7] güneş enerjisi ile çalışan şebeke dışı sistemlerin hidrojen üretimi ve depolama seçenekleriyle entegre edilmesini ele almaktadır. Ancak, bu çalışmaların odağı genellikle yeni binaların enerji ihtiyaçlarıdır.

Tarihi binaların özel yapısına uygun hidrojen entegrasyonu stratejileri konusunda ise daha az çalışma mevcuttur. Bu alanda, Çiçek [8] hidrojen bazlı yeşil binalar için esneklik odaklı enerji yönetimi stratejisi önermektedir. Lokar ve Vrtič [9] ise, konut binalarında fotovoltaik ve batarya depolama sistemleriyle birlikte hidrojen entegrasyonunun tam enerji bağımsızlığı sağlama potansiyelini incelemektedirler. Bu çalışmalar, tarihi yapımızın enerji ihtiyacını karşılamak ve şebekeden bağımsızlığı artırmak için yol gösterici niteliktedir. Mansir ve arkadaşlarının [10] farklı iklim koşullarında sıfır enerjili binalar için hidrojen depolamaya sahip sistemleri incelemesi ise, bizim

çalışmamızın sonuçlarının farklı iklim koşullarına uyarlanabileceğini düşündürmektedir. Guo ve arkadaşları [11] ise akıllı binalarda hidrojen depolama ve güneş panellerinin entegrasyonunu incelemektedir. Liu ve arkadaşları [12, 13] gibi çalışmalar ise binalarda pil ve hidrojenli araç depolama sistemlerini entegre ederek hibrit yenilenebilir enerji uygulamalarını incelemektedir. Son olarak Mohammad ve Iqbal [14] kentsel apartman binaları için hidrojen teknolojisi destekli güneş fotovoltaik mikro şebeke sistemlerini incelemektedir. Ancak, bu çalışmada tarihi yapıların restorasyon maliyetleri ve sürdürülebilirlik hedefleri gibi konular ele alınmamaktadır.

Bu çalışmada ise, bu faktörler de değerlendirilerek tarihi bir oteli merkez alarak, hidrojen teknolojilerinin tarihi dokuya uyumlu bir şekilde entegre edilmesi ve bu sayede enerji verimliliğinin artırılması hedeflenmektedir. Simülasyonda, 120 kWp nominal güce sahip bir fotovoltaik (PV) sistemi planlandı. Bu sistem sayesinde güneş enerjisi doğrudan elektriğe dönüştürülerek otelin enerji ihtiyacının bir kısmı karşılanmaktadır. PV sistemden elde edilen fazla enerji ise 1.000 kg hidrojen depolama kapasitesine sahip bir elektrolizör yardımıyla hidrojene dönüştürülmektedir. Üretilen hidrojen, gece ve bulutlu havalarda enerji talebini karşılamak için yakıt hücresi vasıtasıyla elektriğe çevrilmektedir. Üretilen fazla elektrik enerjisi, elektrolizör yardımıyla hidrojene dönüştürülerek, enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde kullanılmak üzere depolanacaktır [15]. Bu sayede, hem enerji verimliliği artırılabilecek hem de şebeke bağımlılığı azaltılacaktır [16]. Ayrıca, gelişmiş bir enerji yönetim sistemi sayesinde, yapının farklı bölgelerindeki enerji tüketimi optimize edilerek enerji kayıpları minimize edilecektir [17]. Simülasyonun tüm enerji akışını ve ekonomik performansını değerlendirmek için HOMER Pro yazılımı ile detaylı bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda, otelin mevcut enerji tüketim verileri, PV sistemin performansı, hidrojen üretim ve tüketim değerleri gibi çeşitli parametreler dikkate alınmıştır.

Bu çalışma, tarihi binalarda sürdürülebilir enerji uygulamalarının başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. PV sistemi ve hidrojen depolama sistemi gibi teknolojilerin bir araya getirilmesi, enerji sistemlerinin esnekliğini artırmakta ve enerji güvenliğini sağlamaktadır. Ancak, çalışmanın bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Örneğin, bu çalışmada sadece bir otel üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar kullanılmıştır. Bu nedenle, sonuçların diğer tarihi binalara genellenebilirliği konusunda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, farklı iklim koşullarındaki tarihi binalar için bu çözümün etkinliği de incelenebilir. Bu çalışma, tarihi yapıların enerji dönüşümü konusunda yeni politikaların geliştirilmesi için önemli bir temel oluşturabilir. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji verimliliği projelerine yönelik teşviklerin artırılması gibi politikalar bu çalışmanın sonuçlarıyla desteklenebilir.

YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanının Belirlenmesi ve Detaylı Analiz

Bu çalışmada, tarihi bir otelin enerji verimliliğini artırmak amacıyla HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. Otelin mevcut fiziksel özellikleri, enerji tüketim verileri ve iklimsel koşullar, HOMER Pro'da detaylı bir model oluşturmak için kullanılmıştır. HOMER Pro'nun sağladığı optimizasyon araçları

sayesinde, otele en uygun enerji sistemi tasarımı belirlenmiş ve bu tasarımın uzun vadedeki ekonomik ve çevresel etkileri analiz edilmiştir.

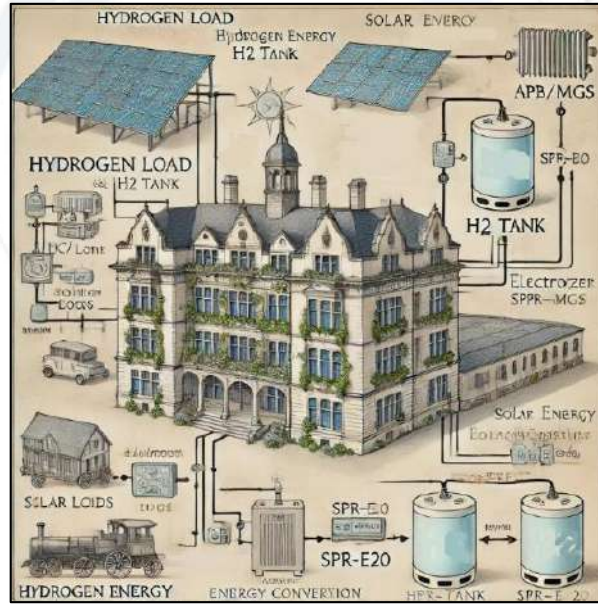
2.2. Veri Toplama

Çalışmada, elde edilen sonuçların güvenilirliği ve doğruluğu için çeşitli veri kaynaklarından yararlanılmıştır. Toplanan veriler, hem mevcut durumun detaylı bir şekilde analiz edilmesini hem de farklı senaryolar altında enerji sistemi performansının simüle edilmesini sağlamıştır.

Enerji Tüketim Verileri: Otelin geçmişe dönük detaylı enerji tüketim verileri, farklı mevsimlerdeki tüketim kalıplarını, günlük ve haftalık tüketim zirvelerini belirlemek için incelenmiştir. Bu veriler, otelin enerji kullanımındaki mevsimsel değişimleri ve farklı kullanım alanlarındaki enerji tüketim yoğunluklarını anlamayı sağlamıştır.

Meteorolojik Veriler: HOMER Pro ile hibrit enerji sistemi simülasyonunda coğrafi ve iklimsel veriler, sistemin başarısı için belirleyici bir rol oynar. Çalışma alanının enlem ve boylam koordinatları, güneş radyasyonu modellerinin oluşturulmasında temel alınır. NASA'nın POWER veritabanından elde edilen güneş radyasyonu verileri, sistemin boyutlandırılması ve enerji üretim potansiyelinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Şekil 1: Sembolik gösterim

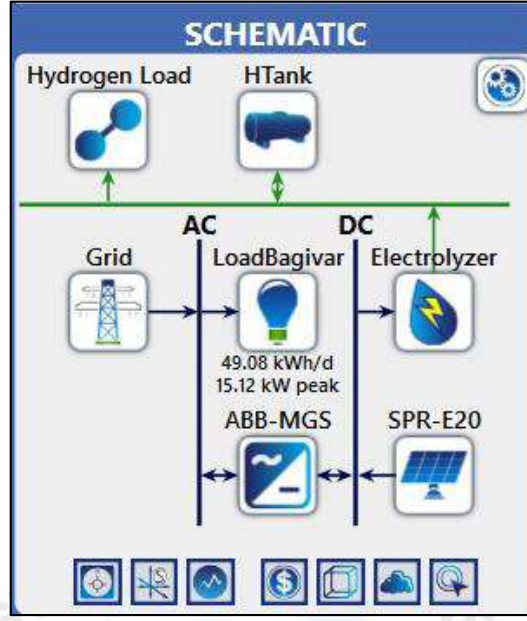


Toplanan tüm bu veriler, Homer Pro yazılımının veri tabanında birleştirilerek detaylı bir bina modeli oluşturulmuştur. Bu sayede, otelin mevcut enerji sistemi ve önerilen yenilikler, Homer Pro'nun güçlü simülasyon yetenekleri sayesinde detaylı bir şekilde modellenmiştir (Şekil 1). Farklı iklim koşulları, enerji fiyatları ve kullanıcı davranışları gibi çeşitli senaryolar altında yapılan simülasyonlar, önerilen çözümlerin enerji tasarrufu potansiyelini ve ekonomik getirisini ortaya koymuştur.

2.3 Sistem Tasarımı

Bu sistem, bir oteli enerjisiyle donatmak için tasarlanmış yenilikçi bir çözümdür. Sistemin temelini, güneş enerjisiyle üretilen elektrik enerjisinin hidrojene dönüştürülmesi ve bu hidrojenin daha sonra enerji ihtiyacı olduğunda kullanılması oluşturur (Şekil 2).

Şekil 2: Homer Pro'da Tasarlanan Mikrogrid Şebeke Yapısı

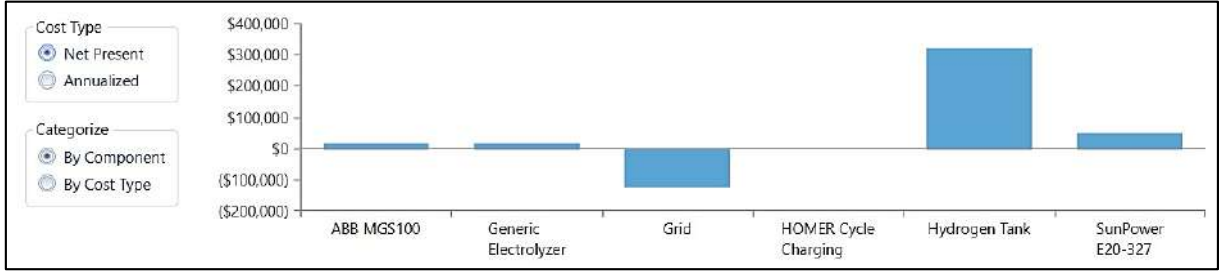


Oluşturulan enerji sistemi modeli, güneş enerjisi sistemi kapasitesi, hidrojen depolama sistemi boyutu, şebeke elektriği kullanımı ve diğer önemli parametreler gibi farklı senaryolar altında detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, yıllık enerji üretimi, tüketimi, ekonomik maliyetler ve karbon emisyonları gibi kritik veriler elde edilmiştir. Yıllık enerji üretimi ve tüketimi verileri, güneş enerji sisteminin otelin enerji ihtiyacını ne kadar karşıladığı ve enerji verimliliği potansiyeli olan alanlar hakkında bilgi sunmuştur. Ekonomik analizler ise farklı senaryoların yatırım, işletme ve toplam sahip olma maliyetlerini karşılaştırarak, en uygun ekonomik çözümü belirlemeye yardımcı olmuştur. Karbon emisyonu hesaplamaları sayesinde ise sistemlerin çevresel etkileri değerlendirilmiş ve en düşük karbon ayak izine sahip seçenek belirlenmiştir. Duyarlılık analizleri ile de sistemin farklı parametrelerdeki değişimlere karşı duyarlılığı ve uzun vadeli performansı incelenerek, daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bu analizler sayesinde, otelin enerji ihtiyacını en uygun şekilde karşılayacak, ekonomik ve çevre dostu bir sistem tasarımı yapılabilmektedir.

2.4.Sistemin Maliyet Özeti

Bu simülasyon, 100 kW kapasiteli bir elektrolizör, 120 kW gücünde SunPower E20-327 güneş panelleri, 60 kW'lık ABB MGS100 enerji yönetim sistemi, 1.000 kg hidrojen depolama kapasitesine sahip bir tank ve şebeke bağlantısıyla çalışan bir sistem üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan detaylı maliyet analizinde, sistemdeki her bir bileşenin sermaye maliyeti, değiştirme maliyeti, işletme ve bakım maliyeti gibi farklı kalemler incelenmiştir. Örneğin, hidrojen tankı için 140.000 dolarlık bir sermaye yatırımı yapılması gerekmiştir. Sistemin toplam maliyeti ise 289.161,49 dolar olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Üretilen enerjinin birim maliyeti (Levelized COE) ise 0,06693 dolar/kWh olarak belirlenmiştir. Yıllık işletme maliyeti ise 1.503,23 dolar olarak hesaplanmıştır. Bu simülasyon sonuçları, sistemin ekonomik performansı hakkında önemli bilgiler vermektedir.

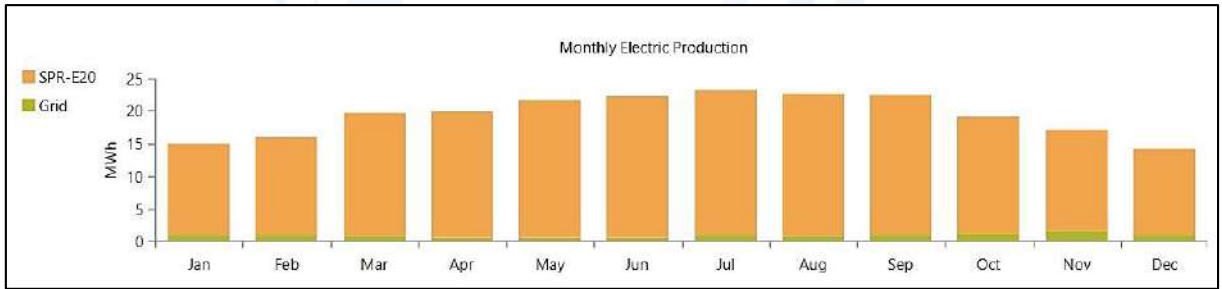
Şekil 3: Maliyet Özeti



2.5. Güneş Enerji Sistemi ve Şebeke

Güneş enerjisi sistemi, tesisin elektrik ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. SunPower E20-327 güneş panelleri, yıllık 222.251 kWh elektrik üretimiyle toplam üretimin %95.3'ünü karşılamaktadır. Bu sayede, tesis şebekeden sadece 10.911 kWh elektrik satın almak zorunda kalmakta ve toplam üretimin %4.68'ini şebeke alımları oluşturmaktadır. Yıllık toplam elektrik üretimi 233.163 kWh olarak gerçekleşmiştir. Üretilen elektriğin bir kısmı tesis içinde tüketilirken (AC birincil yük: 17.914 kWh), fazlası ise 51.169 kWh olmak üzere şebekeye satılmaktadır. Şebekeye net enerji satışı, otelin sadece kendi enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda şebekeye enerji sağlayarak enerji sistemine katkı sağladığını göstermektedir. Bu durum, hem ekonomik faydalar sunmakta hem de enerji güvenliği açısından önemli bir gelişme olarak değerlendirilebilir. Sistem, herhangi bir elektrik eksikliği yaşamadan tüm talebi karşılayabilmekte ve hatta fazlasıyla elektrik üretebilmektedir (Şekil 4).

Şekil 4: Solar ve şebeke üretim grafiği



Bu durum, tesisin yenilenebilir enerji kaynaklarına olan bağımlılığını artırdığını ve çevresel etkilerini azalttığını göstermektedir. Aylık bazda yapılan incelemede, güneş panellerinden üretilen elektrik miktarının yıl boyunca genel olarak stabil kaldığı, ancak Mart, Nisan ve Eylül aylarında daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir.

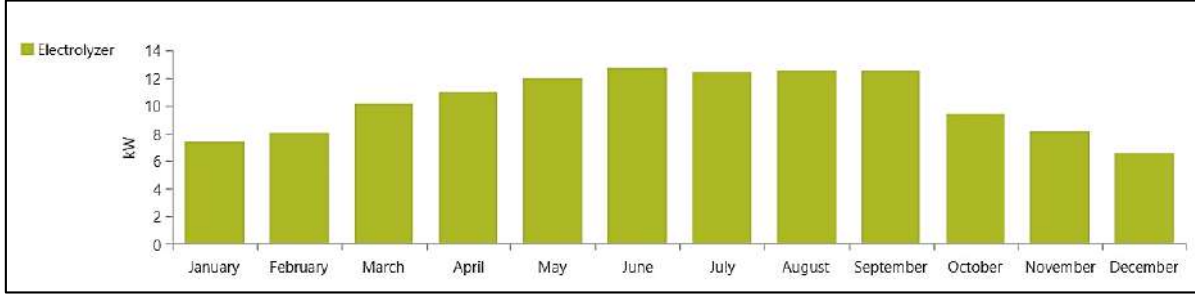
2.6. Hidrojen

Sistemde yıllık toplam 3.744 kg hidrojen üretimi gerçekleştirilmiş olup, bu üretimin tamamı elektrolizör tarafından sağlanmıştır (Şekil 5). Reformer bulunmadığından, bu bileşenden herhangi bir hidrojen üretimi olmamıştır.

Üretilen hidrojenin tamamı, yıllık toplam 4.110 kg olarak belirlenen hidrojen yükünü karşılamak için kullanılmıştır. Aylık bazda yapılan incelemede, hidrojen üretimi yıl boyunca genel olarak dengeli bir seyir izlemiş, ancak Mart, Haziran ve Eylül aylarında hafif artışlar gözlemlenmiştir. Sistemde fazla hidrojen üretimi olmadığından, üretilen tüm hidrojen tüketilmiştir. Hidrojen üretiminin

seviyelendirilmiş maliyeti (LCOH) ise 0.0541 dolar/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer, şebekeden alınan elektriğin seviyelendirilmiş maliyeti olan 0.06693 dolar/kWh'den daha düşüktür. Bu durum, sistemin ekonomik ve çevresel açıdan önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Şekil 5: Aylara Göre Hidrojenden Enerji Eldesi



Üretim ve Tüketim Dengesi: Sistemde üretilen 3.744 kg hidrojenin tamamının tüketilmesi, herhangi bir enerji kaybının olmaması anlamına gelir. Bu, hidrojen üretimi ve tüketimi arasındaki dengeyi gösterir ve sistemin verimliliğini ortaya koyar. Ayrıca, hidrojenin üretim maliyetinin şebekeden alınan enerjiye göre daha düşük olması, sistemin ekonomik olarak avantajlı olduğunu kanıtlar.

Yenilenebilir Enerji Kullanımı: Sistemde kullanılan 120 kW'lık SunPower E20-327 güneş panelleri, hidrojen üretimi için gerekli enerjinin büyük bir kısmını sağlamaktadır. Güneş enerjisinin düşük işletme maliyetleri, hidrojenin LCOH'sini düşürmede önemli bir rol oynamıştır. Yenilenebilir kaynakların kullanımı, hidrojen üretiminde daha düşük marjinal maliyetlerle sonuçlanırken, şebekeden alınan elektrik genellikle daha yüksek maliyetli ve karbon yoğunluğunda kaynaklardan sağlandığı için daha pahalıdır.

Gelecek Potansiyeli: Bu sonuç, hidrojen teknolojilerinin gelecekte daha yaygın olarak benimsenmesine ve daha düşük maliyetli yeşil hidrojen üretim projelerinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği öngörüsünü doğurur. Özellikle şebeke elektriğinin maliyetlerinin artması durumunda, hidrojen üretimi daha da rekabetçi hale gelebilir.

2.7. Elektrolizör Performansı

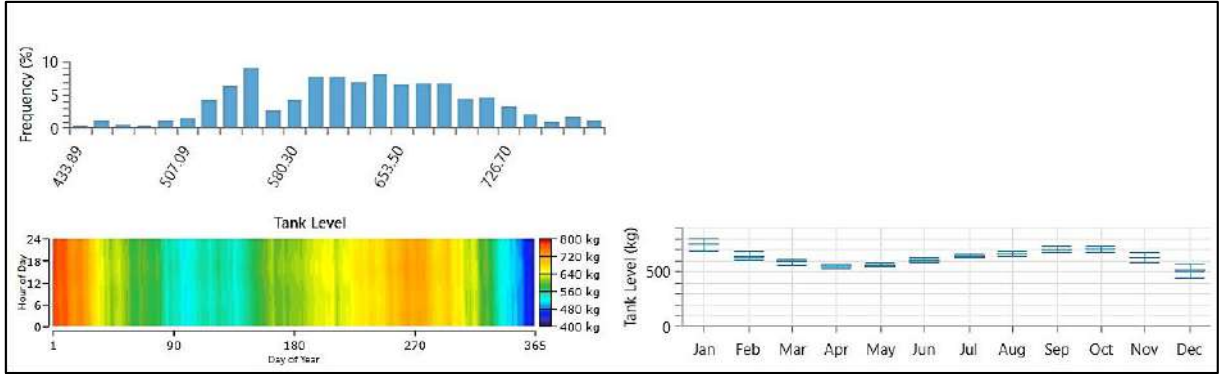
Elektrolizör, 100 kW'lık nominal bir kapasiteye sahip olup, ortalama 18.7 kW ile çalışmıştır. Yıllık toplam enerji girdisi 164.080 kWh olarak hesaplanmış, bu da sistemin önemli bir enerji tüketimine sahip olduğunu gösterir. Hidrojen üretimi tarafında, ortalama 0.427 kg/saat olan üretim hızı, yıllık toplam 3.744 kg hidrojen üretimine karşılık gelmektedir. Spesifik enerji tüketiminin 43.8 kWh/kg olarak belirlenmesi, bir kilogram hidrojen üretmek için oldukça yüksek bir enerji harcadığını gösterir. Bu değer, elektrolizörün enerji verimliliği konusunda iyileştirme potansiyeli olduğunu düşündürmektedir. Yüksek enerji tüketimi dönemlerinde, elektrolizörün daha fazla hidrojen ürettiği söylenebilir.

2.8. Hidrojen Depolama

Hidrojen deposu, 1000 kg hidrojen depolama kapasitesine ve 33.333 kWh enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu, sistemin uzun süreli enerji depolama ihtiyacını karşılayabilecek yeterlilikte olduğunu gösterir. 16.300 saatlik otonomi süresi ise, sistemin kesintisiz çalışabilme potansiyelini vurgulamaktadır. Yıl başında depoda 800 kg hidrojen bulunurken, yıl sonunda bu miktar 434 kg'a

düşmüştür. Bu durum, hidrojenin yıl boyunca sistemde tüketildiğini ve deponun belirli bir seviyede tutulduğunu gösterir (Şekil 6).

Şekil 6: Hidrojen Tankı Verileri



Sonuç olarak, hidrojen depolama sistemi, simülasyon sonuçlarına göre tasarlandığı amaç doğrultusunda başarılı bir performans sergilemiştir. Yıl boyunca hidrojen seviyelerindeki değişimler, sistemin doğru bir şekilde yönetildiğini ve hidrojen tüketiminin kontrol altında olduğunu göstermektedir.

BULGULAR

Bu simülasyon, mevcut teknolojilerle elde edilen bir senaryoyu yansıtmaktadır. Ancak hidrojen teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, sistemin maliyetlerini düşürerek verimliliğini artırabilir. Farklı güneş paneli teknolojileri, elektrolizör tipleri ve hidrojen depolama yöntemlerinin kullanıldığı farklı senaryoların incelenmesi, optimum sistem tasarımı belirlemek için önemli olacaktır. Ayrıca, yaşam döngüsü maliyeti analizi gibi daha kapsamlı bir analiz ile sistemin çevresel etkileri de dikkate alınarak daha doğru bir değerlendirme yapılabilir. Bu tür hidrojen enerji sistemleri, sadece oteller değil, aynı zamanda endüstriyel tesisler, uzak bölgelerdeki enerji ihtiyacının karşılanması ve elektrik şebekesinin dengelemesi gibi birçok farklı alanda kullanılabilir. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği akıllı şehir projelerinde bu sistemlerin önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

Enerji Üretim ve Tüketimi: Sistem, yıllık toplam 233.163 kWh elektrik üretme kapasitesine sahiptir. Üretimin %95.3'ü güneş panellerinden elde edilmekte ve bu sayede otelin elektrik ihtiyacının %84.2'si yenilenebilir kaynaklarla karşılanmaktadır. Aylık bazda en yüksek üretim Mart ayında gerçekleşmektedir.

Hidrojen Üretim ve Kullanımı: Elektrolizör, yıllık 3.744 kg hidrojen üretmektedir. Üretilen hidrojen, enerji depolama amacıyla kullanılmaktadır. Hidrojen depolama tankının başlangıçtaki 800 kg hidrojen miktarı, yıl sonunda 434 kg'a düşmüştür. Bu da sistemin enerji depolama kapasitesinin 33.333 kWh ve otonomi süresinin 16.300 saat olduğunu göstermektedir.

Sistem Maliyetleri ve Ekonomik Değerlendirme: Sistemin toplam kurulum maliyeti 289.161.50 USD olarak hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji üretim maliyeti (LCOE) 0.06693 USD/kWh iken, hidrojen üretim maliyeti (LCOH) 0.0541 USD/kg olarak belirlenmiştir. Bu da hidrojen depolamanın ekonomik açıdan daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Sistem Performansı ve Karbon Emisyonları: Sistemin yıllık karbon emisyonları 6.896 kg CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu düşük emisyon değeri, sistemin çevresel sürdürülebilirliğini desteklemektedir. İnverterin yıllık ortalama çıkış gücü 6.64 kW, maksimum çıkış gücü ise 52.4 kW olarak belirlenmiştir.

Yenilenebilir Enerji Kullanımının Etkinliği Simülasyon sonuçları, otelin enerji ihtiyacının %100'ünün yenilenebilir kaynaklarla karşılanabileceğini göstermektedir. Bu durum, şebeke bağımlılığını azaltarak enerji güvenliğini artırmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi üretimindeki dalgalanmalar, hidrojen depolama sistemi sayesinde dengelenerek sistemin esnekliği artırılmıştır.

Sonuç olarak, Diyarbakır'daki tarihi otelde uygulanan hibrit enerji sistemi, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve enerji bağımsızlığı açısından başarılı bir örnek teşkil etmektedir. Bu sistem, hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Diyarbakır'daki tarihi otelin enerji verimliliğini artırmak amacıyla gerçekleştirilen bu proje, yenilenebilir enerji sistemlerinin tarihi yapılara uygulanabilirliği konusunda önemli bir kilometre taşıdır. Proje kapsamında yapılan simülasyonlar ve elde edilen veriler, bu tür sistemlerin hem teknik hem de ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

4.1. Güneş Enerjisi Sisteminin Performansı:

Simülasyon sonuçlarına göre, güneş enerjisi sistemi otelin yıllık elektrik ihtiyacının %95,3'ünü karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu da yıllık yaklaşık 222.251 kWh'lık bir enerji üretimine denk gelmektedir. Sistemin bu kadar yüksek bir verimlilik göstermesi, hem güneş enerjisi teknolojilerindeki gelişmelere hem de otelin coğrafi konumunun güneşlenme potansiyelinin yüksek olmasına bağlanabilir. Ayrıca, sistemin şebekeden satın aldığı enerji miktarının oldukça düşük (yıllık 10.911 kWh) ve şebekeye sattığı enerji miktarının ise oldukça yüksek (yıllık 51.169 kWh) olması, sistemin enerji üretim fazlasını etkili bir şekilde değerlendirdiğini göstermektedir.

4.2. Hidrojen Depolama Sisteminin Rolü:

Hidrojen depolama sistemi, güneş enerjisi üretimindeki dalgalanmaları dengelemek ve enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Yıllık 3.744 kg hidrojen üretimi ve 4.110 kg hidrojen tüketimi ile sistem, enerji depolama konusunda oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır. Düşük seviyeli hidrojen maliyeti (LCOH: 0,0541 \$/kg) ve düşük karbon emisyonları (6.896 kg CO₂/yıl) ise sistemin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini desteklemektedir.

4.3. Ekonomik Analiz:

Projenin ekonomik analiz sonuçları, sistemin uzun vadede karlılık sağlayacağını göstermektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin yatırım maliyetleri her geçen gün düşmekte olup, bu da sistemin geri ödeme süresini kısaltmaktadır. Ayrıca, hidrojen depolama sistemi sayesinde enerji maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır.

4.4. Çevresel Etkiler:

Proje, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli kazanımlar sağlamaktadır. Güneş enerjisi ve hidrojen enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarının kullanılması, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bu proje, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek diğer sektörlerde de benzer uygulamaların yaygınlaşmasına öncülük edebilir.

Sonuç olarak, Diyarbakır'daki tarihi otel projesi, tarihi yapıların enerji verimliliğini artırmak için yenilikçi çözümler sunan başarılı bir örnektir. Bu proje, hem teknik hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir model olarak diğer tarihi yapılara da ilham verebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ali Q. Al-Shetwi, "Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges, Science of The Total Environment", Volume 822, 2022, 153645, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645>.
- [2] Gillian Foster, "Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts", Resources, Conservation and Recycling, Volume 152, 2020, 104507, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507>.
- [3] Atmaca, N., Atmaca, A., & Özçetin, A. İ., "The impacts of restoration and reconstruction of a heritage building on life cycle energy consumption and related carbon dioxide emissions", 2021, Energy and Buildings, 253, 111507, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111507>.
- [4] Taehoon Hong, Choongwan Koo, Jimin Kim, Minhyun Lee, Kwangbok Jeong, "A review on sustainable construction management strategies for monitoring, diagnosing, and retrofitting the building's dynamic energy performance: Focused on the operation and maintenance phase", Applied Energy, Volume 155, 2015, Pages 671-707, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.043>.
- [5] Surapong Chirarattananon, Juntakan Taveekun, "An OTTV-based energy estimation model for commercial buildings in Thailand", Energy and Buildings, Volume 36, Issue 7, 2004, Pages 680-689, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.035>.
- [6] Arsalis A, Georghiou GE, Papanastasiou P., "Recent Research Progress in Hybrid Photovoltaic-Regenerative Hydrogen Fuel Cell Microgrid Systems", Energies, 2022, 15(10):3512, <https://doi.org/10.3390/en15103512>.
- [7] Erdemir D, Dincer I., "Development and comparative evaluation of integrated solar-driven off-grid energy systems with hydrogen production and storage options for sustainable buildings", Energy Storage, 2023, 5(6):e497, <https://doi:10.1002/est2.497>.

- [8] Alper Çiçek, "A novel resilience-oriented energy management strategy for hydrogen-based green buildings", *Journal of Cleaner Production*, Volume 470, 2024, 143297, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143297>.
- [9] Jan Lokar, Peter Vrtič, "The potential for integration of hydrogen for complete energy self-sufficiency in residential buildings with photovoltaic and battery storage systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 60, 2020, Pages 34566-34578, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.170>.
- [10] Ibrahim B. Mansir, E.H. Bani Hani, Hamdi Ayed, Chidiebere Diyoke, "Dynamic simulation of hydrogen-based zero energy buildings with hydrogen energy storage for various climate conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 62, 2022, Pages 26501-26514, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.213>.
- [11] Qun Guo, Yuxuan Chen, Yunbao Xu, Sayyad Nojavan, Hasan Bagherzadeh, Esmaeil Valipour, "Integration of hydrogen storage system and solar panels in smart buildings", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 44, 2022, Pages 19237-19251, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.085>.
- [12] Sheikh Suhail Mohammad, Sheikh Javed Iqbal, "Hydrogen technology supported solar photovoltaic-based microgrid for urban apartment buildings: Techno-economic analysis and optimal design", *Energy Conversion and Management*, Volume 302, 2024, 118146, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118146>.
- [13] Jia Liu, Xi Chen, Hongxing Yang, Kui Shan, "Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage", *Applied Energy*, Volume 290, 2021, 116733, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116733>.
- [14] Jia Liu, Sunliang Cao, Xi Chen, Hongxing Yang, Jinqing Peng, "Energy planning of renewable applications in high-rise residential buildings integrating battery and hydrogen vehicle storage", *Applied Energy*, Volume 281, 2021, 116038, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116038>.
- [15] Mayyas, A., Wei, M., & Levis, G., "Hydrogen as a long-term, large-scale energy storage solution when coupled with renewable energy sources or grids with dynamic electricity pricing schemes", 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(33), 16311-16325, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.163>.
- [16] Thakkar, N., & Paliwal, P., "Hydrogen storage based micro-grid: A comprehensive review on technology, energy management and planning techniques", 2023, *International Journal of Green Energy*, 20(4), 445-463, <https://doi.org/10.1080/15435075.2022.2049797>.
- [17] HassanzadehFard, H., Tooryan, F., Collins, E. R., Jin, S., & Ramezani, B., "Design and optimum energy management of a hybrid renewable energy system based on efficient various hydrogen production", 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(55), 30113-30128., <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.040>.

149: Yenilenebilir Enerji Olarak Fotovoltaik Panellerden Elektrikli Araç Şarjı ve Gelecek**Projeksiyonları****İbrahim Öz**

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

Mehmet Bulut

Elektrik Üretim A.Ş Genel Müdürlüğü

ÖZET

Elektrikli araçların (EA) ulaşımında kullanılmasıyla ve yaygınlaşması ile karbon salınımının azaltılmasına ciddi şekilde katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. EA'ların yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ile Fotovoltaik (PV) sistemlerle şarj edilmesi mümkündür. Bu çalışmada, EA'lar için ihtiyaç duyulan PV alanı hesaplanmış, verim analizi ve gelecek projeksiyonları yapılmıştır. PV panellerde güneş ışınımını elektrik enerjisine çevirme verimi ortalama %20 civarında olup bu değer diğer katmanlarda eklenen performans verimi ile dahada aşağılara düşmektedir. Türkiye'de TÜİK verilerine göre günlük ortalama 37,6 km yol kat eden ve 6,67 kWh enerji kullanan bir EA için ortalama 9,10 m² PV panele ihtiyaç duyulmaktadır. EA gelecek projeksiyonlarında yüksek senaryoya göre 2030 yılında EA sayısı 1.679.600 ve 2035 yılında 4.214.273 adet olacaktır. Bu EA'lar yıllık toplamda 3,56 TWh ve 9,39 TWh enerjiye ihtiyaç duyacaktır. Bu enerjinin tamamının PV ile karşılanması durumunda bugünkü teknoloji ve güncel ışınım verileri çerçevesinde 2030 yılında 15,32 km² ve 2035 yılında 38,43 km² güneş hücresi gerekmektedir. PV teknolojilerindeki gelişmeler gerekli alanın azalmasını sağlayacaktır. EA batarya ağırlığı toplam araç ağırlığı içinde yüksek bir oran tutmakta ve şarj tipi ve buna paralel olarak şarj süresinde yaygınlaşma sürecinde etkili olmaktadır. EA'ların mevcut fosil yakıtlı araçlarla menzil ve dolun/şarj süresi yönünde eşdeğer duruma gelebilmesi için batarya teknolojilerinin 10 kata kadar iyileştirilmesine şarj süresinin 10 dk'nın altına düşürecek teknolojik gelişime ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: elektrikli araç, PV teknolojileri, EA batarya şarj, yenilenebilir enerji, ges

GİRİŞ

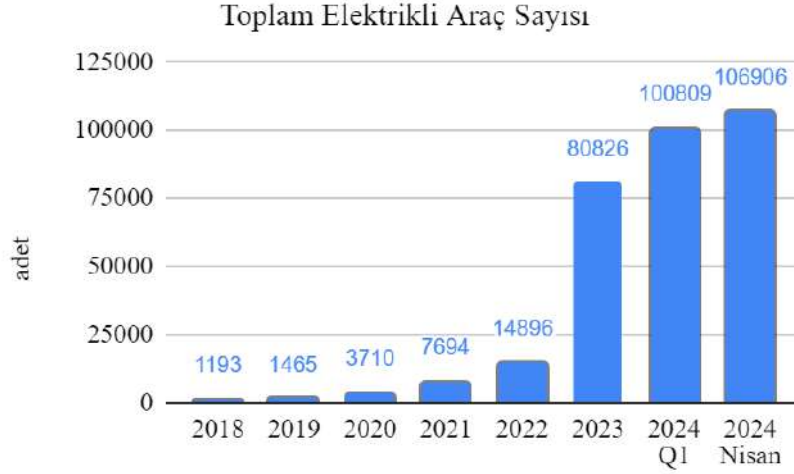
Ulaşım sektöründe kullanılan fosil yakıtlı içten yanmalı motorlar küresel karbon salınımının ana kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Küresel ısınma ve hava kirliliği gibi çevresel endişeler arttıkça, alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç daha da önem kazanmaktadır. Elektrikli araçlara geçiş ile elektrik kaynağının üretim kaynağına bağlı olarak sera gazı salınımının düşürüleceği ve fosil yakıt kaynaklarına bağımlılığın azalacağı değerlendirilmektedir. Bu nedenle elektrikli araçların kullanımı son yıllarda büyük ilgi görmekte, özellikle evden şarj edilmesi başta olmak üzere alternatif şarj yöntemleri ve bu araçların elektrik üretimine ve dağıtım şebekesine etkileri üzerine çalışmalar yapılmaktadır [1].

Elektrikli araç ekosistemi hızla gelişmekte ve elektrikli araçlar gündelik hayatta daha çok görülmektedir. Elektrikli araçlar, otonom sürüş, çevre dostu ve enerji verimliliği sağlayan

özellikleriyle birlikte diğer ulaşım çözümlerine kıyasla öne çıkmakta ve toplumsal olarak benimsenmektedir [2].

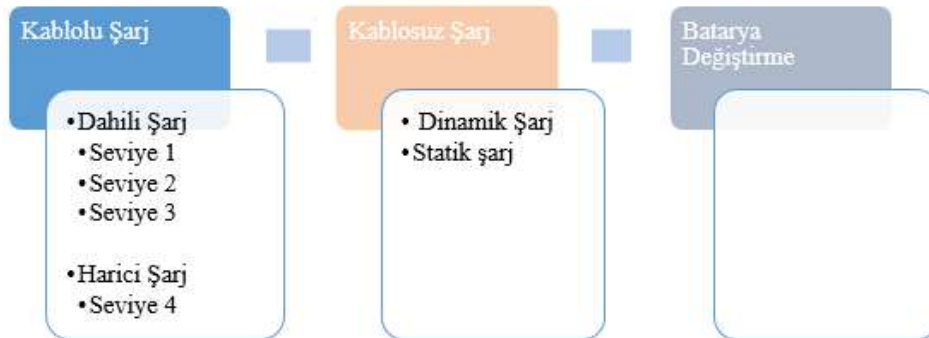
Türkiye’de EA ilgi oldukça artmış durumdadır. Şekil 1’de görüldüğü gibi 2024 yılı Nisan ayı sonu itibarıyla EA sayısı 105000’i aşmış durumdadır.

Şekil 1. Türkiye EA Sayısı 2018-2024 Nisan Arası



Elektrikli araçlar Şekil 2’de görüldüğü gibi temassız (kablolu) veya temaslı (kablo) ile şarj tipini AC veya DC ve güç aktarımını dolayısıyla şarj süresini belirlemektedir. Sadece kablolu edilebilmektedir. Şarj yöntemleri kendi içinde alt şarj tiplerine ayrılmaktadır. Şarj tipleri soket şarj konusunda değil aynı zamanda kablolu şarj teknolojilerinde de gelişmeler yaşanmaktadır. Gün geçtikçe daha hızlı ve güvenli şarj teknolojileri hayatımıza girmektedir. Kablolu şarj teknolojisinin de gelişmesi ile daha pratik ve hızlı bir şarj imkânı meydana gelecektir. Daha kısa sürede şarj ile daha uzun menzil imkânı tanıyan sistemler geliştirilmektedir [3]. EA bataryasını değiştirmede bir başka şarj yöntemi olup şarj maksatlı değiştirme günümüzde batarya ağırlığından ve işçilikten dolayı pratikte uygulanamamaktadır.

Şekil 2. EA Şarj Yöntemleri



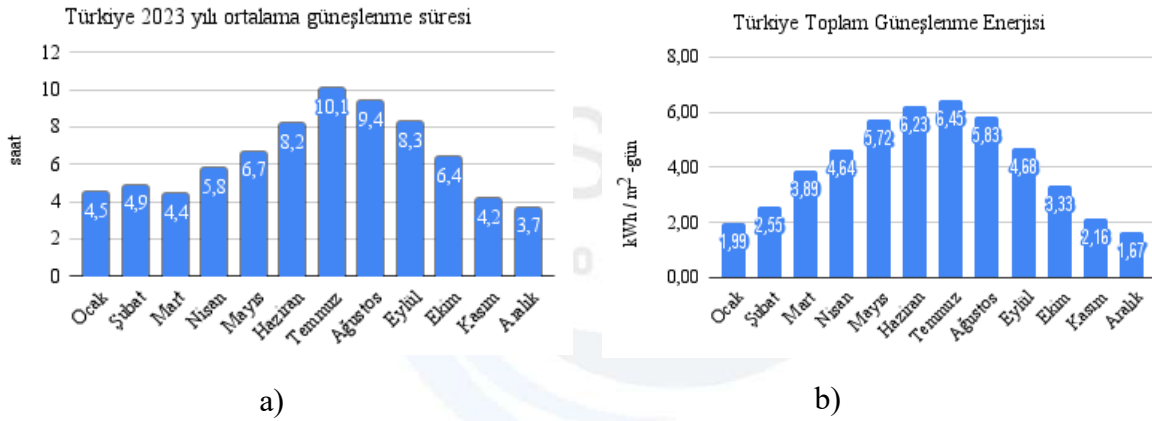
Tüm bu olumlu gelişmelere rağmen elektrikli araçların yeni teknoloji olmasından kaynaklı geliştirilmesi gereken alanları mevcuttur [4].

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi kullanarak elektrikli araçların şarj edilmesi ve bu şarj için kabul edilen bazı teknik parametreler çerçevesinde gerekli panel boyutları incelenmiştir.

1.1 Güneş Enerji Sisteminden (GES) Şarj

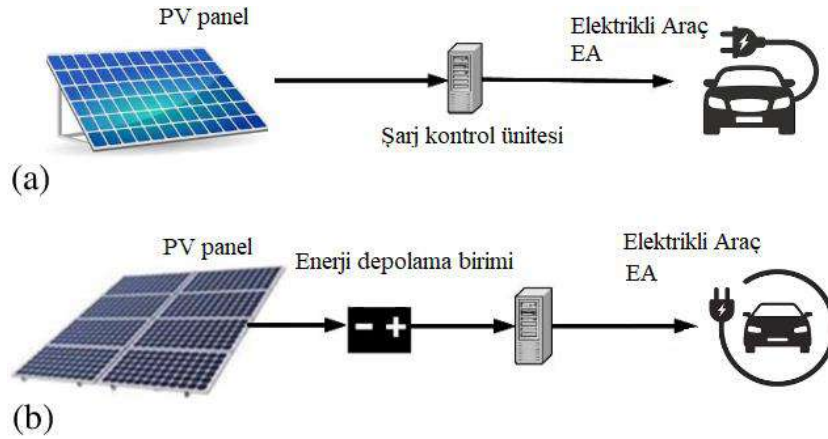
Yenilenebilir enerji olarak güneş ışınımından üretilen enerji birçok alanda kullanılmaktadır. Enerji Bakanlığı Türkiye Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre Türkiye ortalama günlük 4,18 kW saat/m² -gün ışıma ve 7,5 saat güneşlenmeye sahiptir [5]. Şekil 3'te Türkiye'nin aylara göre günlük ışıma verileri görülmektedir [6]. Tahmin edileceği gibi yaz aylarında daha yüksek ışıma değerleri elde edilirken kış aylarında daha düşük değerlerle karşılaşmaktadır.

Şekil 3. a) Türkiye günlük ortalama ışıma değerleri b) Türkiye'nin 2023 yılına ait günlük saat olarak güneşlenme süresi



Elektrikli araç bataryaları şarj edilirken bir çok kaynak kullanılabilir. EA bataryaları şebekeden şarj edilebildiği gibi fotovoltaik sistemler kullanılarak güne ışımaından elde edilen enerji ile de şarj edilebilir. Şekil 4.a)'da görüldüğü gibi yenilenebilir enerji kaynağı olan Güneş'ten alınan ışıma paneller vasıtasıyla, elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte ve direk olarak EA şarjında kullanılmaktadır. Burada EA şarj edilirken güneş ışımaının aktif olması gerekmektedir. Şekil 4.b)'de ise güneş ışımaından elde edilen enerji PV sistemi içindeki depolama biriminde bataryaları şarj etmekte daha sonra bu bataryadan EA bataryası şarj edilmektedir. Bu durumda EA şarj edilirken güneş ışımaının olmasına gerek duyulmamaktadır. Sistemler elektrik dağıtım şebekesine bağlı olarak veya şebekeden bağımsız (off-grid) olarak çalışabilmektedir.

Şekil 4. a) Güneş panelinden EA'nın doğrudan şarj edilmesi b) EA'nın PV'den elde edilen enerjinin depolanması ve depolama sistemi üzerinden şarj edilmesi



Yenilenebilir enerji sistemlerinin elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılmasıyla karbon salınımı azalmakta ve sürdürülebilir bir çevre için katkı sağlanmaktadır. İlave olarak maliyet avantajı ve elektrik dağıtım sisteminde yük azalması sağlamaktadır. [7-11]

Güneş enerji sistemleri hava şartlarına bağlı ve mevsimsel etkilere açık olduğundan talep edildiği anda enerji sunulamamaktadır. Ayrıca GES sistemleri ile yapılan şarj istasyonlarında uygun yer ve yeterli alan olmaması problemleri görülebilmektedir. Bunlara ilave olarak fotovoltaik sistemler mevcut elektrik dağıtım şebekesi ile entegre çalıştığında, dağıtım sistemi fotovoltaik sistemler mevcut elektrik dağıtım şebekesi ile entegre çalıştığında, dağıtım sistemi üzerinde kalite sorunlarına neden olmaktadır [12-16]

1.2 EA Bataryaları

EA'ların bataryaları dış kaynaklardan şarj edilir. Şarj işlemi şarj ekipmanları veya istasyonları aracılığı ile gerçekleştirilir. Bataryaların şarj şekli ve sıklığı gibi faktörler, batarya dayanımını ve performansını etkiler. Genel olarak iki tip; alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) şarj yöntemi kullanılır. Bu alanda yaygınlaşmanın hızlanması için şarj standartları geliştirilmiştir. Bataryaları belirli standartlara göre şarj edilmektedir. En yaygın standartlar; SAE standartları (Society of Automotive Engineers), IEC (International Electromechanical Commission) Standartları ve CHAdeMO standartlarıdır [17].

EA bataryaları şarj soketi tipi şarj süresini ve tarifesini etkilemektedir. Bataryaların ağırlıkları ise EA araç kütlesi içimde önemli bir oran tutmakta ve geliştirilmesi gereken en önemli teknolojik alanların başında gelmektedir.[7].

YÖNTEM

Bu çalışmada, TÜİK verilerine göre bir otomobilin yıllık ortalama kullanımı 13325 km olarak alınmıştır [1]. Ayrıca otomobil distribütörleri derneği ve TOGG verileri dikkate alınarak bir elektrikli otomobilin 100 km'de 18 kWh'lik enerji tükettiği kabul edilmiştir. Bu ön kabuller

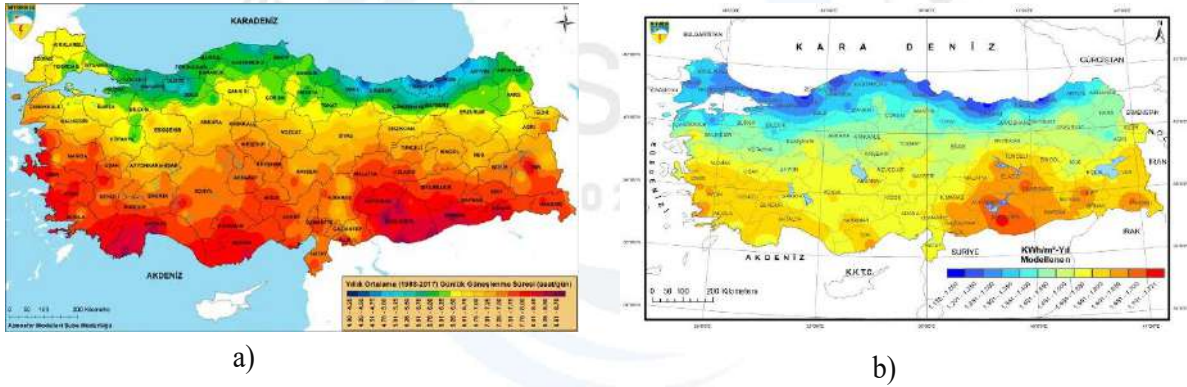
çerçevesinde bir elektrikli otomobilin ortalama olarak ayda 1110 km ve bir günde 37 km mesafe kat ettiği kabulüne göre analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Bir elektrikli otomobilin ortalama kullanımda ihtiyaç duyduğu yıllık enerji miktarı yaklaşık 2400 kWh, aylık 200 kWh, ve günlük 6,67 kWh olarak hesaplanmıştır.

EA şarjı için ihtiyaç duyulan enerjinin yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş ışınımında elde edilmesi ve fotovoltaik sistemler kullanılması üzerine çalışılmıştır. Güneş paneli boyutlandırması Türkiye geneli, Ankara, Edirne ve Antalya için ayrı ayrı yapılmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün vermiş olduğu güneşlenme süreleri ve ışınım değerleri süreleri dikkate alınmıştır. Buna göre Türkiye geneli, Ankara, Edirne ve Antalya için günlük ortalama güneş ışınım değeri, sırasıyla 4,18 kWh/saat, 3,8 kWh/saat ve 2,8 kWh/saat ve 4,7 kWh/saat olarak hesaplamaya dahil edilmiştir. [2, 5, 6].

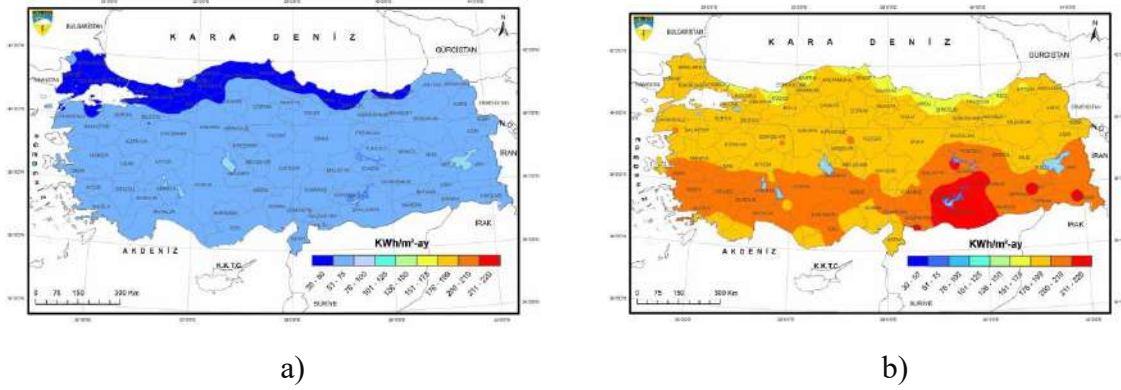
Şekil 5.a)'da Türkiye güneşlenme potansiyeli görülmektedir. Şekil 5. b) de ise Türkiye'nin uzun yıllar modellenen yıllık toplam güneş ışınımı kW saat/gün olarak görülmektedir [6].

Şekil 5. a) Türkiye güneşlenme potansiyeli, b) Türkiye uzun yıllar modellenen yıllık toplam güneş ışınımı



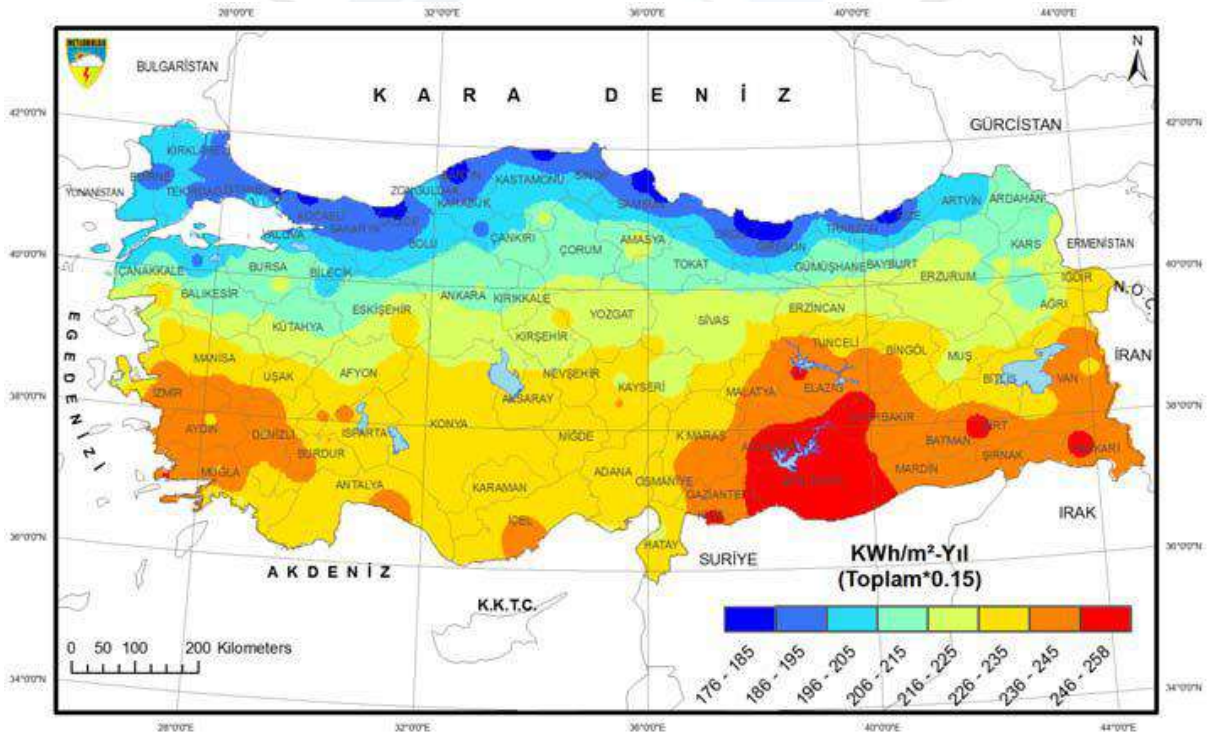
Bilindiği gibi mevsimsel etkiden dolayı aylara göre güneşlenme süresi ve güneş ışınımı değişmektedir. Kış aylarında hem güneş ışığı geliş açısının düşük olması hemde atmosferik şartların güneş ışığını daha çok engellemesinden dolayı ortalama güneş ışınım süreleri değişmektedir. Şekil 6. a)'da Türkiye'nin Ocak ayı Şekil 6. b)'de, ise Temmuz ayı ışınımı gösterilmektedir. Güneşten en az yararlanılabilen ve güneşten en çok yararlanılabilen aylardaki ışınım değerleri elde edilecek elektrik enerjisinin yıl içindeki değişiminin hesaplamalarda nasıl dikkate alınacağı konusunda veri sağlamaktadır. Güneş ışınımı dolayısıyla elde edilebilecek elektrik enerjisi değişimi coğrafi konuma ve mevsime göre farklılık göstermektedir.

Şekil 6. a) Türkiye uzun yıllar Ocak ayı modellenen güneş ışınımı b) Türkiye uzun yıllar Temmuz ayı modellenen güneş ışınımı



Şekil 7'de ise Türkiye'nin 365 günün ortalaması olarak yıllık toplam güneş ışınımının fotovoltaik değeri ısı haritasında gösterilmiştir. Tahmin edileceği Türkiye'nin gibi orta ve güney bölgeleri daha fazla güneş ışınımı sağlamakta kuzey kesimler ise göreceli olarak daha az ışınım potansiyeline sahiptir.

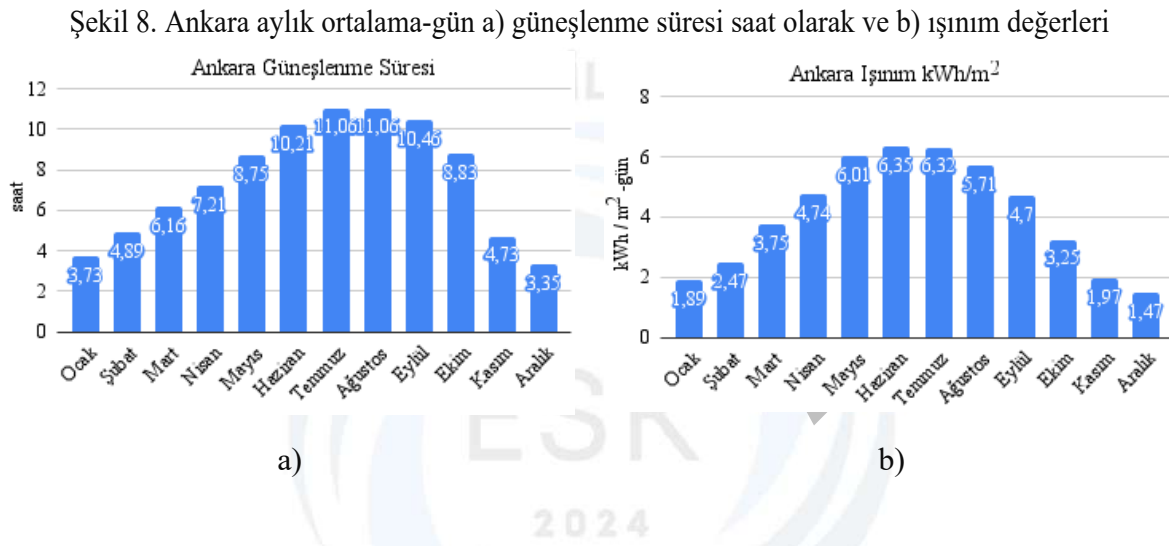
Şekil 7. Türkiye yıllık toplam güneş ışınımının PV eşdeğeri



Türkiye güneşlenme şiddetinin modellenmesi sonucunda İzmir-Iğdır hattının güneyinde kalan büyük bir alanda PV Eşdeğeri 225 kWh/m²-yıl'ın üzerinde, bulunmuştur ve bu alanlar Fotovoltaiklerin (PV) kurulması için uygun alanlar olarak düşünülmektedir. Bugünkü teknoloji ile PV'ler, toplam güneş potansiyelinin yaklaşık %15-%20'sini elektrik enerjisine

dönüştürülebilmektedir. En yüksek verim Mono kristalin silikon ile en düşük verim ise şekilsiz silikon ile elde edilebilmektedir. PV teknolojileri geliştirme çalışmaları devam etmekte olup %27,5 verime ulaşan sistemler geliştirilmiştir. Laboratuvar ortamında ise %49'lara varan verimler elde edilmiştir ancak laboratuvar koşullarındaki verim daima daha yüksektir. Verimi etkileyen faktörler arasında panel kurulum açısı, sıcaklık (azaldıkça verim artar), kullanılan silikon tipi, güneş hücre tasarımı vb. sayılabilir.” [5].

Şekil 8'a) da Ankara için güneşlenme süreleri ve Şekil 8. b)'de Ankara için ışıınım değerleri verilmiştir. Hesaplama kullanılan diğer illerden Edirne Ankara'dan daha düşük ışıınım değerlerine sahip iken Antalya daha yüksek ışıınım değerlerine sahiptir [18].



2.1 PV Boyutlandırma

Güneş ışıınımından elde edilecek enerjinin PV paneller vasıtasıyla elde edilmesi için ihtiyaç duyulan enerjinin ne kadar PV kullanılarak elde edilebileceğinin hesaplanması gerekmektedir. Güneş ışıınımından elde edilecek güç Denklem 1'göre [19];

$$P=G.A.\eta PR \quad (1)$$

burada G: güneş ışıınımı W/m^2 , A: yüzey alanı, η : verim, ve PR: performans oranı

boyutlandırma için alan hesabı Denklem 2, Denklem 1'den elde edilirse;

$$A=P/(G.\eta.PR) \quad (2)$$

kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yapılan hesaplamalarda pratik uygulama değerleri; η :0,206 ve PR:0,85 olarak alınmıştır.

BULGULAR

TÜİK verileri esas olarak alınan ve ayrıntıları yöntem bölümünde bahsedilen değerler ile bir EA'nın ayda ortalama 1110 km ve günde 37 km kullanıldığı ve 100 km'de 18 kW saat enerji tükettiği kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre PV boyutlandırması yapıldığında ortalama olarak bir aracın günlük şarj enerji ihtiyacının PV'lerden elde edilmesi için Tablo 1'de görüldüğü gibi Türkiye ortalaması 9,10 m², Ankara için 10,02 m², Edirne için 13,60 m² ve Antalya için 8,10 m²'lik güneş hücresine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 1. Günlük 37 km yol kateden EA'nın enerji ihtiyacı için gerekli PV alanı

| | Işınım kWh/m ² gün | Güneşlenme süresi saat | A (m ²) 6670 W için alan |
|----------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Ankara | 3,8 | 6,9 | 10,02 |
| Edirne | 2,8 | 6,2 | 13,60 |
| Antalya | 4,70 | 8,4 | 8,10 |
| Türkiye | 4,18 | 7,5 | 9,10 |

Şekil 7'deki harita ile birlikte değerlendirildiğinde Türkiye'nin güney bölgelerinde daha düşük PV alanına ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 2'de Türkiye'nin 2025, 2030 ve 2035 yılları için EA sayısı projeksiyonları düşük, orta ve yüksek senaryoya göre verilmiştir [2]. Bu veriler ışığında bu araçların tamamının PV ile şarj edilmesi durumunda gerekli PV alanı hesaplanmıştır. Orta senaryoya göre 2025 yılında EA sayısı 269.154 adet ve PV alanı 2,45 km², 2030 yılında EA sayısı 1.321.932 adet, PV alanı 12,06 km² ve 2035 yılında EA sayısı 3.307.577 adet ve gerekli PV alanı 30,17 km² olarak gösterilmiştir. EA sayısı projeksiyonu EPDK Elektrikli Araç Ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu Nisan 2024 raporundan [2] alınmış ve PV alan hesapları Türkiye ortalama güneş ışınım değerlerine göre hesaplanmıştır.

Tablo 2. EA sayısı projeksiyonu ve buna göre ihtiyaç duyulan PV hücre alanı

| Yıl | EA sayısı Düşük senaryo | PV A(km ²) | EA sayısı Orta senaryo | PV A(km ²) | EA sayısı Yüksek senaryo | PV A(km ²) |
|------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| 2025 | 202.030 | 1,84 | 269.154 | 2,45 | 361.893 | 3,30 |
| 2030 | 776.362 | 7,08 | 1.321.932 | 12,06 | 1.679.600 | 15,32 |
| 2035 | 1.779.488 | 16,23 | 3.307.577 | 30,17 | 4.214.273 | 38,43 |

İhtiyaç duyulacak PV alanı en yüksek senaryoda 38,43 km² olmaktadır.

EA araçların enerji tüketimi açısından değerlendirme yapıldığında elektrik tüketiminin 2030 yılı için 1,69 TW saat ile 3,56 TW saat arasında değişeceği ön görülmekte olup 2035 yılında ise bu değer 3,98 TW saat ile 9,39 TW saat aralığında olacağı tahmin edilmektedir. Türkiye

Ulusal Enerji Planı çalışmasının sonuçlarına [2] göre elektrik tüketiminin 2030 yılında 455,3 TW saat, 2035 yılında ise 510,5 TW saat seviyesine ulaşması beklenmektedir. Bu durumda en yüksek senaryoda dahi elektrikli araçların elektrik tüketiminin toplam elektrik tüketimine oranının 2030 yılında %1, 2035 yılında ise %2'yi geçmeyeceği tahmin edilmektedir.

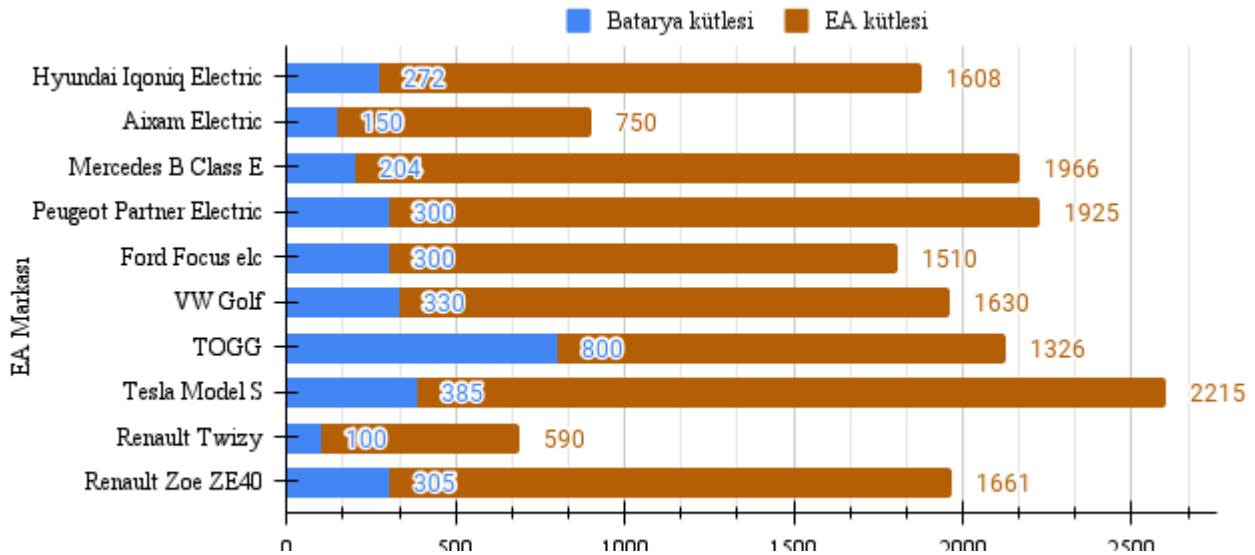
PV boyutlandırmasından sonra EA bataryalarının geleneksel fosil yakıtlı araçlarla karşılaştırması yapıldığında Tablo 3'teki sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Petrolün 1 kg ile W saat net enerji elde edilebilirken 1 kg bataryada bugünkü uygulanan teknoloji ile en fazla 135 Wh enerji depolanabilmektedir. Tablo 3'ün en sağ sütununda görüldüğü gibi menzil açısından 1 kg bataryayı depolayabildiği enerji 1 kg petrolden alınan net enerjiden yaklaşık 22 kat daha azdır.

Tablo 3. Fosil yakıt ve EA bataryalarının enerji yoğunluğu ve ağırlığı açısından karşılaştırılması.

| Fosil yakıt / Batarya | Wh/kg | kWh/L | Verim | Net Wh/kg | Oran, Li-Ion 100Wh/kg ve göre |
|-----------------------|-------|-------|-------|-----------|----------------------------------|
| Petrol | 12100 | 9.120 | 18% | 2178 | 21,78 |
| Motorin | 11800 | 9.970 | 22% | 2596 | 25,96 |
| Batarya (kurşun asit) | 30 | 60 | 80% | 24 | 0,24 |
| Batarya NiMH | 60 | 150 | 80% | 48 | 0,48 |
| Batarya LiFePO4 | 100 | 150 | 80% | 80 | 0,80 |
| Batarya LiPO/LiCo | 135 | 250 | 80% | 108 | 1,08 |

Batarya teknolojilerinde ARGE faaliyetleri devam etmekte olup 350Wh/kg'lık bataryaların geliştirildiği ve seri üretim ve ticari kullanım fazına geldiği bildirilmektedir. Şekil 9'da piyasada mevcut EA'ların batarya ve araç kütlesi grafiği verilmiştir [20,21].

Şekil 9. Piyasada mevcut bazı EA'lar için batarya ağırlığı ve araç ağırlığı



Bu durumda 200-900 kg arası değişen ve EA batarya ağırlığı 1/3 oranında azalacaktır. EA batarya ağırlığı toplam araç ağırlığı içinde yüksek bir oran tutmakta ve şarj tipi ve buna paralel olarak şarj süresinde yaygınlaşma sürecinde etkili olmaktadır. EA'ların mevcut fosil yakıtlı araçlarla menzil ve dolmuş/şarj süresi yönünde eşdeğer duruma gelebilmesi için batarya teknolojilerinin 10 kata kadar iyileştirilmesine şarj süresinin 10 dk'nın altına düşürecek teknolojik gelişime ihtiyaç vardır.

TARTIŞMA ve SONUÇ

Fotovoltaik panellerden elektrikli araç şarjı, gelecekte ulaşımın daha çevreci ve sürdürülebilir olmasına katkı sağlayabilir. Ancak, bu sistemin yaygınlaşması için enerji verimliliği, teknolojik gelişmeler ve altyapı yatırımları gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Elektrikli araçların şarj süresi, şarj ağı ve menzili geliştirilmesi gereken alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Satheesh Kumar, S., B. Ashok Kumar, and S. Senthilrani. "Review of electric vehicle (EV) charging using renewable solar photovoltaic (PV) nano grid." *Energy & Environment* 35.2 (2024): 1089-1117.
- [2] EPDK Elektrikli Araç Ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu Nisan 2024, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=jvDGtVdWM9A=>
- [3] Durmuş, Furkan Said, and Habib Kaymaz. "Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri." *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* 3.2 (2020): 123-139.
- [4] Kocabey, Süreyya. "Elektrikli otomobillerin dünü, bugünü ve geleceği." *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* 1.1 (2018): 16-23.
- [5] Enerji Bakanlığı Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) <https://enerji.gov.tr/gunes-bilgimerkezi#:~:text=%C3%9C%9C%2C%20co%4%9F%20konumu%20nedeniyle%20y%C3%BCksek,%3D%20%20saat%2F%3%BCn>
- [6] Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://cevresehirklimkutuphanesi.csb.gov.tr/Books/Book/e71c64fd-0320-4729-86af-126fcc47e75c>
- [7] Çiçek, Alper, and Ozan Erdiñç. "PV-batarya hibrit sistemi içeren elektrikli araç otoparkının şarj yönetimi." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 15 (2019): 466-474.
- [8] Kılıç, Erdal. "Da-da yükselten dönüştürücü ile elektrikli araç batarya şarj cihazı tasarımı." *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 22.4 (2019): 281-287.
- [9] KAYMAZ, Habib, and Yusuf HANÇAR. "Elektrikli araç batarya yönetim sistemleri için hücre eşitleme yöntemleri." *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* 4.1 (2021): 59-73.

- [10] Alrubaie, Ali Jawad, et al. "A comprehensive review of electric vehicle charging stations with solar photovoltaic system considering market, technical requirements, network implications, and future challenges." *Sustainability* 15.10 (2023): 8122.
- [11] Amir, Mohammad, et al. "Intelligent energy management scheme-based coordinated control for reducing peak load in grid-connected photovoltaic-powered electric vehicle charging stations." *IET Generation, Transmission & Distribution* 18.6 (2024): 1205-1222.
- 12 Fakour, Hoda, et al. "Evaluation of solar photovoltaic carport canopy with electric vehicle charging potential." *Scientific Reports* 13.1 (2023): 2136.
- [13] Mastoi, Muhammad Shahid, et al. "A study of charging-dispatch strategies and vehicle-to-grid technologies for electric vehicles in distribution networks." *Energy Reports* 9 (2023): 1777-1806.]
- [14] Akman, Tuğba, Cemal Yılmaz, and Yusuf Sönmez. "Short-term electric energy load forecasting of Ankara Region using artificial intelligence methods." *Politeknik Dergisi* 26.4 (2023): 1517-1531.
- [15] Akça, Hakan, and Ahmet Aktaş. "dc/dc Boost Converter Topologies and Experimental Comparison in Electric Vehicle to Grid Applications." *Politeknik Dergisi*: 1-1.
- [16] Çakır, Mutlu Tarık, and Musa Faruk Çakır. "Evaluating the Effect of Electric Vehicle Charging Stations on Power Grids in Sivas Province." *Politeknik Dergisi* 26.3 (2023): 1215-1231.
- [17] Çetin, Muhammed Sefa, Muhsin Tunay Gençoğlu, and Arkadiusz Dobrzycki. "Investigation of Charging Technologies for Electric Vehicles." *Turkish Journal of Science and Technology* 19.1 (2024): 97-106.
- [18] Koçer, Abdülkadir, Seyfi Şevik, and Afşin Güngör. "Ankara ve İlçeleri için Güneş Kolektörü Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi." *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 21.1 (2016): 63-78.
- [19] Peerlings, Jordi, et al. "The photovoltaic potential for electric vehicle charging along highways: A Dutch case study." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 32.4 (2024): 244-252.
- [20] Berjoza, Dainis, and Inara Jurgena. "Influence of batteries weight on electric automobile performance." *Eng. Rural Dev* 16 (2017): 1388-1394.
- [21] Kerem, Alper, and Hatice Gürbak. "Fast Charging Station Technologies For Electric Vehicles." *Gazi University Journal of Science* 8.3 (2020): 1-2.

156: Elektriksel Yayların Dağıtım Şebekesinde Kullanımına Yönelik Analizi

Mustafa Emre Eren
Siemens Sanayi ve Ticaret A.Ş.

Sezai Taşkın
Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., Elektrik Elektronik Mühendisliği,

Yavuz Ateş, Ali Rifat Boynueğri
Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul

ÖZET

Ülkelerin sıfır karbon emisyonu hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji yatırımları artarken, elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla çözüm bekleyen bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Elektrikli araçların emisyon oranlarını azaltmak için gerekli şarj ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması önemli bir unsurdur. Bu durum, geleneksel güç şebekesi kontrol yöntemlerinin değiştirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Güç sistemlerini etkin bir şekilde dengelemek için arz tarafı yönetimi, talep tarafı yönetimi ve enerji depolama sistemleri gibi üç ana alan bulunmaktadır. Özellikle talebi verimli yönetmek için talep tarafı yönetiminin önemi artmakta, yük planlaması, gerçek zamanlı fiyatlandırma ve yüklerin doğrudan kontrolü gibi stratejiler kullanılmaktadır. Elektrikli araçlar ve dağıtık üretim kaynakları yaygınlaştıkça, akıllı yükler ve güç elektroniği sistemleri şebeke dengesinde kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, hızlı tepki süresiyle etkili talep yanıtı sağlayan "Elektriksel Yay" teknolojisi ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada, EA'ların ve dağıtık üretim kaynaklarının artmasıyla şebeke frekansına sadece arz tarafı yönetimi tarafından değil, talep tarafı yönetimi tarafından da katkı sağlanmasının bir yöntemi önerilmiştir. Matlab/Simulink'te modellenen sistemde, elektrikli araçlarının araçtan şebekeye özelliği depolama üniteleri olarak kullanılmıştır. Modelleme, yenilenebilir enerji kaynaklı dağıtık üretimin meteorolojik koşullara bağlı olarak gün içinde değişkenlik göstermesi ve talep tarafı değişkenliği dikkate alınarak yapılmıştır. Elektriksel Yay fonksiyonları ile önerilen yöntemin şebekenin frekans ve gerilim kararlılığına katkı sunabileceği gösterilmiştir. Sonuç olarak, çalışma, elektrikli araçların şarj altyapısının Elektriksel Yay işlevleri ve yenilenebilir enerji ile birlikte kullanılmasını önermektedir. Modellenen yapı, Elektriksel Yay işlevlerine sahip çift yönlü bir AA- DA güç dönüştürücü benzetimini içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Dağıtım Şebekesi, Akıllı Yükler, Elektriksel Yay

ABSTRACT

In line with countries' zero-carbon emission goals, investments in renewable energy are increasing. However, the widespread adoption of electric vehicles introduces some unresolved issues. For electric vehicles to effectively reduce emissions, it is crucial that the required charging demand is met through renewable energy sources. This transition necessitates a shift from traditional methods where supply follows demand to new approaches where demand must align with existing power capacity, leading to a need for changes in conventional power grid control methods. To balance power systems effectively, three main areas are crucial, Supply Side Management, Demand Side Management and Energy Storage Systems. While Supply Side Management deals with energy production and distribution, the increasing variability in demand due to the proliferation of electric vehicles challenges the limits of this approach. Consequently, Demand Side Management strategies such as load forecasting, real-time pricing, and direct load control become increasingly important. As distributed generation resources and electric vehicles become more prevalent, power electronics systems play a critical role in grid balancing. Smart loads, particularly those capable of adjusting to grid conditions, are gaining significant attention. Among these, the "Electric Spring " technology stands out for its effective demand response capabilities with rapid reaction times. ES is inspired by mechanical springs and aims to improve frequency control and voltage stability in power distribution systems, addressing common power quality issues such as voltage dips and surges, flicker, imbalances, and current harmonics.

This study proposes a method for contributing to grid frequency support not only through Supply Side Management but also via Demand Side Management, in response to the increase in electric vehicles and distributed generation resources. The analyzed system is modeled using Matlab/Simulink, with storage units based on the Vehicle-to-Grid capability of electric vehicles. The contribution and improvements of the Electric Spring technology in mitigating voltage and frequency fluctuations are analyzed. The study aims to provide frequency and voltage support not just from the production side but also from the distribution side. The modeling considers the variability of distributed generation from renewable sources due to meteorological conditions and demand-side variability. The proposed method with Electric Spring functions demonstrates its potential to enhance frequency and voltage stability in the grid. In conclusion, the study suggests integrating electric vehicles charging infrastructure with Electric Spring functions and renewable energy. The modeled structure includes a bidirectional AC-DC power converter simulation with Electric Spring functionalities.

Key Words: Electricity Distribution Network, Smart Loads, Electrical Spring

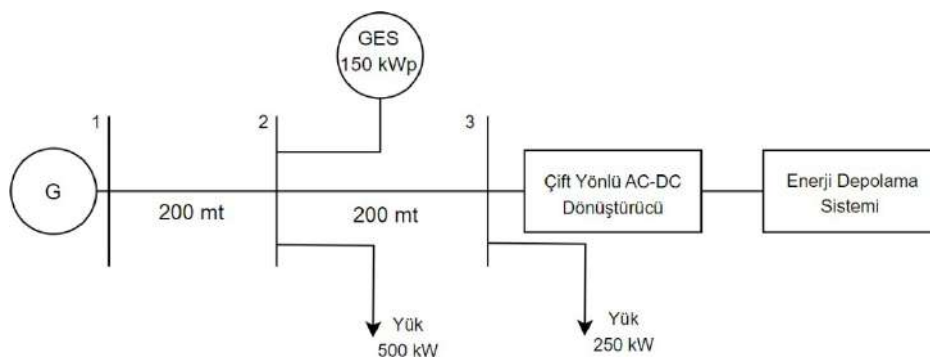
GİRİŞ (AMAÇ)

Ülkelerin sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımları artmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte çözüm bekleyen bazı problemler de ortaya çıkmaktadır. Örneğin elektrikli araçların emisyon oranlarını azaltabilmesi için talep edilen şarj ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması önemli unsurlardan birisidir. Bu değişim, arzın talebi takip ettiği geleneksel yöntemlerden, talebin mevcut güce uyum

sağlayabildiği yeni yaklaşımlara geçerek, güç şebekelerinin geleneksel kontrol yöntemlerinin değiştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Güç sistemlerini etkin bir şekilde dengelemek için üç ana alan mevcuttur: (i) arz tarafı yönetimi (supply side management - SSM),(ii)talep tarafı yönetimi (demand side management - DSM)ve (iii)enerji depolama sistemleridir (energy storage system - ESS)SSM enerji üretimi ve dağıtımını ele alırken, özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte talep değişkenliğindeki artış bu yaklaşımın sınırlarını günden güne zorlamaktadır. Bu noktada, talebi daha verimli bir şekilde yönetmek için yük planlaması, gerçek zamanlı fiyatlandırma ve yüklerin doğrudan kontrolü gibi stratejileri içeren DSM çok daha önemli hale gelmektedir. Dağıtık üretim kaynakları ve elektrikli araçlar (EA)yaygın hale geldikçe, güç elektroniği sistemleri şebekenin dengelenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bundan dolayı özellikle tüketim noktalarının şebeke koşullarına göre ayarlayabilen akıllı yükler giderek daha fazla ilgi görmektedir. Akıllı yük yöntemlerinden en çok tercih edilenlerden birisi hızlı tepki süresiyle etkili talep yanıtı sağlama özelliği taşıyan “Elektriksel Yay (EY)” teknolojisidir. EY’nin asıl çıkış sebebi, elektrik dağıtım sistemlerinde ortaya çıkan güç kalitesi sorunlarında önemli bir artış yaşanmasıdır. Genel olarak meydana gelen en sık güç kalitesi bozukluklarından bazıları gerilim düşmesi ve yükselmeleri, flicker, dengesizlikler ve akım harmonikleridir. EY ifadesi kavramsal olarak ele alındığında fiziksel kullanımı yaygın olan “Mekanik Yay’dan esinlenilerek türetilmiştir. Temel yükler için frekans kontrolü ile gerilim kararlılığı sağlamak amacıyla EY geliştirilmeye ve araştırılmaya devam etmektedir. Dağıtık üretimin ve yüksek tüketimlerin olduğu dağıtılmış şebekeye bağlı sistemlerde EY, anahtarlama işlemleri ve arıza durumları nedeniyle şebekede meydana gelebilecek gerilim salınımlarını azaltmak için frekans kontrollü bir çözümdür. Böylelikle talep tarafında hem frekansa hem de gerilim kararlılığına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Bu çalışmada EA’ların ve dağıtık üretim kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte, şebeke frekansının yalnızca SSM tarafından desteklenmesi yerine, DSM ile de katkı sağlanmasına yönelik bir kontrol yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Analiz edilen sistem, Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve bu süreçte depolama üniteleri olarak EA’ların araçtan şebekeye enerji aktarımı (V2G) özelliği veya ikincil bataryaların depolama gücü kullanılmıştır. Şekil 1’de test sisteminin temel tasarımı sunulmuştur.

Şekil 1: Alçak Gerilim Şebekesine Bağlı EY Fonksiyonlu Çift Yönlü EA Şarj İstasyonu Mikro şebeke Modeli



Önerilen kontrol yöntemi ile sadece üretim tarafında değil aynı zamanda dağıtım tarafında da

şebekeye frekans ve gerilim desteğinin sağlanması hedeflenmiştir. Yapılan modellemede yenilenebilir enerji kaynaklı dağıtık üretimin meteorolojik koşullara bağlı olarak gün içinde değişkenlik göstermesi ve talep tarafı değişkenliği dikkate alınmış ve modellenmiştir. EY fonksiyonları ile önerilen kontrol yönteminin, şebeke frekans ve gerilim kararlılığına katkı sunabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak EA şarj altyapısının EY işlevleri ve yenilenebilir enerji ile birlikte kullanılmasını önermektedir. Modellenen yapı, EY işlevlerine sahip çift yönlü bir AA-DA güç dönüştürücü benzetimini içermektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada önerilen yöntem, güç sistemlerinin kararlılığını artırmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araçların şebekeye entegrasyonu sonrasında oluşabilecek ani değişikliklerde şebeke kararlılığını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Önerilen kontrol stratejisi, DSM yöntemlerinden olan EY kullanılarak, şebekenin gerilim ve frekans kararlılığını sağlamaya yönelik güncel bir yaklaşımı modellemektir. Matlab Geliştirilen modelde, güneş enerjisi santrali, EY'e entegreli hale gelmiş elektrikli araç şarj istasyonları ve dağıtık üretim sistemleri birlikte ele alınarak, şebekenin dinamik koşullara verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Bu model, özellikle şebekenin artan talep sonucu herhangi bir müşteride oluşan arıza sonucu ani düşen yükler altında nasıl stabilize edilebileceğini göstermek amacıyla tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan modelleme ve simülasyon teknikleri, önerilen kontrol stratejisinin etkinliğini değerlendirmek için ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir.

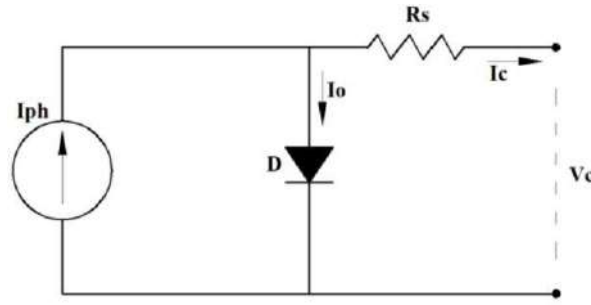
2.1 Güneş Santrali Modeli

Bu çalışmada, fotovoltaik panellerin modellenmesi ve çevresel koşulların etkilerini simüle edilmiştir. Sistemin oluşturulmasında, 550 Wp gücündeki panelin teknik verileri, üretici kataloğundan alınmıştır. Ortam sıcaklığı ve güneş ısınımı gibi çevresel faktörlerin panel üzerindeki etkileri, ilgili formüller kullanılarak hesaplanmış ve modelin tasarımında dikkate alınmıştır. Şekil 2'de gösterildiği üzere, Kirchhoff'un akım yasası göre fotovoltaik (FV) hücrenin çıkış, akımını (I_{pv}) aşağıdaki şekilde denklem 1'de gösterilmiştir. FV'in iç direnci ihmal edilmiştir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{DD} \quad (1)$$

Fotovoltaik modül verimliliğini değerlendirmek için literatürde en yaygın olarak kullanılan model tercih edilmiştir [1]. Modülün referans verimliliğini hücre sıcaklığına göre ayarlayan aşağıdaki denklem 2 ile ifade edilmektedir [2].

$$\eta_{pv} = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r) + \gamma * \text{Log}G_t] \quad (2)$$



Şekil 2: Fotovoltaik panel basitleştirilmiş eşdeğer devre

Denklem 3'te FV modülünün çalışma sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve güneş ışınımı ile doğrusal bir ilişki içerisinde formül denklem 3'te gösterilmiştir.

$$T_c = T_a + k * G_t \quad (3)$$

Burada, k Ross katsayısı [7] olarak bilinen ve 0,02 ile 0,04 K m²/W arasında değişen bir parametredir. Bu değer, modülün kurulum şekline göre ve arkasındaki hava boşluğunun büyüklüğüne bağlıdır. Skoplaki ve Palyvos [8] tarafından önerilen k katsayısının temel değerleri [6] Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1 Ross katsayısı Ross katsayısı k'nın temel değerleri Skoplaki ve diğerleri [8] tarafından Ref. [6]

| Fv Tasarım Şekli | k (K m ² /W) |
|----------------------|-------------------------|
| İyi soğutulmuş | 0,02 |
| Bağımsız ayakta | 0,0208 |
| Çatıda düz | 0,026 |
| Çok iyi soğutulmamış | 0,0342 |
| Şeffaf Fv | 0,0455 |
| Cephe entegre | 0,0538 |
| Eğimli çatı | 0,0563 |

Işınım FV üzerindeki G katsayısı küçük olduğundan dolayı, $\gamma = 0$ olacak şekilde sadeleştirilir [3] ve FV verimliliği denklem 4'teki gibi ifade edilir.

$$\eta_{pv} = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r)] \quad (4)$$

Bu verimlilik kullanılarak, aşağıdaki denklem 5 yardımıyla enerji üretimi tahmin edilebilir:

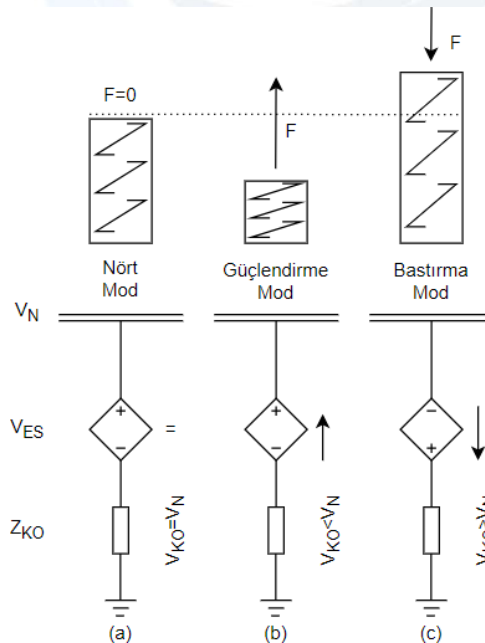
$$E_{ABC} = \eta_{pv} * \eta_{bos} * A_{pv} * G_{pv} * k \quad (5)$$

Bu çalışmada, modül yüzey alanları bina entegreli FV sistem olan (BIPV) 2,92 m² olarak belirlenmiştir. K, 1 olarak alınmıştır çünkü bina açık bir alana kurulmuş, ve çatı eğimi güney yönüne tam olarak bakacak şekilde ayarlanmıştır. G gün içinde değişken olup, η_{bos} değeri 0,89 olarak kabul edilmiştir.

2.2 EY ve Kontrol Modeli

EY, dönüştürücü anahtarlarını önceden ayarlanmış ayarlara göre besleyen programlanmış bir kontrolör tarafından kontrol edilen güç elektroniği dönüştürücü tabanlı bir anahtarlama cihazıdır. EY'nin çıkışı mevcut bir evdeki kritik olmayan bir yüke bağlanır ve mekanik yaydan esinlenerek geliştirilen ve güç sistemlerinde gerilim ve frekans kararlılığı sağlamak amacıyla kullanılan bir teknolojidir. Mekanik yaylar, fiziksel kuvvetlere karşı direnç göstererek dışsal kuvveti sönmülemeye çalışmaktadır. Bu yasa temel olarak Hooke yasasına dayanmaktadır. Şekil 3'de gösterilmiştir. Benzer şekilde, EY de elektriksel gerilim ve frekans dalgalanmalarına karşı direnç gösterir. Hooke yasasına dayalı bu teknoloji, şebekede meydana gelen dalgalanmaları tespit eder ve uygun bir tepki sağlayarak sistemi dengeler. EY, yüklerin gerilim altında sabit kalmasını sağlar ve bu şekilde şebeke kararlılığına katkıda bulunur. Gerçek zamanlı olarak çalışan EY, yüklerin anlık değişimlerine hızlıca tepki vererek, güç kalitesini artırır.

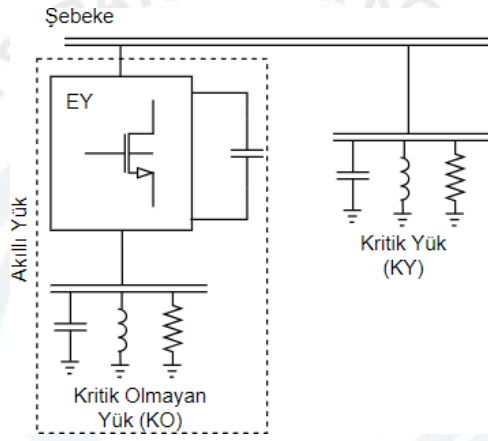
Şekil 3: Mekanik yay ve EY arasındaki benzerlik. (a) Nötr mod. (b) Güçlendirme modu. (c) Bastırma modu



İlk olarak 2012 ortaya atılan EY [4] teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. İlk geliştirilen EY modelleri, önce sadece gerilime odaklanırken sonra temel frekans ve gerilim kontrolünü ele

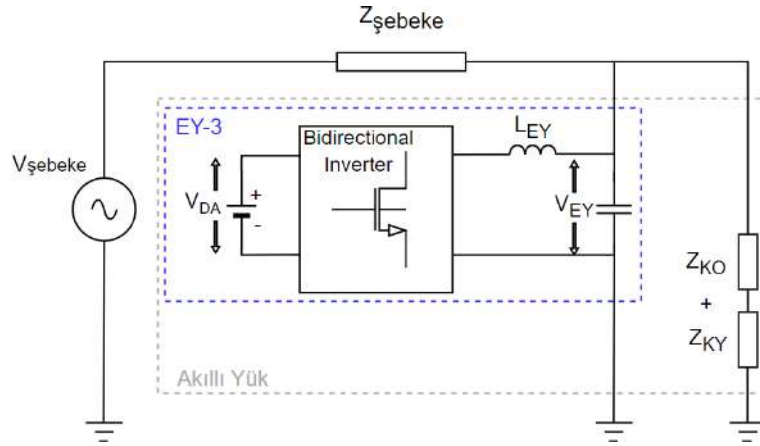
almıştır [5], sonraki versiyonlarda ise daha karmaşık güç kalitesi problemlerini çözme yeteneğine sahip olmuştur. İlk jenerasyon EY'ler, tek yönlü güç akışını yönetebilirken, zamanla çift yönlü güç akışını kontrol edebilen modeller geliştirilmiştir. Şekil 4'de EY'nin genel blok diyagramı gösterilmiştir. 2023 yılında bulunan MV-ES (Orta Gerilim-EY) ise, daha büyük ölçekli şebekelerde kullanılmak üzere geliştirilmiş, çift yönlü güç akışını yönetebilen bir modeldir. MV-ES'in avantajları arasında, geniş kapsamlı şebekelerde yüksek frekans kararlılığı ve esneklik yer alırken, dezavantajları ise maliyet ve karmaşık entegrasyon süreçleri olarak öne çıkmaktadır. MV-ES, büyük ölçekli sistemlerde kullanım yönünden oldukça çünkü [10]'de geniş çapta EA'ların bulunduğu bir otoparkı depolama sistemi olarak kullanarak direk OG şebekeye frekans ve gerilim bakımından kararlılık sağlamaya çalışmıştır ve aynı zamanda EA'ların ihtiyaç duyduğu şarj altyapısını sağlamıştır.

Şekil 4: Elektriksel Yay Genel Devre Diyagramı



EY-3 modeli, MV-ES'den önce düşük gerilimli sistemlerde kullanılabilecek bir versiyonu olarak geliştirilmiştir. EY-3 ilk olarak 2016'da yayınlanmıştır [9]. EY-3, çift yönlü güç akışını yönetebilen ve kritik olmayan yüklerle ihtiyaç duymayan bir yapıya sahiptir. EY-3, yapısında bulunan enerji depolama üniteleri ile güç dalgalanmalarını tespit eder ve gerilim - frekans kararlılığını sağlamak için uygun tepkiler verir. Kontrol şeması, yüklerin ihtiyaçlarına göre dinamik olarak ayarlanabilen bir yapıya sahiptir. Şekil 5'te EY-3'ün topolojik yapısı gösterilmiştir. Önerilen EY'de depolama sisteminin kurulu gücü 7.7 kVA gücündedir. Küçük bir ev tipi EA şarj istasyonu boyutunda yapılmıştır.

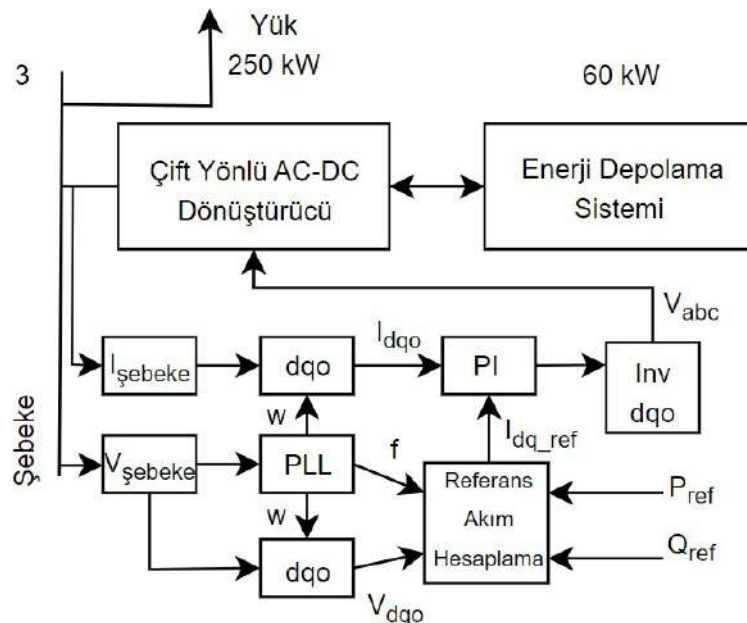
Şekil 5: EY-3 Blok Diyagramı



EY-3'ün kontrol yapısı, Şekil 6'da gösterilmiştir. Şebekedeki frekans ve gerilim sapmalarını referans girdilere göre tespit ederek anlık düzeltmeye çalışan bir kontrol mekanizmasından oluşmaktadır. EY-3'ün en önemli özelliği çift yönlü olarak hem aktif gücü kontrol ederek frekansa katkı sağlıyor hem de reaktif enerjiyi de kontrol ederek gerileme katkı sağlamış oluyor. Böylelikle, bu kontrol sistemi EY-3'ün şebekenin dinamik yük koşullarına anında uyum sağlamasını mümkün hale getiriyor.

Önerilen kontrol yöntemine göre, EY-3'ün bağlı olduğu AG 3 nolu baradan alınan 3 faz akım ve gerilim değerlerini anlık olarak alınmaktadır. Şebeke gerilim değerinden PLL ile hem şebeke frekansı f_s ve açılma hız ω elde edilmektedir. Şebeke bölgesinde istenilen P_{ref} ve Q_{ref} sabit değerlerine göre EY-3 yapısındaki anahtarlama elemanları kontrol edilerek şebeke kararlılığı iyileştirilmiştir.

Şekil 6: EY-3 Kontrol Diyagramı



2.3 Diğer Şebeke Ekipmanları

Bu çalışma kapsamında modellenen üç fazlı elektrik dağıtım şebekesi OG'den beslenen bir AG şebekesidir. İlk aşamada basit ve genel bir AG şebeke modeli oluşturulması amaçlanmıştır. 200 m aralıklı 2 adet AA yük modellenmiştir. AG şebeke OG/AG bir trafodan beslenmektedir. OG seviyesi faz-faz arası gerilimi 6,6kV iken AG 0,4 kV'tur. AG şebekede kullanılan hat parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir. X değerleri ihmal edilmiştir.

Tablo 2 AG Kablo Özelliği

| Ag Hat Tipi | r değeri | Hat Uzunluğu mt |
|-----------------------|----------|-----------------|
| Bara 1 - Bara 2 Arası | 0,007 | 200 |
| Bara 2 - Bara 3 Arası | 0,007 | 200 |

AG gerilim şebeke modelinde 2 farklı barada 2 adet yük tanımlanmıştır. Tanımlanan yüklerin özellikleri Tablo 3'de gösterilmektedir.

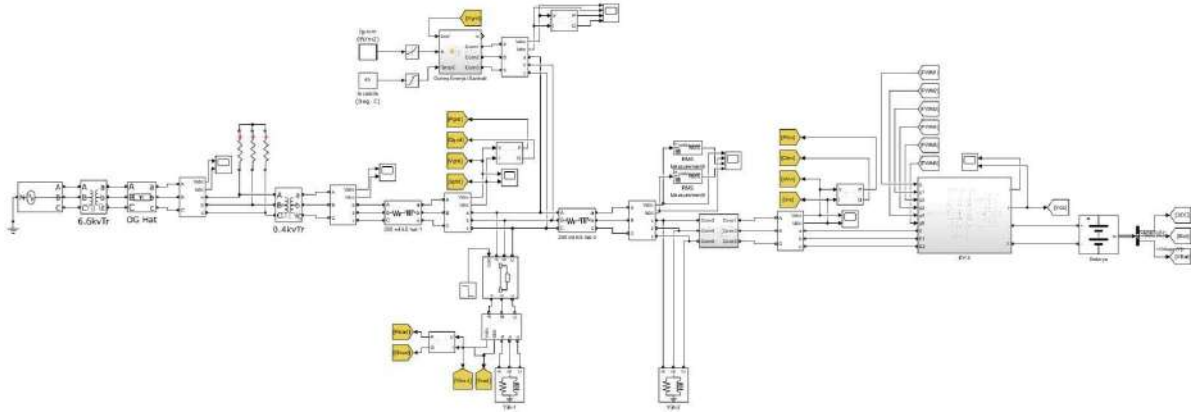
Tablo 3 AG Yük Özellikleri

| Yük No | P/Q değeri kW/kVar | Yük tipi |
|-----------------|--------------------|-----------|
| Bara 2'ye Bağlı | 500 / 50 | Sabit P/Q |
| Bara 3'ye Bağlı | 250 / 10 | Sabit P/Q |

2.4 Önerilen Şebeke Modeli ve Test Yöntemi

Bu çalışmada, EA ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre olduğu bir elektrik dağıtım şebekesinin dinamik performansını değerlendirmek amacıyla önerilen şebeke modeli ve kontrol yöntemi üzerinde yük tarafında meydana gelen ani bir yük düşüşü oluşturulmuştur. Şebeke modeli Matlab R2024(a)/Simulink'te modellenmiştir. İlk aşamada, oluşturulan şebeke modeli diğer senoryalar için temel kararlı durum hali gösterilecektir. Önerilen şebeke modelinde şebeke performansı ve dinamiklerinin değişen koşullara nasıl tepki verdiğini analiz edilmiştir. Önerilen Matlab/Simulink şebeke modeli Şekil 7'de gösterilmektedir.

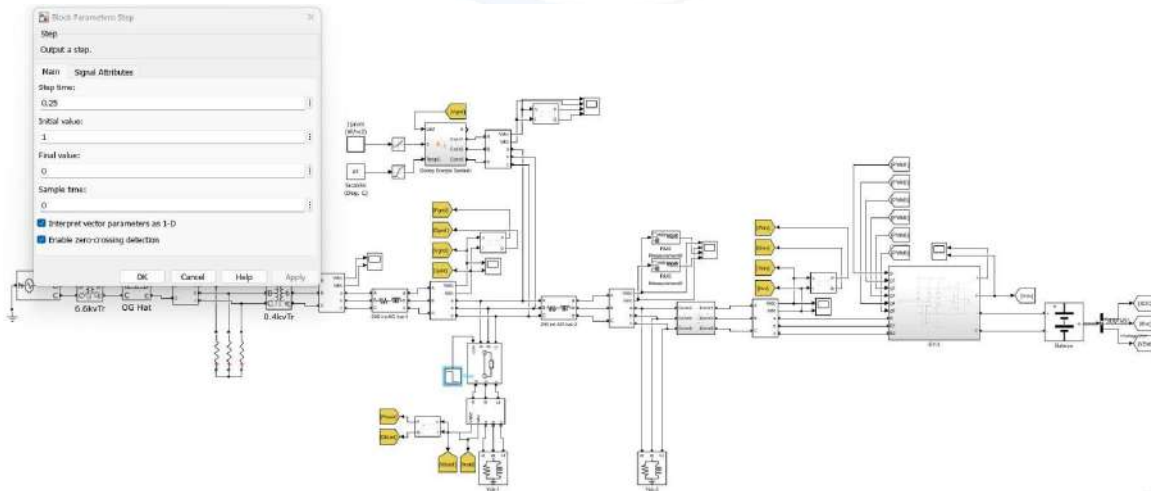
Şekil 7: Önerilen Şebeke Modeli



Bu test senaryolarının ilki, şebekenin stabil durum performansını incelemeyi hedeflemektedir. Bu senaryoda, herhangi bir müdahalede bulunulmadan şebekenin performans parametreleri değerlendirilip her bara üzerindeki gerilim ve frekans değerleri ölçülecektir. Bu ilk senaryo, şebekenin temel performansını ortaya koymak için referans veri sağlayacaktır. Elde edilen sonuçlar, sonraki test senaryolarındaki değişimlerin daha iyi anlaşılması için bir temel oluşturacaktır. Ayrıca bu aşama, EY burada EA'yı şarj ediyor gibi sürekli yük durumunda olması sağlanacaktır. Böylelikle daha gerçekçi bir durum oluşturulmaya çalışılmıştır.

İkinci senaryoda ise 0,25. sn'yede bara-2'ye bağlı yük-1 devre dışı bırakılarak talep tarafında ani bir yük düşüşü oluşturulacaktır. Bu aşamada, ani azalan frekans ve ani yükselen gerilim karşısında EY'in kontrol ettiği aktif ve reaktif gücü ölçülecektir. Baralardaki gerilim ve frekans sapmalarının, EY'in bu sapmaları nasıl stabilize ettiği ile birlikte inceleneceği bu senaryo, şebeke kararlılığına artırmaya yönelik önemli veriler sunacaktır. Bu test, şebekenin ani talep değişimlerine karşı direnç kabiliyetini ve önerilen kontrol yönteminin etkinliğini kapsamlı bir şekilde değerlendirecektir. Şekil 8'de gösterilmektedir.

Şekil 8: Önerilen Şebeke Modeli Üçüncü Senaryo Gösterimi



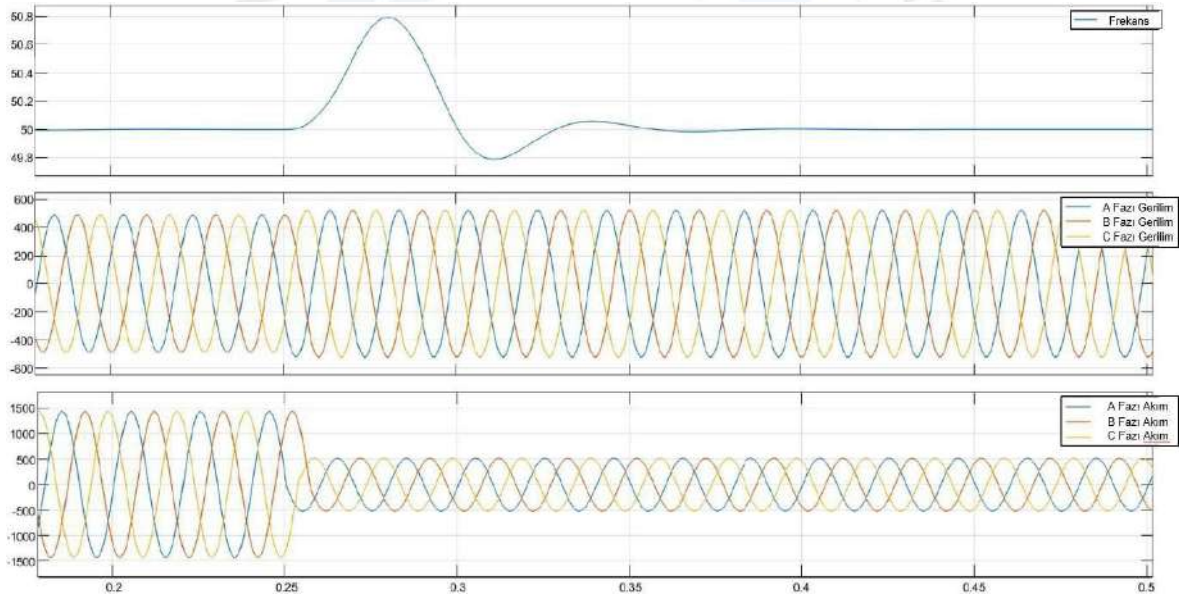
BULGULAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada geliştirilen kontrol yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının ve EA şebekeye entegrasyonunun güç sistemlerinin gerilim ve frekans kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, EY teknolojisinin şebeke üzerindeki gerilim ve frekans dalgalanmalarını etkin bir şekilde kontrol edebildiği ve sistem kararlılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

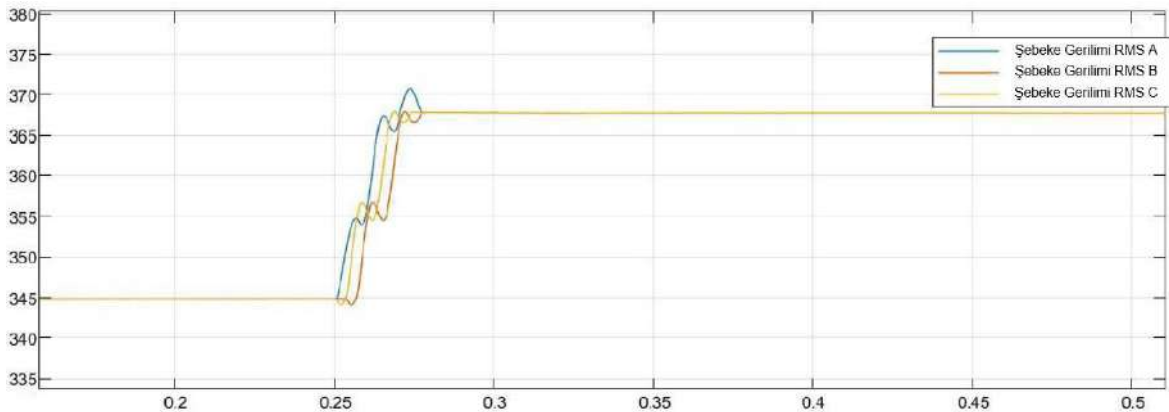
3.1 Gerilim ve Frekans Kararlılığı Üzerindeki Etkiler

Simülasyon sonuçlarına göre, 0,25 sn'den sonra şebekede 500 kW'lık ani bir yük düşüşü meydana gelmiştir. Bundan dolayı Şekil 9'de gözüktüğü gibi frekans ani bir şekilde dalgalanırken gerilim değerleri artmıştır. Şebeke tarafından akan akımda ise azalma meydana gelmiştir. Şekil 10'da yük-1'in bağlı olduğu baradan ölçümlenen gerilim değerinin RMS değeri gösterilmektedir. Yük-1'in devre dışı çıktığı zaman kademeli olarak gerilim değeri belirli bir miktar yükselme meydana gelmiştir.

Şekil 9: Şebeke Frekans, Gerilim ve Akım Değerleri

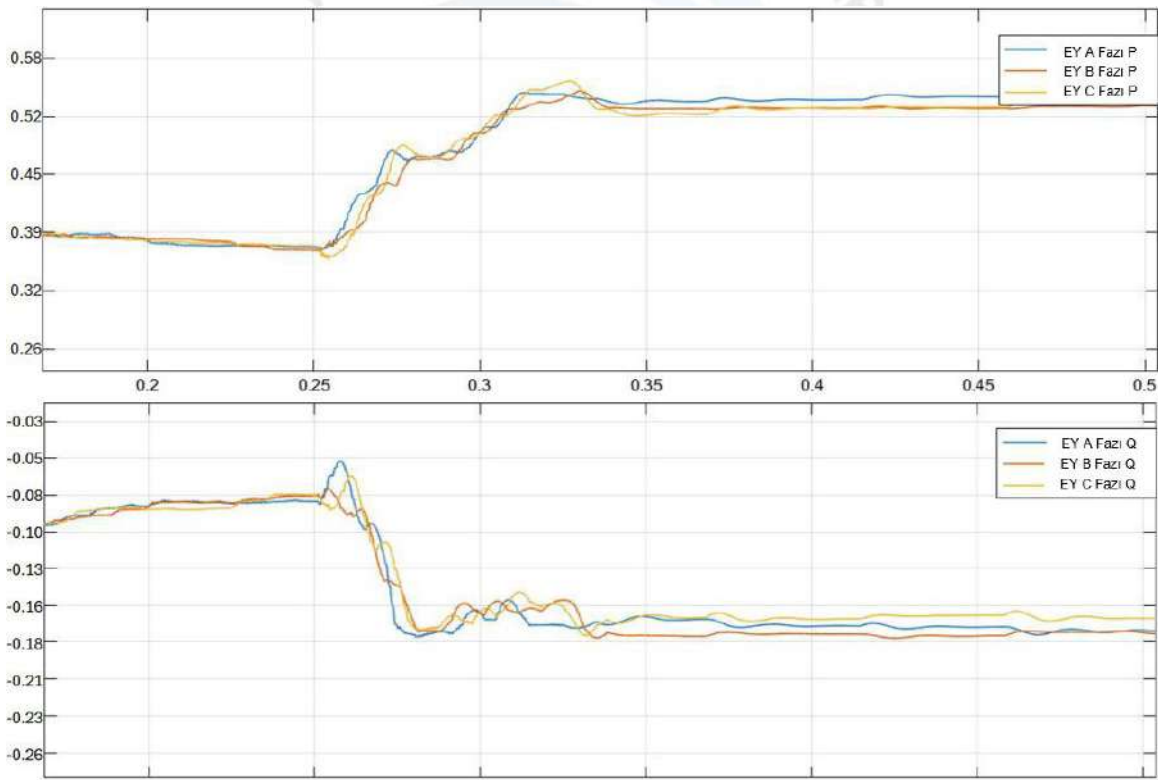


Şekil 10: Şebeke Geriliminin RMS Değeri



Önerilen EY kontrol yöntemi gerçeğe daha yakın olması amacıyla sürekli güç tüketim modunda EA şarj yapıyor şeklinde çalıştırılmaktadır. Şebeke stabil konumda iken EA yükü yaklaşık olarak 3 kW sürekli şarj konumundadır. Şekil 11'de gösterilmektedir. Fakat, şebeke ani yaşanan bir talep düşüşü sonucunda şebeke frekansını dengeleyebilmek adına 0.39 pu'dan 0.534 pu seviyelerine aktif çekiş gücünü artırmıştır. Ayrıca, 0.3 sn'den sonra ise şebeke frekansı 50 hz'in altına düştüğü içinde EY şarj aktif gücünü 0.526 pu seviyesine geri düşürmüştür. Şebeke frekansı desteklemek açısından EY'nin çift yönlü güç akışını yönetebilme yeteneği sayesinde, olası dalgalanmaların şebeke üzerindeki etkileri minimize etmeye yönelik şebekeyi desteklemiştir. Şebekede ani yük azalmasından dolayı ani meydana gelen gerilim yükselmesi sonucunda EY şebekeden reaktif güç çekişini de artırmıştır. Şekil 11'da gösterilen -0.1 pu seviyelerinden -0.17 pu seviyesine çıkarmıştır. Böylelikle EY tasarlanan kontrol yöntemi ile şebekenin gerilim değişikliklerine karşı reaktif enerji kontrolü ile ani tepkiler verebildiğini kanıtlamıştır.

Şekil 11: EY Aktif ve Reaktif Güç Ölçümleri



Önerilen Elektriksel Yay (EY) teknolojisi ile donatılmış çift yönlü EA şarj istasyonları, şebekenin dinamik koşullar altında gerilim ve frekans kararlılığını sağlamada etkin bir şekilde çalışmıştır. Simülasyon sonuçları, şebeke gerilimindeki dalgalanmaların EY ile önemli ölçüde azaltılabildiğini göstermiştir. Bu durum, özellikle ani talep kaynaklı gerilim - frekans dalgalanmaları ve elektrikli araçların ani şarj talepleri gibi etkenlerin neden olduğu frekans ve gerilim sapmalarının giderilmesine yardımcı olmuştur. Şebekenin dinamik yük koşulları altında EY'nin, yüklerin anlık değişimlerine hızlıca tepki vererek güç kararlılığını sağladığı ve arıza durumlarını minimize ettiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, EY'nin hem düşük hem de yüksek gerilimli sistemlerde etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

3.2 Uygulama Alanları ve Gelecek Çalışmalar

EY teknolojisinin, şebeke kararlılığını artırma ve güç kalitesini iyileştirme potansiyeli nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun olarak kullanıldığı AG şebekelerde, elektrikli araç şarj altyapıları ve dağıtık üretim sistemlerinde uygulanabilir olduğu görülmektedir. Gelecek çalışmalar, EY'nin farklı ölçeklerdeki şebekelerdeki performansının incelenmesi ve maliyet etkinliğinin artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmalarını içerebilir. Ayrıca, EY'nin diğer yenilenebilir enerji kaynakları ve akıllı şebeke teknolojileri ile entegrasyonu üzerine yapılacak araştırmalar, teknolojinin daha geniş kapsamda uygulanabilirliğini sağlayabilir.

SONUÇLAR

Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araçların entegre edilmiş bir dağıtım şebekesinde ani talep gücünde meydana gelen şebeke kararsızlıklarını gidermek amacıyla geliştirilen Elektriksel Yay (EY) teknolojisinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Simülasyon sonuçları, EY'nin gerilim ve frekans kararlılığı üzerindeki olumlu etkilerini net bir şekilde göstermiştir. Özellikle dağıtık enerji üretiminin yoğun olduğu senaryolarda, EY'nin dinamik yük değişimlerine karşı hızlı tepki verebilmesi, güç kalitesini artırmakta ve şebeke kararlılığını sağlamaktadır. Bu durum, EY'nin, modern enerji sistemlerinde kritik bir bileşen olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, EY teknolojisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin entegrasyonunu sağlamak ve elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte artan yük dengesizliklerine karşı etkili bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, EY'nin diğer akıllı şebeke teknolojileri ve enerji depolama sistemleri ile entegrasyonu, enerji sistemlerinin genel verimliliğini artırabilir ve daha sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemli katkılar sunabilir. Bu bağlamda, EY teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, modernelektrik şebekelerinin karşılaştığı zorlukları aşmada önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Marco D'Orazio, Costanzo Di Perna ve Elisa Di Giuseppe. "Experimental operating cell temperature assessment of BIPV with different installation configurations on roofs under Mediterranean climate". İçinde: *Renewable energy* 68 (2014), ss. 378–396.
- [2] DL Evans. "Simplified method for predicting photovoltaic array output". İçinde: *Solar energy* 27.6 (1981), ss. 555–560.
- [3] DL Evans ve LW Florschuetz. "Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration". İçinde: *Solar Energy* 19.3 (1977), ss. 255–262.
- [4] Chi Kwan Lee, Balarko Chaudhuri ve Shu Yuen Hui. "Hardware and control implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources". İçinde: *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics* 1.1 (2013), ss. 18–27.
- [5] Jingyu Liu, Wen Zhang ve Yutian Liu. "Primary frequency response from the control of LED lighting loads in commercial buildings". İçinde: *IEEE Transactions on Smart Grid* 8.6 (2016),

ss. 2880–2889.

- [6] Thomas Nordmann ve Luzi Clavadetscher. “Understanding temperature effects on PV system performance”. İçinde: *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of*. C. 3. IEEE. 2003, ss. 2243–2246.
- [7] RG Ross Jr. “Interface design considerations for terrestrial solar cell modules”. İçinde: *12th Photovoltaic specialists conference*. 1976, ss. 801–806.
- [8] EPJA Skoplaki ve John A Palyvos. “Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations”. İçinde: *Renewable energy* 34.1 (2009), ss. 23–29.
- [9] Tianbo Yang ve diğ. “Electric springs with coordinated battery management for reducing voltage and frequency fluctuations in microgrids”. İçinde: *IEEE Transactions on Smart Grid* 9.3 (2016), ss. 1943–1952.
- [10] Huawei Yuan ve diğ. “Cooperative Voltage-Balancing Control for Medium-Voltage Electric-Spring System Based on Diode-Clamped Converter and Dual Active Bridges”. İçinde: *IEEE Transactions on Power Electronics* 38.10 (2023), ss. 11997–12009.



159: Rüzgâr Enerjisi Santralleri (RES) Elektrik Üretim Tahmini için Ensemble Yöntemler**Caner Kahraman, Ali Güleç**

SmartpulseTeknoloji

Cem İyigün

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Ülkemizde rüzgâr enerjisi santrallerinden (RES) elde edilen elektrik üretimi son yıllarda istikrarlı bir artış göstermektedir. Elektrik üretiminin önceden tahmin edilmesi, arz ve talep dengesinin sağlanması ve elektrik şebekesinin stabilitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, santrallerin üretim tahminlerini en tutarlı şekilde yapması beklenmektedir.

Üretim tahmininden sapma gösteren santrallere Kesinleşmiş Üretim Programından Sapma Tutarı (KÜPST) ve dengesizlik maliyetleri yansımaktadır. Bu ceza maliyetlerinden kaçınabilmek adına, rüzgâr enerjisi santrallerinin üretim tahminlerini en tutarlı biçimde yapmaları gerekmektedir. Rüzgâr hızı, üretim tahmini için en kritik girdilerden biridir. Bu yüzden hava durumu ve rüzgâr hızı tahmin sağlayıcıları, aynı zamanda rüzgâr enerjisi üretim tahminlerini de sunmaktadır. Bu sebeple, rüzgâr enerjisi santrali sahibi firmalar, en doğru üretim tahminini yapabilmek amacıyla birçok tahmin sağlayıcısından tahmin almayı tercih etmektedirler.

Tahminlerin performansı zaman içinde değişkenlik gösterebilir. Zaman zaman bir tahmin kaynağı daha yüksek performans sergilerken, başka bir zaman diliminde ise farklı bir kaynak daha doğru tahminler sunabilir. Bu durum, santral sahiplerini hangi tahmini kullanacaklarına karar vermede tereddütte bırakabilir. Farklı tahmin kaynakları, çeşitli bilgiler içermekte ve farklı yöntemler kullanılmaktadır. *Ensemble (topluluklaştırma) Yöntemler* ise farklı sayıda tahmini, bu tahminlerdeki farklı bilgileri bir araya getirme potansiyeli ile daha tutarlı bir tahmin oluşturmayı hedefler.

Bu çalışmada, bir rüzgâr enerjisi santrali için *Ensemble Yöntemler* kullanılarak rüzgâr üretim tahminleri üretilmiştir. Yaklaşık bir yıllık dönem için 7 farklı tahmin sağlayıcısının tahminleri (baz tahminler) ve gerçekleşen üretim verisi kullanılmıştır. Üretim tahminleri hem tahmin sapması performansı hem de finansal fayda performansı açısından değerlendirilmiştir. Basit ortalama, performansa göre kırılmış ortalama, performansa göre ağırlıklandırma, regresyon tabanlı yöntemler ve makine öğrenmesi yöntemleri gibi *Ensemble Yöntemleri* uygulanmıştır. Tahmin sapması performanslarının değerlendirilmesinde, kurulu güce göre ayarlanmış ortalama mutlak hata yüzdesi (MAE%) metriği kullanılmıştır.

Çalışma sonuçları, Ensemble Yöntemleri'nin baz tahminlere kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Ensemble Yöntemler, en iyi baz tahminle karşılaştırıldığında %0,4 (MAE%) iyileştirme potansiyeli göstermektedir.

Rüzgâr santralleri için MAE% açısından en iyi tahminin üretilmesi, finansal açıdan en iyi sonucu sağlamamaktadır. Bu nedenle, KÜPST ve dengesizlik maliyetinin toplamı olan Tahmin Hata MaliyetiPiyasası'nda yapılan işlem fiyatının son 1 saatteki ağırlıklı ortalama fiyat olacağı varsayılmıştır. THM'ye göre kırılmış ortalama, THM'ye göre ağırlıklandırma gibi THM özelinde *Ensemble Yöntemler* oluşturularak mevcut *Ensemble Yöntemlere* eklenmiştir.

Ensemble Yöntemlerin en iyi baz tahmine göre THM metriğinde %7,4'lük bir iyileştirme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. KÜPST ve dengesizlik maliyetinin hesaplanma metodolojisine paralel olarak MAE%'deki bir miktar iyileştirme finansal olarak çok daha büyük sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Ayrıca Piyasa Takas Fiyatı (PTF) / Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) oranına göre MAE% metriği açısından daha düşük performans göstermesine rağmen finansal olarak önemli bir katma değer yaratan *Ensemble Yöntemler* olabileceği ortaya koyulmuştur.

Anahtar sözcükler: rüzgâr enerjisi, *Ensemble Yöntemler*, makine öğrenmesi, dengesizlik maliyeti, veri analitiği

GİRİŞ

Ülkemizde rüzgardan elde edilen elektrik, kömür ve doğal gaz gibi ithal ürünlerden elde edilen elektriğin yerini alarak enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında kilit rol oynamaktadır. Son yıllarda hızla artan yatırımlar ile birlikte RES kurulu gücü 2024 Şubat sonu itibariyle 12 GW'a ulaşmıştır [1]. 2023 yılında, RES'ten elde edilen elektrik üretiminin toplam elektrik üretimindeki payı %10,4 olarak gerçekleşmiştir [2].

Rüzgarın doğası gereği RES üretimlerini sıfır hata ile tahmin etmek neredeyse imkânsızdır. Bu yüzden RES'lerin üretim planından sapmaları sıklıkla elektrik şebekesinin dengelenmesi için ekstra bir zorluk getirmektedir. Bu zorluğu azaltmak için dengesizlik maliyeti ve kesinleşmiş günlük üretim programından sapma tutarı (KÜPST) olmak üzere üretim tahminini tutarlı yapmayı teşvik eden iki adet maliyet kalemi bulunmaktadır. Bir başka deyişle RES'lerin ceza maliyetlerinden kaçınmak için üretim tahminlerini en tutarlı şekilde yapmaları gerekmektedir.

Bir RES'e ait üretim tahmini yapabilmek için gerekli olan en önemli girdi rüzgar hızıdır. RES türbinlerinin yerden yükseklikleri farklı seviyelerde olabilir ve rüzgar hızı yerden yüksekliğe bağlı olarak değişir. Bundan dolayı üretim tahminin başarılı olabilmesi için öncelikle türbin seviyesindeki rüzgar hızının doğru tahmin edilmesi gerekir. Rüzgar hızının yanı sıra, rüzgar yönü, sıcaklık, basınç, yağış ve kullanılan türbine ait güç eğrisi gibi değişkenler de tahmin modellerinde sıklıkla girdi olarak kullanılmaktadır [3], [4]. Çoğu model girdi değişkeni hava durumu verisi olduğu için hava durumu tahmin sağlayıcıları aynı zamanda rüzgar üretim tahmini de sağlamaktadır. Birçok RES sahibi firma bu tahmin sağlayıcılarından üretim tahmini alarak ve bu tahminleri kullanarak portföylerini yönetmektedirler. Bazı firmalar farklı tahmin sağlayıcılarından çok sayıda tahmin alarak tek firmadan alınan tahmine kıyasla tahmin tutarlılığını artırma ve risklerini azaltmaya çalışmaktadır.

1.1 Farklı Üretim Tahminlerinden Tahmin Oluşturma (Ensemble Yöntemler)

Farklı kaynaklardan elde edilen tahminlerden yararlanarak yeni bir tahmin (kestirim) oluşturulmasına *Ensemble (topluluklastırma) Yöntemler* denilmektedir. Tahmin sağlayıcılardan elde edilen tahminlere *baz*

tahminler olarak isimlendirirsek bu tahminler kullanılarak tahmin performansı baz tahminlerden daha yüksek olan bir tahmin elde etmek Ensemble Yöntemlerin ana amacıdır. Bu yöntemler en iyi baz tahminin performansını aşabilmekte ve daha kararlı tahminler üretebilmektedir. Buradaki en önemli varsayım ve beklenti her bir baz tahminin farklı bilgiler taşıdığı ve bu tahminlerin topluluklaştırma (birleştirilme) sürecinde birbirlerinin eksiklerini kapatacaklarıdır. Eğer bir baz tahminin performansı her koşulda (örneğin yaz-kış, gece-gündüz, ya da rüzgar hızının düşük-yüksek olması gibi) diğer tüm baz tahminlerin performanslarından belirgin şekilde iyiyse burada *Ensemble Yöntemlerin* fayda sağlama ihtimali düşük olacaktır. Rüzgar üretim tahmininde olduğu gibi farklı sayıda ve farklı kaynaklardan elde edilen tahminlerin olduğu ve modellerin farklı bilgiler içerdikleri durumlarda da *Ensemble Yöntemlerin* kullanılması mümkündür.

Sıklıkla tercih edilen *Ensemble Yöntemleri* arasında **Basit Ortalama, Medyan, Winsorize Ortalama, Performansa Göre Kırpılmış Ortalama (Trimmed Mean), Model Performansı ile Ağırlıklandırma, Regresyon Bazlı Yöntemler ve Makine Öğrenmesi Bazlı Yöntemler** sayılabilir [5], [6], [7].

Bu çalışma çok sayıda rüzgar santrali ile çalışan Smartpulse firması ile yürütülmüştür. Çalışmaya dahil edilen santraller üretim planlaması için çok sayıda tahmin sağlayıcısından tahmin almaktadır. Çalışmamızda tahmin sağlayıcılarının sağladıkları baz tahminlere göre *Ensemble Yöntemler* ile elde edilen tahminlerin hem doğruluk hem de karlılık kriterleri açısından analiz edilmesi hedeflenmiştir.

YÖNTEM ve BULGULAR

Çalışmada tek santral olduğu varsayılmış ve bu santral için toplam 7 farklı tahmin sağlayıcısı bulunmaktadır. Kullanılan veri Ocak 2023 ile Şubat 2024 arası yaklaşık 9000 saatlik bir periyodu kapsamaktadır. Rüzgar üretim tahmin performansını ölçmek için kurulu güce göre ayarlanmış mutlak ortalama hata (mean absolute error) MAE% kullanılmıştır. Mutlak ortalama yüzde hata (MAPE) kullanılmamasının sebebi üretimin sifıra yakın olduğu zaman periyodlarsa hata payının çok yüksek çıkması ve yanıltıcı değerler elde edilmesidir. Denklem (1)'de kullanılan MAE% tanımı verilmektedir.

$$MAE\% = \frac{1}{N} * \sum_{t=1}^N \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{Kurulu\ Güç} \quad (1)$$

y_t anında gerçekleşen üretim miktarını, \hat{y}_t ise t anında üretim tahminini ve N zaman periyodu sayısını göstermektedir.

Tahmin sağlayıcıları üretim tahminlerini farklı zamanlarda güncellemektedir. Tutarlı bir kıyaslama için her tahmin sağlayıcısının gerçek üretim zamanından 40 ve 70 dakika önce verdiği tahminler baz alınmıştır. 70 dakika önce verilen tahmin Gün İçi Piyasasında işlem yapmaya olanak sağlarken, 40 dakika önce verilen tahmin Kesinleşmiş Günlük Üretim Planı (KGÜP) revizyonu yapmayı sağlamaktadır.

Çalışmada kullanılan *Ensemble Yöntemleri*:

- **Basit Ortalama**
- **Performansa Göre Kırpılmış Ortalama**
- **Model Performansına Göre Ağırlıklandırma**
- **Doğrusal Regresyon ile Ağırlıklandırma**
- **LGBM Makine Öğrenmesi Modeli ile Ensemble**

Basit Ortalama yöntemi haricindeki diğer yöntemler için bir eğitim verisine ihtiyaç var. Veri zaman serisi olduğu için Ensemble Yöntemlerini en güncel veri ile eğitilmesi gerekir. Çalışmamızda eğitim verisi son 500 saat olarak alınmıştır. Tahmin periyodu ve eğitim verisi 100 saatte bir kayacak şekilde bir kayan pencere (rolling window) yaklaşımı takip edilmiştir. *Model Performansına Göre Ağırlıklandırma* yönteminde son 500 saatteki $1/MAE\%$ 'nin küpüne göre ağırlıklandırma yapılmıştır.

İlk 500 saatten sonraki tüm test verisinde tahmin sağlayıcılarının ve *Ensemble Yöntemlerin* performansları Tablo-1 verilmiştir. Tabloda 7 adet tahmin sağlayıcısı performanslarına göre sıralanarak TS1, TS2...TS7 olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Baz Modeller ve Ensemble Yöntemlerinin Tahmin Performansları

| Tahmin Sağlayıcısı (TS)/ Ensemble Model | T-70 MAE% | T-40 MAE% | En İyi TS'ye Göre Kıyaslama T-70 |
|--|-----------|-----------|----------------------------------|
| TS1 | 10,9 | 10,5 | - |
| TS2 | 11,8 | 11,1 | +0,9 |
| TS3 | 12,8 | 12,6 | +1,9 |
| TS4 | 14,7 | 14,5 | +3,8 |
| TS5 | 17,1 | 16,8 | +6,2 |
| TS6 | 17,1 | 16,5 | +6,2 |
| TS7 | 17,9 | 17,3 | +7,0 |
| Basit Ortalama | 11,2 | 10,8 | +0,3 |
| Performansa Göre Kırılmış Ortalama | 10,7 | 10,3 | -0,2 |
| Model Performansına Göre Ağırlıklandırma | 10,7 | 10,3 | -0,2 |
| Doğrusal Regresyon | 10,5 | 10,1 | -0,4 |
| LGBM | 10,8 | 10,4 | -0,1 |

2. ve 3. sütunda sırasıyla modellerin T-70 ve T-40 anındaki tahminlerinin MAE% değerleri, son sütunda ise en iyi baz tahmin olan TS1'in T-70'deki MAE% değerine göre modellerin sapmaları verilmiştir. Pozitif değerler TS1'den daha kötü, negatif değerler ise TS1'e göre daha iyi sonuçlar anlamına gelmektedir.

TS1 ve TS2 baz tahminlerinin (70 dakika önceki tahminlerde MAE% performansları sırasıyla %10,9 ve %11,8 iken 40 dakika önceki tahminlerde %10,5 ve %11,1) öne çıktığı görünüyor. TS3'ten itibaren baz tahmin performanslarının hem TS1 ve TS2'ye kıyasla hem de *Ensemble Yöntemlerin* performanslarına kıyasla oldukça düşük olduğu göze çarpıyor. Tüm *Ensemble Yöntemleri* performanslarının TS1 haricindeki baz tahminlerin performansını geride bırakıyor. Sadece *Basit Ortalama* yöntemi TS1'e göre daha kötü bir sonuç verirken, onun dışındaki *Ensemble Yöntemleri* TS1'den daha iyi performans göstermektedir.

Bu sonuçlar *Ensemble Yöntemlerinin* tahmin doğruluğu açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak MAE%'nin yukarı ve aşağı yönlü mutlak sapmaları dikkate aldığı ve dengesizlik maliyeti açısından sapma yönünün farklı anlamları olduğu dikkate alındığında önemli bir soru devreye girmektedir: *RES sahibi bir firmanın ana amacının finansal kâelde etmek olduğu düşünülürse, MAE%'nin en düşük olduğu model bir RES için en uygun tahmin modeli midir?* Bu noktada dengesizlik maliyeti, KÜPST cezası ve bu maliyetleri belirleyen piyasa dinamikleri devreye girmektedir.

2.1 Maliyete Dayalı Performans Analizi - Tahmin Hatası Maliyeti (THM)

Dengesizlik maliyeti olarak değerlendirdiğimiz maliyet aslında bir santral için değil, santralin bağlı olduğu Piyasa Katılımcısı (PK) için hesaplanmaktadır. Bir PK için dengesizlik maliyeti hesaplandığında da ilgili PK'nın altındaki tüm santrallerin ve tüketim portföyünün bir anlamda toplamda yarattığı plan ve gerçekleşme sapmaları hesaba katılmaktadır. Ancak bu tip bir portföy bazlı yaklaşım yerine bu çalışmada her bir RES'in tek başına bir portföy oluşturacağı varsayımını kullanılmıştır. THM'nin içinde bulunan 2 maliyet kaleminden birisi olan KÜPST maliyeti ise santral bazlı hesaplanan bir maliyettir.

RES için dengesizlik maliyeti temelde elektrik satışı ile gerçekleşen üretim arasındaki sapma miktarı için ödenen ceza tutarıdır. Dengesizlik maliyeti toplam sapma miktarına, sapma yönüne, elektriğin Gün Öncesi Piyasası'ndaki fiyatı Piyasa Takas Fiyatı (PTF) ve Dengeleme Güç Piyasası'ndaki fiyatı olan Sistem Marjinal Fiyatı'na (SMF) bağlıdır ve her bir saat için ayrı hesaplanır. Hesaplama Denklem (2)'de verildiği gibi yapılır:

$$E_{DM} = G\ddot{U} + (G\ddot{O}_{Alış} + G\ddot{I}_{Alış} + \dot{I}_{Alış}) - (G\ddot{O}_{Satış} + G\ddot{I}_{Satış} + \dot{I}_{Satış}) \quad (2)$$

burada, Enerji Dengesizlik Miktarını; $G\ddot{U}$ Gerçekleşen Üretim'i; $G\ddot{O}_{Alış}$ Gün Öncesi Piyasası Alış Miktarı, $G\ddot{I}_{Alış}$ Gün İçi Piyasası Alış Miktarı, $\dot{I}_{Alış}$ İkili Anlaşma Alış Miktarı anlamına gelirken; $G\ddot{O}_{Satış}$ Gün Öncesi Piyasası Satış Miktarı'nı, $G\ddot{I}_{Satış}$ Gün İçi Piyasası Satış Miktarı'nı ve $\dot{I}_{Satış}$ ise İkili Anlaşma Satış Miktarı'nı göstermektedir.

Yukarıdaki varsayım ile bir RES'in bağlı olduğu PK'da sadece satış tarafında işlemler olacağı ve alış tarafındaki işlemlerin sadece gün içi piyasasında dengeleme yapmak amacıyla gerçekleşeceğini kabul etmek yanlış olmayacaktır.

Eğer < 0 ise ($\max(.,) * 1,03*$) kadar piyasa katılımcısı Dengeleme Güç Piyasası'na ödeme yaparken, > 0 ise ($\min(.,) * 0,97 *$) kadar Dengesizlik Güç Piyasası'ndan katılımcıya ödeme yapılır. Üretim planından daha yüksek bir üretim yapıldığında, yani sıfırdan büyük olduğunda, ödeme alınsa da aslında burada bir maliyet oluşmaktadır. Bu maliyet Gün Öncesi Piyasası'nda satılmayan elektriğin fiyatından daha düşük bir fiyata satış yapılması ve potansiyel kârın azalması ile ilişkilidir.

Dengesizlik Maliyeti'nin hesaplanmasına bakıldığında sapma yönü, PTF ve SMF arası ilişki çok büyük bir önem kazanmaktadır. PTF/SMF oranının dönemsel dağılımına göre tahminlerin gerçekleşen üretimden düşük ya daha yüksek oluşması aslında asimetric bir maliyet oluşturmaktadır. Bu durumun önemine model sonuçlarından sonra tekrar değinilecektir. *Dengesizlik Maliyeti'nin* yanı sıra bildirilen günlük üretim planından sapma için KÜPST maliyeti de bulunmaktadır. Gün İçi Piyasası'nda kontratlar ilgili saatten 60 dakika önce kapanmaktadır. Bu yüzden Gün İçi Piyasası işlemlerini yapabilmek adına ilgili saatten 70 dakika öncesindeki tahmin kullanılmıştır. KGÜP ise 30 dakika öncesine kadar revize edilebilmektedir. Bu yüzden KGÜP revizyonu için T-40 tahminleri kullanılmıştır. Yapılan Gün İçi Piyasası işlemleri ve KGÜP revizyonlarına göre ise Dengesizlik Maliyeti ve KÜPST hesaplanmıştır. Gün İçi Piyasasında yapılan işlem fiyatı ise son 1 saatteki ağırlıklı ortalama fiyatları olarak alınmıştır.

Tahmindeki sapmalardan kaynaklanan toplam maliyet, dengesizlik maliyeti ve KÜPST maliyetinin toplamı ve bu toplam *Tahmin Hatası Maliyeti (THM)* olarak isimlendirilmiştir. Bu maliyet metriğini *Ensemble Yöntemleri'nde* MAE% yerine ağırlıklandırma metriği olarak da kullanılabilir. Bu doğrultuda *Performansa*

Göre Kırpılmış Ortalama ve Model Performansına Göre Ağırlıklandırma Ensemble Yöntemlerinde MAE % metriği yerine maliyete dayalı performans metriği olan THM kullanılarak Ensemble model sayısı tahmindeki sapmalardan kaynaklanan toplam maliyet, dengesizlik maliyeti ve KÜPST maliyetinin toplamı ve bu toplam Tahmin Hatası Maliyeti (THM) olarak isimlendirilmiştir. Bu maliyet metriğini Ensemble Yöntemleri'nde MAE% yerine ağırlıklandırma metriği olarak da kullanılabilir. Bu doğrultuda Performansa Göre Kırpılmış Ortalama ve Model Performansına Göre Ağırlıklandırma Ensemble Yöntemlerinde MAE% metriği yerine maliyete dayalı performans metriği olan THM kullanılarak Ensemble model sayısı artırılmıştır. Tahmin sağlayıcıların ve *Ensemble Yöntemlerin* saatlik ortalama THM performansları TL cinsinden Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Baz Modeller ve Ensemble Yöntemlerinin THM Performansları

| Tahmin Sağlayıcıları | T-70 MAE% | T-40 MAE% | THM (TL) (Saatlik Ortalama) | En İyi TS'ye Göre THM Kıyaslama |
|---|-----------|-----------|-----------------------------|---------------------------------|
| TS1 | 10,9 | 10,5 | 4023 | 0,0% |
| TS2 | 11,8 | 11,1 | 4417 | +9,8% |
| TS3 | 12,8 | 12,6 | 4437 | +10,3% |
| TS4 | 14,7 | 14,5 | 5350 | +33,0% |
| TS5 | 17,1 | 16,8 | 5719 | +42,1% |
| TS6 | 17,1 | 16,5 | 6622 | +64,6% |
| TS7 | 17,9 | 17,3 | 6180 | +53,6% |
| Basit Ortalama | 11,2 | 10,8 | 4022 | 0,0% |
| Performansa Göre Kırpılmış Ortalama (MAE% bazlı) | 10,7 | 10,3 | 3927 | -2,4% |
| Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (MAE% bazlı) | 10,7 | 10,3 | 3849 | -4,3% |
| Doğrusal Regresyon | 10,5 | 10,1 | 3740 | -7,0% |
| LGBM | 10,8 | 10,4 | 3837 | -4,6% |
| Performansa Göre Kırpılmış Ortalama (THM bazlı) | 11,4 | 11,1 | 3823 | -5,0% |
| Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (THM Bazlı) | 11,0 | 10,6 | 3724 | -7,4% |

Yine 2. ve 3. sütunda modellerin T-70 ve T-40 anındaki tahminlerinin MAE% değerleri verilmiştir. 4. sütunda tahminlerden kaynaklanan dengesizlik maliyeti ve KÜPST maliyetlerinin toplamının (THM) saatlik ortalaması yer alırken, 5. sütunda ise en iyi THM değerine sahip baz tahmin TS1 tahminine göre diğer baz tahminlerin ve *Ensemble Yöntemlerin* THM değerlerinin yüzdesel sapmaları verilmiştir. Negatif değerler THM anlamında iyileştirmeye işaret etmektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Sonuçlar incelendiğinde genel olarak *Ensemble Yöntemleri* MAE% açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. *Ensemble Yöntemleri'nin* başarımları TS1 baz modeli hariç diğer modellerden daha iyidir. Birçok *Ensemble Yaklaşımı'nın* TS1'den de iyi sonuçlar ürettiğini gözlemlenmiştir. THM metriği açısından incelediğinde ise tüm *Ensemble Yöntemleri'nin* tekil tahmin modellerine göre daha düşük THM değerleri vermektedir. *Ensemble Yöntemleri* arasındaki en yüksek THM değerine sahip "Basit Ortalama" yaklaşımı dahi en iyi baz model olan TS1 modeli ile aynı THM değerine sahiptir. MAE%'si en iyi baz model TS1'i geçemeyen *Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (THM bazlı)* yaklaşımı tüm yaklaşımlar dahil en düşük THM sonucunu vermektedir.

Ensemble Yöntemleri'nin başarımları kıyasladığında ise yukarıda belirttiğimiz gibi Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (THM bazlı) modeli THM olarak en iyi sonucu verirken, Doğrusal Regresyon MAE% açısından en iyi sonucu veren Ensemble Yöntemleri olduğu görülmektedir. Bu yöntemin MAE% başarımı tüm baz modellerden de daha iyidir. Öte yandan THM değeri en iyi Ensemble Yöntemi olan Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (THM bazlı) yöntemine de oldukça yakın bir sonuç vermektedir. Basit Ortalama modeli hariç tüm Ensemble Yöntemleri THM metriği açısından en iyi tekil tahmin modeli TS1'e göre tahmin başarımını %2,5'dan fazla iyileştirirken, 7% ve 7,4% iyileştirmelerle Doğrusal Regresyon ve Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (THM bazlı) yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

MAE% değerinin en azlanması THM değerinin de en azlanmasına anlamına gelmemesi dikkat çekicidir. MAE% değeri kötü olan bir tahmin yaklaşımı THM olarak daha iyi sonuç verebilir. Örneğin TS7'nin MAE %'si TS6'ya kıyasla %0,8 daha kötü olmasına rağmen THM değerinde 440 TL/saat daha kötüdür. Benzer bir durumu Ensemble Yöntemleri'nde da görülmektedir. Doğrusal Regresyon yönteminin MAE% değeri en küçük olmasına rağmen THM olarak en düşük sonucu vermemektedir. Performansa Göre Kırılmış Ortalama (MAE% bazlı) ve "Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (MAE% bazlı) Ensemble Yöntemlerinin MAE% açısından aynı başarımları olmasına rağmen Model Performansına Göre Ağırlıklandırma (MAE% bazlı) yaklaşım THM olarak daha iyi sonuç vermektedir.

Makine Öğrenmesi algoritması LGBM'den yararlanılarak yapılan Ensemble Yöntemi tüm baz tahminlerden hem MAE% hem THM metriği açısından daha iyi bir sonuç üretmekle beraber Doğrusal Regresyon'un performansını geçemediği gözlemlenmiştir. Ancak farklı makine öğrenmesi modelleri ve hiperparametreler denenerek model performansları artırılabilir düşünlülmektedir. Öte yandan problem dinamiği kompleks olmadığı için bir makine öğrenmesi modelinin katma değerine gerek duyulmuyor da olabilir.

MAE% ile THM arasındaki ilişkiyi açıklamak için biraz daha detaya indiğimizde PTF/SMF oranının asimetrik dağılımın bu konuda büyük rol oynadığını görmekteyiz. SMF değerinin PTF değerinin ne kadar altında ya da üstünde olacağı, arz ve talepteki değişikliklere göre sistemde enerji açığı ya da fazlası olmasıyla belirlenmektedir. Sistemde dönemsel olarak enerji açığı veya fazlası olma durumundan bu değerlerden biri ön plana çıkmaktadır. Ayrıca PTF'nin üst fiyat limitinin olması ve PTF değerinin bu limite yakın değerler alması da bu orana tek taraflı bir limitleme getirmektedir. Bu nedenlerden dolayı PTF/SMF oranı asimetrik bir dağılıma sahiptir.

PTF/SMF oranının düşük olduğu durumlarda yani SMF'nin PTF'ye göre yüksek olduğu durumlarda düşük üretim tahmini yapan ve gerçekleşen üretimin altında kalan tahmin modellerin THM değerleri de düşük olmaktadır. SMF'nin PTF'den daha büyük olma durumunun çok sık yaşanması üretim tahminlerinin aşağıda kalmasını finansal anlamda ödüllendirmektedir.

Pozitif dengesizlik durumunda $\min(\text{PTF}, \text{SMF}) * 0,97$ 'ye satış, negatif dengesizlik durumunda $\max(\text{PTF}, \text{SMF}) * 1,03$ 'ten alış yapılmaktadır. SMF'nin PTF'den yüksek olduğu durumda ise pozitif dengesizlik yani üretimin gerçekleşenden düşük tahmin edildiği durum, negatif dengesizliğe göre tercih edilecek hale gelmektedir. Bu yüzden son 500 saatteki en iyi THM değerine sahip modelleri ağırlıklandırmak uzun vadede en iyi THM'yi vermektedir.

Özet olarak çalışmadaki temel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir: (i) RES üretim tahmininde Ensemble Yöntemleri tahmin sağlayıcılarından alınan baz modelleri iyileştirmede başarılı sonuçlar üretmiştir. (ii) Üretimi en iyi tahmin eden modelin kullanılması bu modelin finansal anlamda da en iyi sonucu üreteceği anlamına gelmemektedir. (iii) THM değeri kullanılarak ağırlıklandırılan Ensemble Yöntemi en iyi finansal sonucu üretmiştir. (iv) Tercihen aşağıda/yukarıda üretim tahmin etmenin dönemsel olarak PTF/SMF oranına göre değişiklik gösterebileceği ve belli bir riski de barındırdığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışma birkaç yöndeki yeni çalışmalarla ilerletilebileceği düşünülmektedir. Geleneksel (conventional) yaklaşımlar yerine makine öğrenmesi bazlı Ensemble Yöntemleri'ne odaklanılarak farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanılabilir ve hiperparametre seçimi optimizasyonu daha detaylı yapılabilir. Dengesizlik maliyeti için santral bazlı değil portföy bazlı tahmin üretecek *Ensemble Yöntemler* geliştirilebilir. Bu çalışmada tek santral üzerinde yapılan analizler santral sayısı artırılarak modellerin tutarlılığı test edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] TEİAŞ Web Sitesi: https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf
- [2] EPİAŞ Web Sitesi: <https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-generation/ex-post-generation/real-time-generation>
- [3] Yuan-Kang Wu, "A literature review of wind forecasting technology in the world", *IEEE Lausanne Power Tech*, 2007
- [4] Bazionis, Ioannis K., Panagiotis A. Karafotis, Pavlos S. Georgilakis. "A review of short-term wind power probabilistic forecasting and a taxonomy focused on input data." *IET Renewable Power Generation* 16.1, 2022
- [5] J. Scott Armstrong, "Combining Forecasts", *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*, 2021
- [6] Allan Timmermann, "Forecast Combinations", Chapter 4, 2006
- [7] Celal Aksu, Şevket İ. Gunter, "An empirical analysis of the accuracy of SA, OLS, ERLS and NRLS combination forecasts", *International Journal of Forecasting* 8, 1992

161- Belirli Fiyatlı Varlıkların Enerji Ticareti İçin Optimize Varlık Yönetimi Platformu Geliştirilmesi

Ertuğrul Özer, Onur Enginar
Presify Analitik Yazılım A.Ş.

Erman Terciyanlı, Rabia Şeyma Güneş, Canan Şişman Korkmaz

İnavitas Enerji A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Ankara/Türkiye

ÖZET

Günümüzde karbon salınımının çevreye olumsuz etkileri sebebiyle yenilenebilir enerji santralleri geleneksel enerji santrallerinin yerini hızla almaktadır. Bu durum, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının ortaya çıkardığı dezavantajları da gözler önüne sermektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisi, doğası gereği süresizdir ve rastlantısallık içermektedir. Örneğin, güneş enerjisi yalnızca gündüz saatlerinde ve hava açık olduğunda üretilebilirken, rüzgâr enerjisi rüzgârın esmediği dönemlerde üretim yapamamaktadır. Ayrıca, bu santraller hava durumu olaylarından büyük ölçüde etkilendiği için hava durumunda yaşanan belirsizlikler, güneş ve rüzgâr enerjisi santrallerinin üretiminin belirsiz olmasına sebep olmaktadır [6]. Bu durum, enerji arzında dalgalanmalara ve üretim dengesizliklerine yol açmaktadır. Bu sebeple, üretim dengesizliğini yönetmek için, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği enerji sistemlerinde güçlü bir enerji depolama altyapısına ve enerji yönetim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [7]. Enerji yönetim sistemleri rastlantısallık içeren rüzgâr ve güneş enerjisi üretimini ve rastlantısallık içeren tüketimi tahminlemelerini gerçekleştirerek bu tahminleri bir optimizasyon algoritması aracılığı ile sistemin en verimli şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde gerekli planlama operasyonlarını gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Belirtilen probleme mühendislik çözümü sağlanması amacıyla “1501 - TÜBİTAK Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” tarafından desteklenen “Belirli Fiyatlı Varlıkların Enerji Ticareti İçin Optimize Varlık Yönetimi Platformu Geliştirilmesi” isimli proje İnavitas Enerji ve Presify Analitik Yazılım ortaklığı ile hayata geçirilmiştir. Projede, enerji sektöründe faaliyet gösteren üretim, tüketim ve depolama varlıklarının ileriye yönelik enerji fiyatları, üretim ve tüketimlerinin tahminlenerek, tahmin edilen değerlere göre optimum çalışma takvimlerinin çıkarılması ve bu programa göre varlıkların işletilmesini içermektedir. Bu kapsamda, enerji fiyatının sabit ya da belirli olduğu bir sistemde yer alan bir varlıkların optimum şekilde yönetilmesi için teknik ve ticari parametrelerin göz önünde bulundurulduğu bir optimizasyon modülü aracılığıyla varlığın en iyi yönetim takviminin belirlenmesi ve hayata geçirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Proje sürecinde geliştirilen tahmin ve optimizasyon algoritmaları literatürdeki güncel yaklaşımları temel almış olup tahmin hatalarındaki değişim sistem performansını etkilemektedir. Bu bildiride, sistemde gerçekleştirilen tahmin sapmalarının sistem performansına etkisi incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: enerji yönetim sistemi, yenilenebilir enerji, enerji depolama sistemleri, tahminleme, optimizasyon

GİRİŞ

Günümüzde enerji sektörü, karbon salınımının çevreye olan olumsuz etkilerinin giderek daha fazla farkına varılmasıyla birlikte köklü bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel fosil yakıt temelli enerji üretim yöntemleri sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, temiz enerji üretimi sağlama potansiyelleri nedeniyle enerji sektöründe önemli bir yer edinmeye başlamış ve geleneksel enerji santrallerinin yerini hızla almaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması, enerji üretim süreçlerinde yeni zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle, rüzgâr ve güneş enerjisinin doğası gereği süreksiz ve rastlantısal olması, enerji üretiminde öngörülemez dalgalanmalara yol açmakta ve enerji arz güvenliğini tehdit etmektedir. Bu belirsizliklerin üstesinden gelebilmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla, ileri düzey enerji yönetim sistemlerine ve güçlü enerji depolama altyapılarına duyulan ihtiyaç kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu bağlamda, rüzgâr ve güneş enerjisi üretimindeki belirsizliklerin ve tüketim tahminlerindeki rastlantısalıkların etkin bir şekilde yönetilebilmesi, enerji sistemlerinin verimli ve dengeli çalışması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, söz konusu zorluklara çözümler sunmayı amaçlayan bir proje kapsamında geliştirilen tahmin ve optimizasyon algoritmalarını ele almaktadır. Söz konusu algoritmaların performansı birbirinden etkilenmektedir. Bu çalışmada tahminleme çalışmalarında gerçekleşen sapmaların sistem performansına etkisi incelenmektedir. Farklı tahmin sapması seviyelerinin sistem performansı üzerindeki sayısal etkileri ortaya koyulmaktadır.

YÖNTEM

2.1. Literatür Taraması, Enerji Yönetim Sistemleri Optimizasyon Tekniklerinin Sınıflandırılması ve Uygulanacak Tekniğin Seçimi

Optimizasyon tekniklerinin seçimi, problemi matematiksel olarak nasıl formüle edildiğine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Enerji yönetim sistemi optimizasyonu yaklaşımlarında ilk adım optimizasyon amacını ortaya koymaktır. Literatürde sıkça karşılaşılan enerji yönetim sistemi amaçları aşağıda sıralanmıştır.

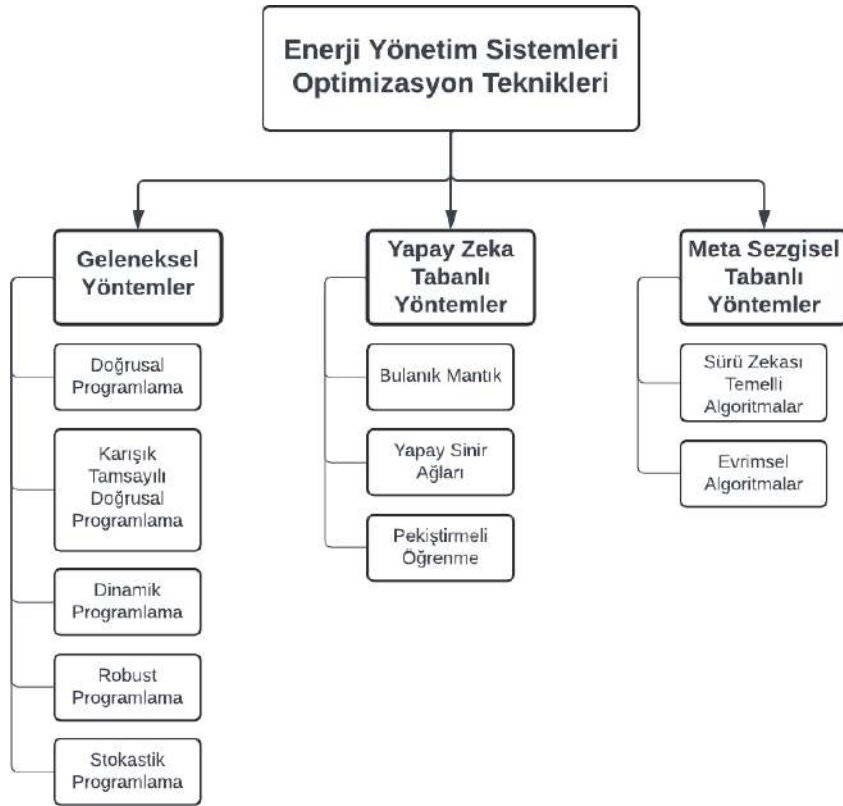
- 1- Enerji Yönetim Sistemi Maliyet Optimizasyonu: Enerji yönetim sistemi optimizasyonunun temel hedeflerinden biri, depolama sistemi maliyetlerini en aza indirmektir. Sistemin yapılandırması ve kontrol stratejileri optimize edilerek depolama çözümleri elde etmek, çeşitli uygulamalar için ekonomik açıdan uygulanabilir hale getirmeyi mümkün kılmaktadır.
- 2- Enerji Yönetim Sistemi Kapasite ve Ömür Optimizasyonu [1]: Enerji yönetim sistemi kapasite ve ömrünün optimizasyonu, depolama sisteminin belirli işletme gereksinimlerini karşılamak için optimal boyut ve yapılandırmanın belirlenmesini içermektedir. Sistemde depolama sisteminin verimliliğini ve ömrünü maksimize etmeyi, bozulma ve performans kaybını en aza indirmeyi amaçlar. Kapasite ve ömür optimizasyonu, enerji yönetim sisteminin genel ekonomik sürdürülebilirliği artırılmaktadır.
- 3- Güç Kalitesi ve Güç Akışı Optimizasyonu [2,3]: Enerji yönetim sistemi optimizasyonu, gerilim dalgalanmalarını azaltmak, frekans değişimlerini düzeltmek ve güç kesintilerini azaltarak güç kalitesini iyileştirmeye odaklanmaktadır. Ayrıca, güç akışı optimizasyonu, depolama sisteminin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak güç talebini ve arzını dengelemeyi hedeflemektedir.
- 4- Sistem İşletme Kar Maksimizasyonu [4,5]: Enerji yönetim sistemi optimizasyonunun bir diğer önemli hedefi, sistemden elde edilen işletme karlarını maksimize etmektir. Depolanan enerjinin pazar koşullarına, talebe dayalı olarak planlanması amaçlanmıştır. Enerji yönetimi ve ticaret stratejilerinin optimize edilmesiyle, enerji yönetim sistemi gelir üretimini ve genel sistem karlılığını maksimize etmek amaçlanmıştır.

Bunların yanında optimal veya verimli bir şekilde enerji yönetim sistemi işletilmesini sağlamak için çeşitli çözüm yaklaşımları kullanılmıştır. Teknik ve ekonomik amaçlarla birlikte optimizasyon çerçevesi ve istenen sonuçlarla enerji yönetimi stratejisinin çözüm süreci tasarımı istenilen sonuçların elde edilmesi için oldukça elzemdir. Literatürde karşılaşılan çözüm yaklaşımlarının genel bir sınıflandırması aşağıdaki gibidir.

- 1- Kesin optimizasyon yöntemleri: Matematiksel Model Temelli Programlama Yöntemleri
- 2- Yaklaşık optimizasyon yöntemleri: Yapay Zeka Tabanlı Yöntemler, Sezgisel ve Meta-Sezgiseller

Matematiksel programlama temelli optimizasyon yöntemleri, adından da anlaşılacağı gibi kesin çözüm yaklaşımlarına aittir. Ancak, bu durumda hesaplama karmaşıklığı artar. Yaklaşık optimizasyon yöntemleri ise optimal bir çözüm garantisi vermez, ancak makul bir süre içinde optimuma veya en yakın sonuca yakın bir çözüm sunar. Sezgisel veya meta-sezgisel optimizasyon teknikleri, makul bir süre içinde en iyi değeri sağlayan yaklaşık algoritmalara aittir ve çevrimiçi veya gerçek zamanlı problemlerde daha çok uygulanabilir. Aşağıdaki Şekil-1’de problemin çözüm yöntemleri sınıflara ayrılmıştır.

Şekil 1: Enerji Yönetim Sistemleri Optimizasyon Teknikleri



2.2. Önerilen Yöntem

Geliştirilen yaklaşımda amaç enerji fiyatının sabit ya da belirli olduğu bir sistemde yer alan bir varlıkların optimum şekilde yönetilmesi olduğu için enerji yönetim sistemi optimizasyon amacı da “Sistem İşletme Gelir Maksimizasyonu” olarak seçilmiştir. Bu amaç kapsamında yenilenebilir enerji üretimindeki ve tüketimindeki rastgeleliği de göz önünde bulundurmak için “Stokastik Doğrusal Programlama” yöntemi benimsenmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanabilmesi

için stokastik tahminlerin Monte Carlo örnekleme yapılmış ve optimizasyona girdi sağlanmıştır. Örnek Ortalama Kestirimi (Sample Average Approximation) metodu ile stokastik optimizasyon problemi çözülmüştür.

Örnek Ortalama Kestirimi yönteminde stokastik fonksiyonun beklenen amaç değeri rastgele bir örnekten türetilen bir örnek ortalama tahmini ile tahmin edilir. Ortaya çıkan örnek ortalama yaklaşım problemi deterministik model belirli bir sayıda çözümler. Stokastik modelin çözümü ve Örnek Ortalama Kestirimi metodu sonucu alınan aday çözümlerin en iyisi arasındaki fark (gap) deterministik modelin çözüm sayısı arttıkça azalır. Sonuç olarak, yalnızca makul bir hesaplama süresi kullanarak bu zor stokastik programlar örnek ortalama kestirimi sayesinde optimale yakın çözümler üretebilmektedir.

Problem stokastik doğrusal programlama ile modellenmiş olup amaç fonksiyonu alınan ve verilen enerjiden doğan karın maksimize edilmesidir. Karar değişkenleri ise şebekeye verilen güç, şebekeden alınan güç, şarj-deşarj miktarı, depolama sistemi şarj durumu, yenilenebilir enerji kısıtlama miktarı gibi değişkenlerden oluşmaktadır.

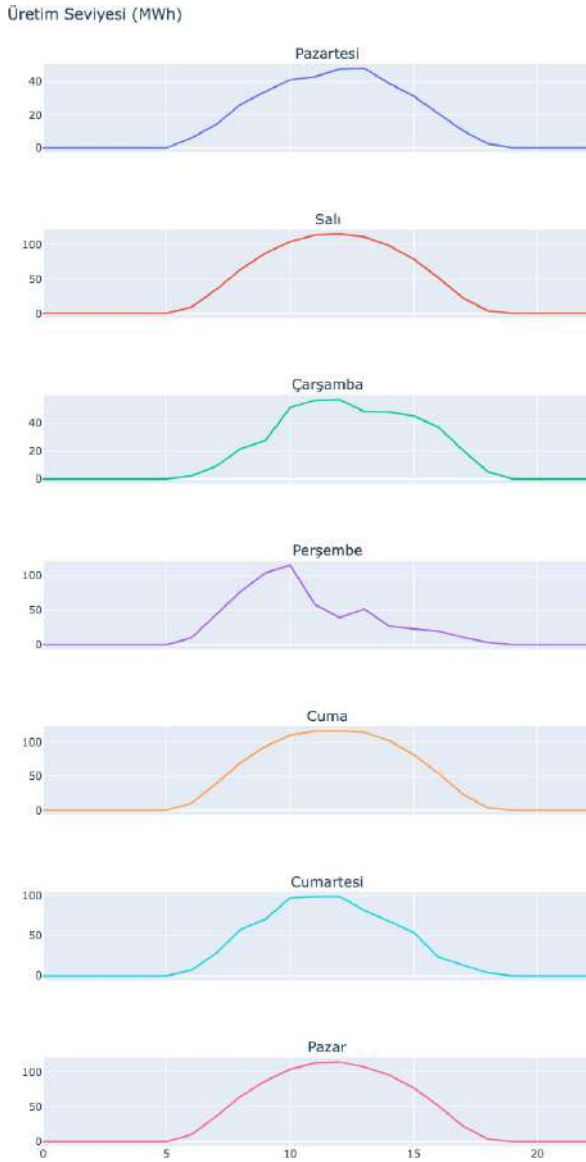
2.3. Model Girdileri

Model girdileri aşağıdaki parametrelerden oluşmaktadır:

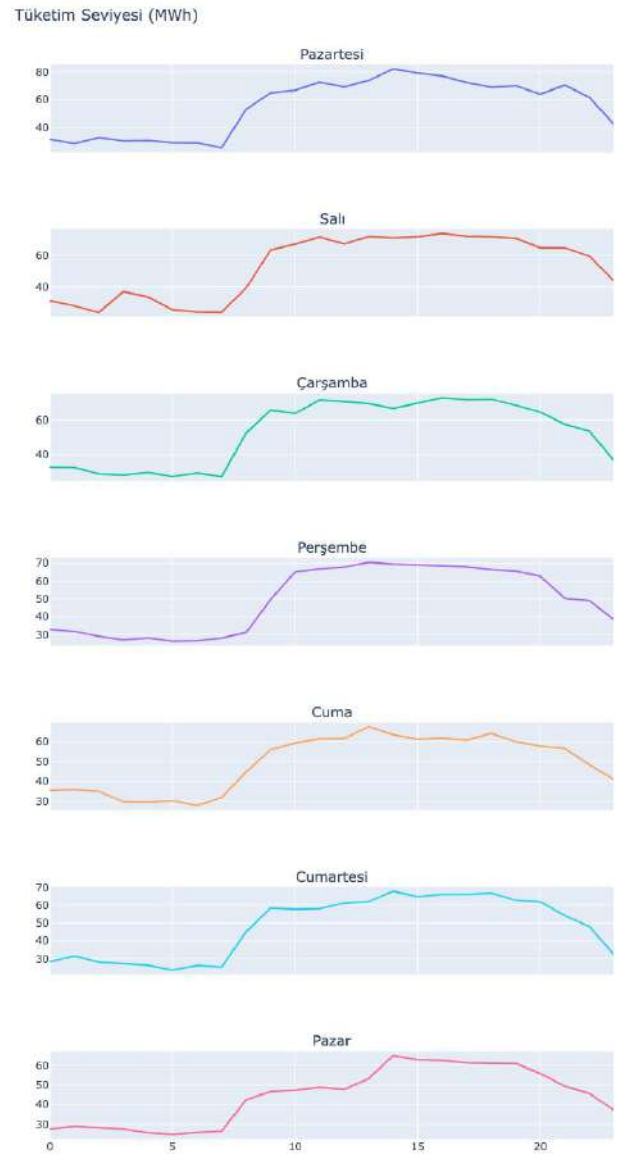
- Saatlik çözünürlükte güneş enerjisi üretim tahminleri
- Saatlik çözünürlükte enerji tüketim birimi tahminleri
- Depolama sistemi parametreleri (toplam enerji kapasitesi, maksimum inverter gücü, verimlilik katsayısı, maksimum ve minimum şarj durumu)
- Değişken olmayan enerji fiyatı

Tahminlerdeki sapma miktarının optimizasyon sonuçlarına etkisinin görülmesi amacıyla saatlik çözünürlükte 7 günlük üretim ve tüketim örnek verisi hazırlanmıştır (Şekil-2, Şekil-3). Sapma verilerinin değişkenliği bu veriler ile yapılan örnekleme ile sağlanmıştır.

Şekil 2: Enerji Üretim Seviyeleri



Şekil 3: Enerji Tüketim Seviyeleri



Sistemde 100 MW/100 MWh depolama sistemi varlığı kabul edilmiştir. Depolama sistemi maksimum ve minimum şarj durumu değerleri sırasıyla %20 ve %80'dir. Çevrim verimliliği %85'dir. Sistemde enerji fiyatı tüm saatler için aynı kabul edilmiş olup 2000 TL/MWh'dir. Sistemde dengesizlik maliyeti her saat için aynı kabul edilmiş olup 120 TL/MWh'dir. Üretim ve tüketim seviyeleri sapmasının normal dağılım gösterdiği kabul edilmiştir:

$$\epsilon \sim N(0, \sigma(x)^2)$$

Hata dağılımı ortalaması 0 olarak kabul edilmiş olup hata standart sapması bir x değişkenine bağlı olarak gösterilmiştir. x değişkeni farklı tahminleri temsil etmektedir. İncelenen durumlar: σ^2 parametresinin ortalama üretim/tüketim değerinin %5'ine, %10'una ve %20'sine eşit olduğu senaryoları içermektedir. Mükemmel bilgi senaryosunda ($\sigma(x)^2=0$) gerçekleşen dengesizlik miktarı 0'a eşit olacağından dolayı incelemeye alınmamıştır.

BULGULAR ve YORUMLAR

3.1. Senaryo 1:

$$\sigma(x)^2 = 0.05 * \bar{y}$$

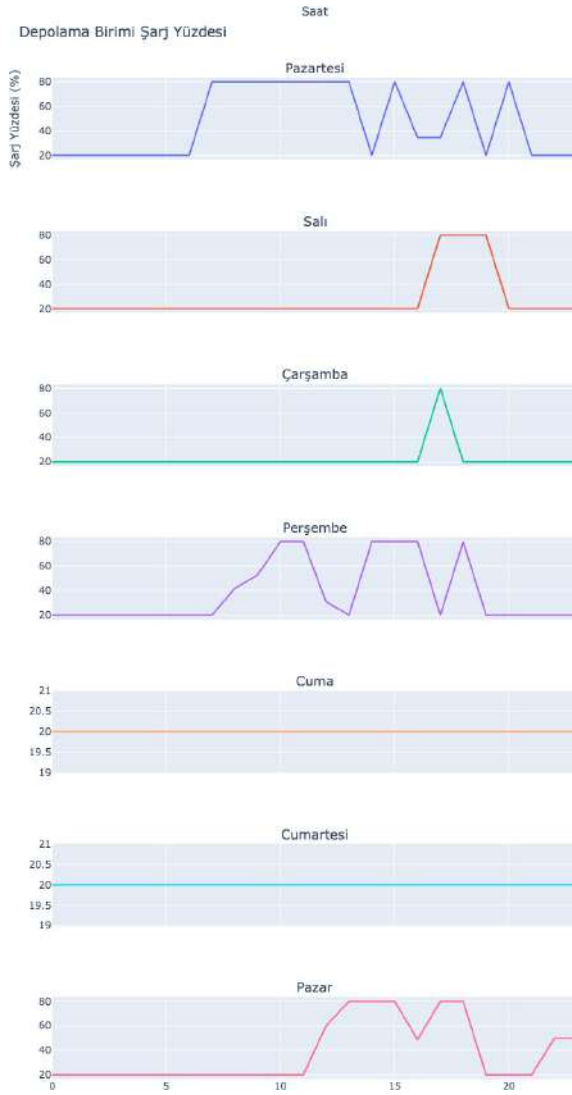
$$\sigma(x)^2 = 0.05 * \bar{w}$$

\bar{y} : enerji üretim ortalaması

\bar{w} : enerji tüketim ortalaması

Senaryo 1 sonuçları Şekil-4, Şekil-5'te görselleştirilmiştir. Şekil-4'te Senaryo 1'de ortaya çıkan batarya kararları yer almaktadır. Şekil-5'te ise Örnek Ortalama Kestirimi örneklem kümesindeki bir senaryonun görselleştirilmesidir. Gerçekleştirilen optimizasyon Şekil-5'te biri belirtilen tüm senaryoların ortalama kazancının maksimizasyonunu gerçekleştirmektedir. Örnek Ortalama Kestirim kümesi büyüklüğü 1000'dir. Ortalama saatlik dengesizlik maliyeti 710,30 TL'dir. Ortalama saatlik kazanç -130.622,10 TL'dir.

Şekil 4: Senaryo 1, Depolama Birimi Şarj Yüzdesi Grafiği



Şekil 5: Senaryo 1, Dengesizlik Miktarı Grafiği



3.2. Senaryo 2:

$$\sigma(x)^2 = 0.1 * \bar{y}$$

$$\sigma(x)^2 = 0.1 * \bar{w}$$

\bar{y} : enerji üretim ortalaması

\bar{w} : enerji tüketim ortalaması

Senaryo 2 sonuçları Şekil-6, Şekil-7’de görselleştirilmiştir. Şekil-6’te Senaryo 2’de ortaya çıkan batarya kararları yer almaktadır. Şekil-7’te ise Örnek Ortalama Kestirimi örneklem kümesindeki bir senaryonun görselleştirilmesidir. Gerçekleştirilen optimizasyon Şekil-7’te biri belirtilen tüm senaryoların ortalama kazancının maksimizasyonunu gerçekleştirmektedir. Örnek Ortalama Kestirim kümesi büyüklüğü 1000’dir. Ortalama saatlik dengesizlik maliyeti 1.630,30 TL’dir. Ortalama saatlik kazanç -132.826,40 TL’dir.

Şekil 6: Senaryo 2, Depolama Birimi Şarj Yüzdesi Grafiği



Şekil 7: Senaryo 2, Dengesizlik Miktarı Grafiği

3.3. Senaryo 3:

$$\sigma(x)^2 = 0.2 * \bar{y}$$

$$\sigma(x)^2 = 0.2 * \bar{w}$$

\bar{y} : enerji üretim ortalaması

\bar{w} : enerji tüketim ortalaması

Senaryo 3 sonuçları Şekil-8, Şekil-9'de görselleştirilmiştir. Şekil-8'te Senaryo 3'te ortaya çıkan batarya kararları yer almaktadır. Şekil-9'te ise Örnek Ortalama Kestirimi örneklem kümesindeki bir senaryonun görselleştirilmesidir. Gerçekleştirilen optimizasyon Şekil-9'te biri belirtilen tüm senaryoların ortalama kazancının maksimizasyonunu gerçekleştirmektedir. Örnek Ortalama Kestirim kümesi büyüklüğü 1000'dir. Ortalama saatlik dengesizlik maliyeti 3.655,90 TL'dir. Ortalama saatlik kazanç -135.992,90 TL'dir.



Şekil 8: Senaryo 3, Depolama Birimi Şarj Yüzdesi Grafiği



Şekil 9: Senaryo 3, Dengesizlik Miktarı Grafiği

SONUÇLAR

Enerji yönetim sistemlerinde, enerji üretim ve tüketim tahminlemesinin doğruluğu, sistemin kazanç optimizasyonunun performansını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, tahminleme hatalarının doğrudan sistemin maliyet verimliliğini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Üretim tahminlerindeki sapmalar, enerji arzı ve talep arasındaki dengeyi bozarak, ya gereksiz enerji fazlasına neden olmakta ya da arz yetersizliği sonucu gereksiz alım ya da satım maliyetlerine neden olmaktadır. Benzer şekilde, tüketim tahminlerindeki hatalar, optimal enerji dağıtım planlamalarını sekteye uğratarak sistemin potansiyel kazancını düşürmektedir.

Sonuç olarak, enerji üretim ve tüketim tahminlemesinin doğruluğunun artırılması, enerji yönetim sistemlerinin kazanç optimizasyonunu önemli ölçüde iyileştirmekte ve maliyet etkinliği sağlamaktadır. Bu nedenle, tahminleme modellerinin doğruluğunun artırılması, enerji yönetim stratejilerinin ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]Y. Liu, X. Wu, J. Du, Z. Song, and G. Wu, “Optimal sizing of a wind-energy storage system considering battery life,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 2470–2483, 2020
- [2] D. Keles, ‘Chapter 14 - Introduction,’ in *Europe’s Energy Transition*, Academic Press, 2017
- [3]K. Dykes et al., “Opportunities for Research and Development of Hybrid Power Plants,” NREL/TP--5000- 75026, 2020
- [4] IRENA (2022), Grid codes for renewable powered systems, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [5]E. Bullich-Massagué, R. Ferrer-San-José, M. Aragüés-Peñalba, L. Serrano-Salamanca, C. Pacheco-Navas, and O. Gomis-Bellmunt, “Power plant control in large-scale photovoltaic plants: design, implementation and validation in a 9.4 MW photovoltaic plant,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 1, pp. 50–62, 2016
- [6] Cabrera-Tobar, A., Massi Pavan, A., Petrone, G., & Spagnuolo, G. (2022). A review of the optimization and control techniques in the presence of uncertainties for the energy management of Microgrids. *Energies*, 15(23), 9114.
- [7] Hannan, M. A., Ker, P. J., Mansor, M., Lipu, M. H., Al-Shetwi, A. Q., Alghamdi, S. M., Begum, R. A., & Tiong, S. K. (2023). Recent advancement of Energy Internet for Emerging Energy Management Technologies: Key features, potential applications, methods and open issues. *Energy Reports*, 10, 3970–3992

163: Düşük Karbonlu Enerjiye Geçişin Doğu Akdeniz'in Enerji Jeopolitiğine Yansımaları**Meltem Üzel**ASBÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü,
Enerji Ekonomisi ve Yönetimi Yüksek Lisans Programı Mezunu**ÖZET**

Enerji kaynakları fosil temelli olsun ya da yenilenebilir, devletler arasında var olan iş birliklerini artıran ya da esaslı sorunları karmaşıklaştıran jeopolitik unsurlardır. Bu çalışma, Doğu Akdeniz'de yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinin bölgenin enerji jeopolitiğine yansımalarını incelemektedir. Bu kapsamda öncelikle Doğu Akdeniz'in enerji jeopolitiğinin genel doğasını ele almakta ve ardından bölge ülkelerinin enerji görünümüne, ulusal iklim ve enerji hedeflerine ve enerji geçişine yönelik büyük çaplı yatırımlarına odaklanmaktadır. Çalışma, enerji geçişinin enerji güvenliği boyutunu ve yenilenebilir elektrik üretimi ve elektrifikasyonun ara bağlantı projeleri ile sınır-ötesi hale gelmesini karşılıklı bağımlılık ilişkileri ve iş birliği dinamikleri bağlamında bölge ve bölge dışı aktör analizi yaparak irdelemekte ve bölgenin enerji jeopolitiğini ne yönde etkileyeceğine dair bölge uzmanlarının farklı perspektiflerine yer vermektedir. Çalışma geçiş sürecinin sadece bölgesel ekonomik iş birliği fırsatları değil, aynı zamanda mevcut jeopolitik sorunları derinleştirme ve/veya yeni istikrarsızlıkları çıkarma potansiyeli barındırdığı sonucuna varmaktadır. Enerji geçişinin kapsayıcı ve barışçıl olabilmesi için AB ile bölgeselleşmenin ve bölgede uzlaşmacı bir enerji diplomasi kültürünün geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji jeopolitik, Doğu Akdeniz, düşük karbonlu enerjiye geçiş, elektrifikasyon, enerji arz güvenliği.

ABSTRACT

Energy resources, whether fossil-based or renewable, are geopolitical elements that can enhance existing cooperation among states or complicate fundamental problems. This study examines the implications of the transition to renewable energy sources in the Eastern Mediterranean on the energy geopolitics of the region. In this context, it first discusses the general nature of the energy geopolitics of the Eastern Mediterranean and then focuses on the energy outlooks of the countries in the region, their national climate and energy targets, and their large-scale investments in the energy transition. The study examines the energy security dimension of the energy transition and the cross-border transformation of renewable electricity generation and electrification through interconnection projects by conducting regional and non-regional actor analysis in the context of interdependence relations and cooperation dynamics, and presents the different perspectives of regional experts on how it will affect the energy geopolitics of the region. The study concludes that the transition process holds not only opportunities for regional economic cooperation, but also the potential to deepen existing geopolitical problems and/or create new instabilities. It points out that for the energy transition to be inclusive and peaceful, regionalization with the EU and the development of a culture of consensual energy diplomacy in the region are necessary.

Keywords: Energy geopolitics, Eastern Mediterranean, low carbon energy transition, electrification, energy supply security.

GİRİŞ

Enerji kaynaklarına ve enerji yollarına hâkim olma ve yönetme becerisi ister devlet olsun ister uluslararası kuruluş veya şirket, aktörlere çok geniş fırsatlar sunmaktadır. Bu nedenle günümüzde, enerji güvenliği ve enerjiye erişim tüm ülkelerin en yüksek öncelikleri arasındadır ve bunlar halen enerji karışımında yüksek paya sahip fosil yakıtlar sayesinde elde edilmektedir. Diğer yandan küresel iklim değişikliği ve iklim uyum politikaları ve uygulamaları, uzun vadede devletleri, eylemlerini yenilenebilir enerji veya sürdürülebilir temiz enerji sistemlerine yönlendirmektedir. Bu da küresel anlamda yeni bir enerjiye geçiş anlamına gelmektedir. Zira, 2015 yılında Paris'te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilen Paris Anlaşması, iklim değişikliği konusunda devletleri harekete geçirici tarihi bir adım olmuştur. Söz konusu Konferans'tan günümüze kadar Akdeniz ülkelerinin neredeyse tamamı, iklim değişikliğinin azaltılması ve adaptasyonuna yönelik iddialı Ulusal Katkı Beyanları (NDC) geliştirerek enerji süreçlerini değiştirmeyi taahhüt etmiştir. Bu taahhütler enerji sektöründeki ve özellikle yenilenebilir enerji ve enerji verimliliğine yönelik eylemlere odaklanmaktadır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Akdeniz bölgesini, özellikle güney ve doğu kesimlerini küresel ısınmanın etkilerine karşı dünyanın en savunmasız bölgelerinden biri olarak

tanımlamıştır¹. Bölgedeki çoğu ülke halihazırda sıcaklık artışı, artan su kıtlığı, kuraklık, çölleşme ve sıklaşan orman yangınları ile mücadele etmektedir. İklim değişikliği, çevresel, sosyal ve ekonomik etkileri nedeniyle bölgede istikrarsız olan sosyo-ekonomik koşullar ve özellikle Güney ve Doğu Akdeniz bölgelerindeki kırılgan siyasi sistemler üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli araştırmalar, bölgenin hidrokarbon rezervlerinin keşfedildiği görece yeni ve önemi artan bir saha olmasının yanı sıra başlıca güneş ve rüzgâr olmak üzere, büyük miktarda yenilenebilir enerji potansiyeline de sahip olduğuna işaret etmektedir.

Bu bildirin amacı **Doğu Akdeniz'e kıyıdaş ülkelerin** iklim eylemine yönelik taahhüt ettikleri ulusal hedefleri inceleyerek yenilenebilir enerjiye geçişin Doğu Akdeniz'in enerji jeopolitiğinde ne tür yansımalar yaratacağını tartışmaktır. Çalışmanın odağında Doğu Akdeniz'in olmasının nedeni bölgenin adaları ve hinterlandı ile birlikte farklı kültürlerin, ticaret ve ulaşım yollarının kavşak noktası, göçlerin hareket alanı ve askerî açıdan da stratejik bir oyun sahnesi olmasından kaynaklanmaktadır. Doğu Akdeniz bölgesi sadece bölge ülkelerinin değil, dünyadaki hegemon devletlerin de güç mücadelesini bu bölgede sürdürdüğü oldukça karmaşık meseleler içeren, kriz ve savaşa sürükleyen faktörler barındırmaktadır.

Bu noktadan hareketle çalışma ikinci bölümde, **Doğu Akdeniz'in enerji jeopolitiğinin** doğasına dair bir analiz ortaya koymaktadır. Üçüncü bölümde Doğu Akdeniz bölgesindeki NDC sürecinin durumuna ilişkin karşılaştırmalı ve güncel bir değerlendirme sunmakta ve 2024 yılına kadar NDC sunmuş olan bölgedeki 9 ülkenin (Libya, Mısır, Filistin, İsrail, Suriye, Lübnan, Kıbrıs, Türkiye ve Yunanistan) ulusal hedeflerindeki enerji planlarına bakmaktadır. Ardından enerji geçişi bağlamında oluşmaya başlayan **karşılıklı bağımlılık, iş birliği ve anlaşmazlık** potansiyellerini **yenilenebilir elektrik üretimi, elektrifikasyonun ara bağlantı projeleri ile sınır-ötesi hale gelmesi ve dışa bağımlılık** (bölge dışı aktörler ile küresel etkileşimler) ilişkileri temelinde değerlendirmektedir.

Çalışma, iklim kriziyle küresel mücadele kapsamında Doğu Akdeniz ülkelerinin düşük karbonlu ekonomilere geçiş ve fosil yakıtlardan aşamalı olarak çıkış eylemlerinin uzun vadede bölgedeki jeopolitik dinamiklerle etkileşimine işaret etmektedir. Enerji geçişinin barışçıl olabilmesi için bölgenin AB ile bölgeselleşmesi ve bölgede uzlaşmacı bir enerji diplomasi kültürünün geliştirilmesi önerilmektedir. Bu bağlamda Türkiye'nin Akdeniz'de ulusal çıkarlarından taviz vermeyen, barış ve istikrar temelli bir dış politika vizyonu ve buna uyumlu bir bölgesel enerji stratejisi uygulaması, bölgenin enerji geçişine ışık tutacaktır.

Çalışma kurgulanırken küresel enerji geçişi ve yenilenebilir enerji alanındaki akademik çalışmalara; uluslararası ilişkiler ve enerji jeopolitiği alanında teori ve kavramlara yer veren kaynaklara; Doğu Akdeniz fosil yakıt temelli enerji jeopolitiği ve enerji geçişi ile ilgili kitap ve makalelere; IRENA, IEA ve EIA (ABD Enerji Bilgi Yönetim İdaresi) gibi kuruluşların istatistiksel veri ve analiz raporlarına; ve Ulusal Katkı Beyanları, iklim sözleşmeleri ve ulusal enerji planları gibi birincil kaynaklara başvuruda bulunulmuştur.

¹ Ali, E., W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N.J.M. Hilmi, G. Le Cozannet, and P. Lionello, 2022: Cross- Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233-2272, doi:10.1017/9781009325844.021.

DOĞU AKDENİZ ENERJİ JEOPOLİTİĞİNİN DOĞASI

Uluslararası kabul gören coğrafi tanımlara göre Doğu Akdeniz, 27° E boylamının doğusunda kalan deniz sahasıdır². Geniş alan tanımında Doğu Akdeniz'in Libya Denizi, İyon Denizi, Adriyatik Denizi ve dolayısıyla Güneydoğu Avrupa'daki güney Arnavutluk, batıda İtalya'nın en uzak güneydoğu kıyılarına kadar uzandığı görülebilmektedir. Kıyı ülkeler ve adaların yanı sıra Ürdün'ün dahi iklimsel ve ekonomik olarak bölgenin bir parçası ya da hinterlandı olarak bahsedilen kaynaklara rastlamak mümkündür³. Fakat bu çalışma, uluslararası kabul gören tanımları temel alarak Doğu Akdeniz'in tüm kıyı ülkelerini, Kıbrıs adasını, Süveyş kanalı, Boğazlar ve Marmaris-Rodos geçitlerini; yani Libya, Mısır, Filistin, İsrail, Suriye, Lübnan, Kıbrıs adası (Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti ve Güney Kıbrıs Rum Yönetimi), Türkiye ve adaları, Yunanistan ve adalarını kapsamaktadır.

Doğu Akdeniz bölgesi, adaları ve hinterlandı ile birlikte farklı kültürlerin, ticaret ve ulaşım yollarının kavşak noktası, göçlerin hareket alanı ve askerî açıdan da stratejik bir oyun sahnesidir. Bu yüzden tarihte jeopolitik açıdan dünyanın mühim ve vazgeçilmez bölgeleri arasında yer almaktadır. Doğu Akdeniz bölgesi, sadece bölge ülkelerinin değil dünyadaki hegomon devletlerin de güç mücadelesini bu bölgede sürdürdüğü karmaşık, kriz ve savaşa sürükleyen faktörler barındırmaktadır. Bunlar: Deniz yetki alanı ve sınır uyuşmazlıkları, devlet olarak tanınmama, terör gibi asimetric tehditler, illegal silahlanma, etnik ve mezhep çatışmaları, uyuşturucu ve insan kaçakçılığı, hidrokarbon yataklarında rekabet vb gibi⁴.

Dünya tarihinde sanayi devrimi gibi büyük değişimlerin yeni koşullar getirdiği ve beraberinde jeopolitik değişimleri gerçekleştirdiği söylenebilir. Zengin hidrokarbon kaynaklı enerji rezervlerine sahip Mezopotamya, Orta Doğu ve Kafkaslara olan coğrafi yakınlığı göz önüne alındığında 20. yüzyılın başından itibaren buna bağlı oluşan yeni koşullar Doğu Akdeniz'deki jeopolitik değişimde de rol oynamıştır. Son otuz yıllık dönemde ise bölgede keşfi gerçekleşen doğalgaz kaynakları, Doğu Akdeniz enerji jeopolitiğinde yeni dengelerin ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir. Bölge ülkelerinin biri veya birkaçında meydana gelen enerji kaynakları ile ilgili siyasi hareketlenmeler tüm bölgeyi sadece siyasi ve diplomatik değil, ekonomik ve askerî açıdan da etkisi altına almakta ve bölge dışı aktörleri de konuya dahil etmektedir. Uzmanların çok değişkenli bir denkleme benzettiği bölgenin mevcut enerji jeopolitiği aşağıdaki temalarla ele alınabilir:

i. Bölge önemli bir hidrokarbon enerji kaynakları koridorudur: Doğu Akdeniz, Orta Doğu'daki petrol ve doğal gaz rezervlerinin ve Hazar Bölgesinin hidrokarbon kaynaklarının Avrupa'ya ve dünyaya nakli için önemli ve vazgeçilmez bir güzergâh vazifesi görmektedir. Bunun yanı sıra halihazırda işleyen 4 doğal gaz boru hattı altyapısına ve 10 LNG altyapısına⁵ ev sahipliği yaparak ve kaynakları doğrudan dünya piyasalarına boru hatları ve deniz taşımacılığı ile aktararak bir enerji nakil merkezi olmaktadır.

² Murat Koray, Doğu Akdeniz'in Jeopolitik ve Jeostratejik Önemi, Teknolojik Dönüşümler ve Denizaltıların Rolü, 19 Mart 2020, https://tasam.org/tr-TR/Icerik/53558/dogu_akdenizin_jeopolitik_ve_jeostratejik_onemi_teknolojik_donusumler_ve_denizaltilarin_rolu

³ Eastern Mediterranean, Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Eastern_Mediterranean, son güncelleme 26 Kasım 2022.

⁴ Murat Koray, age.

ii. Bölge, hidrokarbon rezervlerinin keşfedildiği görece yeni ve önemi artan bir sahadır: Yükselen enerji fiyatlarının etkisiyle ve sismik arama ve sondaj teknolojisindeki gelişmeler sayesinde 1990'lı yıllardan itibaren bölgede büyük çaplı keşifler ve önemli miktarda doğalgaz rezervleri ortaya çıkarılmıştır. Bu keşifler uzmanların en azından bir yarım yüzyıl kadar Doğu Akdeniz'in dünyanın önemli doğal gaz sahalarından biri olacağı, sadece bölge ülkeleri için değil potansiyel olarak Avrupa ve diğer ülkeler için de hizmet edeceği yönünde değerlendirmeler yapmasına vesile olmuştur. 2010 tarihli ABD Jeolojik Araştırma Raporu'na göre bölgenin deniz tabanında en az 122 trilyon standart fit küp (tscf) doğal gaz olduğu tahmin edilmektedir. Bu araştırma Kıbrıs, Mısır, İsrail, Lübnan ve Filistin'in suları olan Levant Havzasına işaret etmektedir⁶.

Doğu Akdeniz bölgesinde dört temel enerji sahasından söz etmek mümkündür. Bunlar; Kıbrıs Adası'nın güneyindeki Afrodit sahası, Kıbrıs Adası ile İsrail arasında bulunan Leviathan sahası, Mısır'ın kuzeyinde yer alan Nil sahası ve Kıbrıs Adası ile Girit Adası'nın güneydoğusunda kalan Herodot sahasıdır⁷. ABD Enerji Bilgi Yönetim İdaresi'nin (EIA) Oil & Gas Journal'ın 1 Ocak 2022 itibarıyla yaptığı tahminlere referansla yaptığı analize göre, Doğu Akdeniz'deki en büyük doğal gaz rezervlerine Mısır, ikinci olarak Mısır'daki kanıtlanmış rezervlerden önemli ölçüde daha küçük hacimlerle İsrail sahiptir. Yunanistan, Ürdün ve Türkiye, 1 trilyon fit küpün (Tcf) altında kanıtlanmış doğal gaz rezervine sahiptir. Kıbrıs ve Lübnan'ın kanıtlanmış doğal gaz rezervlerine ilişkin veriler mevcut değildir⁸.

iii. Bölgede hidrokarbon kaynaklarının ve deniz alanlarının paylaşımı sorunu bulunmaktadır: Rezerv sahalarının keşfi üzerine arama ve sondaj faaliyetlerini hızlandırmak ve hak iddia etmek için Akdeniz'e kıyası olan ülkeler kendilerine ait kıta sahanlığı ve münhasır ekonomik bölgeleri ilan etmiş ancak ihtilafli ve bloklaşan durumlar ortaya çıkmıştır. Örneğin Türk-Yunan ve Kıbrıs deniz yetki alanları konusu kendini Kıbrıs adasının tek temsilcisi olarak konumlandıran Güney Kıbrıs Rum Yönetimi'nin, AB'nin desteği ile tek taraflı olarak ilan ettiği münhasır ekonomik bölgeyi 13 sektöre bölmesiyle çok aktörlü bir Doğu Akdeniz krizi haline dönüşmüştür.

iv. Rekabetin olduğu keşif ve sondaj faaliyetlerinde uluslararası aktörler yer almaktadır: Hidrokarbon kaynaklarının ve deniz yetki alanlarının paylaşımı sorununda bölge ve bölge dışı devletlerin ve aktörlerin rol aldığı yoğun bir rekabet ortamı bulunmaktadır. Doğu Akdeniz'de faaliyet gösteren başlıca şirketler arasında ABD'li Exxon Mobil, Chevron ve Noble, Fransız Total, Egyptian General Petroleum Corporation, İtalyan Eni, Güney Koreli Kogas, Katar Petroleum, İngiliz BP, Londra temelli bağımsız Energean firması, İsraili Delek ve Avner firmaları, Rus NOVATEK, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) yer almaktadır⁹. Bunun yanı sıra ABD, AB ve Rusya olmak üzere bölge dışı devletlerin dahil olması ve Amerikan, Rus, İngiliz ve Fransız donanmalarının bölgedeki askeri varlığı, Doğu Akdeniz enerji sorunsalına çok boyutlu ve küresel bir nitelik kazandırmaktadır.

⁵ Analysis: Eastern Mediterranean, U.S. Energy Information Administration, [International - U.S. Energy Information Administration \(EIA\)](https://www.eia.gov/international/-/U.S.-Energy-Information-Administration-(EIA),-son-güncelleme-16-Kasım-2022), son güncelleme 16 Kasım 2022.

⁶ James Stocker, No EEZ Solution: The Politics of Oil and Gas in the Eastern Mediterranean, Middle East Journal, Autumn 2012, Vol. 66, No. 4 (Autumn 2012), sayfa 579.

Published by: Middle East Institute, Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/23361618>;

John V. Bowlus, Eastern Mediterranean gas: Testing the field, European Council on Foreign Relations, https://ecfr.eu/special/eastern_med_gas_fields#:~:text=The%20United%20States%20Geological%20Survey,feet%20of%20technically%20recoverable%20gas

⁷ A. G Yaşa. ve M.Yılmaz, Doğu Akdeniz'de Bulunan Doğalgaz Rezervlerinin Bölgesel Enerji Politikalarına ve Rekabete Etkisi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 32, 1(1-17), 2022, sayfa 12.

⁸ Analysis: Eastern Mediterranean, U.S. Energy Information Administration, [International - U.S. Energy Information Administration \(EIA\)](https://www.eia.gov/international/-/U.S.-Energy-Information-Administration-(EIA),-son-güncelleme-16-Kasım-2022), son güncelleme 16 Kasım 2022.

⁹ 10 soruda Doğu Akdeniz'de enerji denklemi <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/10-soruda-dogu-akdeniz-de-enerji-denklemi/1504248>; Analysis: Eastern Mediterranean, U.S. Energy Information Administration https://www.eia.gov/international/analysis/regions-of-interest/Eastern_Mediterranean

v. Akdeniz, çevresel etkiler nedeniyle iklim değişikliğine maruz kalmaktadır: WWF'nin (Dünya Doğayı Koruma Vakfı) 2021 yılında yayınladığı bir rapora göre Akdeniz'de sıcaklıkların küresel ortalamadan yüzde 20 daha hızlı arttığını belirtmekte ve önümüzdeki yıllarda da devam edecek bu artışla, 2100'e gelindiğinde deniz seviyesinin bir metreden fazla yükseleceği ve bölge nüfusunun üçte birinin bu durumdan etkileneceği tahmin edilmektedir. Söz konusu rapora göre, Akdeniz, aynı zamanda dünyanın en yoğun sömürülen denizlerinden biri ve birbiriyle rekabet içinde olan ekonomik sektörler ve çevresel baskılar nedeniyle kırılma noktasına yaklaşmaktadır¹⁰. Doğu Akdeniz'deki tüm devletler, bölge ölçeğinde birbiriyle ilişkilendirilmiş geniş bir tedbirler bütünü içinde Akdeniz Bölgesi'nin korunması ve geliştirilmesi için kendi aralarında doğrudan veya ilgili uluslararası kuruluşların yakın işbirliğini zorunlu kılan **Barselona Sözleşmesi'ni (1976)** imzalamıştır¹¹.

vi. Bölgede, küresel iklim eylemi ve AB Yeşil Mutabakat 2050 hedefleri çerçevesinde yenilenebilir enerji ve temiz enerjiye geçiş süreci başlamıştır: Bu çalışmanın kapsadığı ülkeler Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamındaki Paris İklim Anlaşması'nın tarafıdır. Fakat Libya, Anlaşmayı onaylamış olmasına rağmen, Ulusal Katkı Beyanını henüz BM'nin ilgili makamına bildirmemiştir. Paris Anlaşması'nın uzun dönemli hedefi, endüstriyelleşme öncesi döneme kıyasen küresel sıcaklık artışının 2°C'nin olabildiğince altında tutulmasıdır. Bu hedef fosil yakıt (petrol, kömür) kullanımının tedricen azaltılarak, yenilenebilir enerjiye yönelinmesini gerektirmektedir¹². Diğer yandan Avrupa Konseyi Yeşil Mutabakatı ve İklim Yasası kapsamında 2050 ilkim nötr olma yolunda AB üye devletleri önümüzdeki yıllarda mümkün olan en karbonsuz ekonomiye doğru temel bir dönüşümden geçeceklerdir. Bu iki önemli gelişme bölge ülkelerini bu dönüşüm süreçlerine entegre olmayı gerektirmektedir. Örneğin zorunlu hale getirilecek karbon ticareti ve karbon vergilendirilmesi üye devlet olarak Yunanistan ve Kıbrıs ve aday ülke olarak Türkiye'yi önemli ölçüde etkileyecektir. Türkiye'nin en büyük ihracat pazarı Avrupa Birliği'nin 2050'de karbon nötr olma hedefiyle karbon salımı yüksek ürünlerin ithalatına vergilendirme yaparak uygulamaya koyacağı Yeşil Mutabakat, ilk aşamada çimento, demir-çelik, alüminyum, gübre ve elektrik sektörlerinde karbon yoğunluğunun azaltılması için kapsamlı değişim gerektirmektedir.

vii. Bölge önemli miktarda yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir: Çeşitli araştırmalar, Güney ve Doğu Akdeniz bölgesinin genel olarak, en önemlisi güneş ve rüzgâr olmak üzere, büyük miktarda yenilenebilir enerji kaynakları barındırdığına işaret etmektedir. AB 6.Çerçeve AR&GE Projesi REMAP, Global Energy Network Institute (GENI) ve Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) gibi kuruluşların potansiyeli doğrulayan bir takım bilimsel çalışmaları ve raporları mevcuttur¹³. Bu çalışmalar bölgenin öne çıkan yenilenebilir enerji kaynağı olarak yoğunlaştırılmış (CSP) ve fotovoltaik (PV) güneş enerjisi, rüzgâr ve hidrojene odaklanmaktadır.

¹⁰ "İklim Değişikliğinin Akdeniz'deki Etkileri. Aşırı Isınan Bir Denizden Altı Hikaye" MMI (WWF Akdeniz Girişimi, 2021) https://wwftr.awsassetsf.panda.org/downloads/wwf_med_tr3.pdf

¹¹ "Akdeniz'in Kirlenmeye Karşı Korunmasına Ait Sözleşme", T.C.Kültür ve Turizm Bakanlığı, <https://teftis.ktb.gov.tr/TR-263670/akdenizin-kirlenmeye-karsi-korunmasına-ait-sozlesme.html>

¹² Paris Anlaşması, T.C.Dışişleri Bakanlığı web sayfası, <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>

¹³ Renewable Energy in the Mediterranean, Aston Centre for Europe, 2011, <https://cor.europa.eu/en/engage/studies/Documents/renewable-energy-mediterranean.pdf>; Simone

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi kaynakları (Concentrated solar power, CSP): Güneş enerjisi genellikle Güney ve Doğu Akdeniz bölgesinde potansiyel olarak en önemli yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. CSP sistemleri ile üretilen termik güneş elektriği potansiyeline yönelik DLR'nin *Solar Atlas for the Mediterranean Projesi* kapsamında geçmiş yıllarda yaptığı çalışmalara göre, Güney ve Doğu Akdeniz bölgesinin tamamında CSP'nin ekonomik potansiyeli 431.382 TWh/y olarak tahmin edilmiştir. Bu rakam CSP'nin Kuzey Akdeniz bölgesindeki (yani Portekiz, İspanya, İtalya, Malta, Yunanistan ve Kıbrıs) ekonomik potansiyelinden yaklaşık 300 kat daha yüksek bir seviyedir¹⁴.

Fotovoltaik (PV): Güneş kaynaklarını elektriğe dönüştürmek için kullanılan bir başka teknoloji de fotovoltaiktir (PV). PV durumunda, bu sistemler hemen hemen her yere kurulabilmektedir. PV sistemleri, şebekeye bağlı veya şebeke dışı uzak bölgelerdeki küçük ölçekli uygulamalarla dağıtılmış olabilir. Buna dayanarak DLR, Güney ve Doğu Akdeniz bölgesinin tamamında PV'nin ekonomik potansiyelini 122 TWh/y olarak tahmin etmektedir. Bu rakam Kuzey Akdeniz bölgesindeki (Portekiz, İspanya, İtalya, Malta, Yunanistan ve Kıbrıs) ekonomik potansiyelinden yaklaşık 5 kat daha yüksek bir seviyedir¹⁵.

Rüzgar enerji kaynakları: DLR'nin yukarıda bahsedilen çalışması Güney ve Doğu Akdeniz bölgesinin elverişli rüzgar koşulları nedeniyle dünyanın en iyi alanlarına sahip olduğuna da işaret etmektedir. Bu elverişli rüzgâr koşulları ortalama rüzgâr hızının 7 m/sn ve hatta bazı durumlarda 11 m/s'yi aştığını özellikle Fas'ın Atlantik kıyısı ve Kızıldeniz'de barizken, Türkiye, Cezayir, Libya ve Suriye'de de teknik ve ekonomik potansiyel anlamında önemli seviyededir. Yine DLR analizine göre, Güney ve Doğu Akdeniz bölgesinin rüzgâr gücünün teknik potansiyeli 21.967 TWh/y'dir ve Kuzey Akdeniz ülkelerinin rüzgâr enerjisi teknik potansiyelinden 34 kat daha büyüktür¹⁶.

Yeşil Hidrojen: Doğu Akdeniz'de ve Akdeniz'in genelinde yenilenebilir hidrojen, özellikle açık deniz rüzgâr enerjisinden yeşil hidrojen üretiminin nasıl kazançlı bir iş modeli haline gelebileceği uzmanlarca araştırılan önemli ve gelişen bir konudur. Uzmanların Akdeniz'de yenilenebilir hidrojen üretimine odaklanılması gerektiğine dair görüşleri en başta bölgenin fiziksel koşullarının elverişli olmasından kaynaklanmaktadır. Açık deniz rüzgâr hızları tutarlı ve nispeten yüksekken, güneş ışığı da hem güçlü hem de yıl boyunca gündüz saatleri açısından zengindir¹⁷. Uzmanlara göre yenilenebilir hidrojen, elektrolizörün çalışma saatlerini yüksek tutmak için güçlü güneş ve rüzgâr koşullarının bir kombinasyonu olduğunda oldukça uygun maliyetli hale gelmektedir ve dolayısıyla Akdeniz için iyi bir rekabet avantajı oluşturmaktadır¹⁸. Özellikle Ege'deki Yunan adalarının çok büyük bir üretim kapasitesine sahip olacağı öngörülmektedir¹⁹. Uzmanların önemseydiği bir diğer husus da temiz bir enerji vektörü olarak yenilenebilir hidrojenin, yeni düşük emisyonlu endüstriyel değer zincirlerinin oluşturulmasını destekleme fırsatı sunmasıdır. Bu, dalgalı uluslararası piyasa fiyatlarına maruz kalmaya neden olan tek tip enerji emtia

Tagliapietra, The Future of Renewable Energy in the Mediterranean. Translating Potential into Reality (April 20, 2015). FEEM Working Paper No. 030.2015, <https://ssrn.com/abstract=2596601>

¹⁴ Simone Tagliapietra, a.g.e., sayfa 21.

¹⁵ Simone Tagliapietra, a.g.e., sayfa 23.

¹⁶ Simone Tagliapietra a.g.e., sayfa 24.

¹⁷ Michaël Tanchum, An Eastern Mediterranean Poised between Escalation and Cooperation, Report ISPI, Energy Politics In The Mena Region From Hydrocarbons To Renewables?, 2022, sayfa 66.

¹⁸ James Kneebone, The Mediterranean as a leader in the clean hydrogen economy: production, transmission, end-use, European University Institute, 22 December 2022, <https://fsr.eui.eu/the-mediterranean-as-a-leader-in-the-clean-hydrogen-economy-production-transmission-end-use/>

¹⁹ Moritz Rau, Günter Seufert, Kirsten Westphal, The Eastern Mediterranean as a Focus for the EU's Energy Transition, Stiftung Wissenschaft und Politik, 10.02.2022, <https://www.swp-berlin.org/10.18449/2022C08/>

ihracatına göre daha çeşitli ve verimli bir ekonomidir. Örneğin Lübnan ve Suriye’de olduğu gibi ekonomik ve sosyal zorlukların ardından yeniden inşa etmek ve çeşitlendirmek isteyen ekonomilerin yanı sıra Libya ve Mısır gibi ekonomilerini geleceğe hazırlamak isteyen fosil yakıt ihracatçıları için çok önemli bir unsur olabileceği yönünde görüşler vardır²⁰.

DOĞU AKDENİZ’DE YENİLENEBİLİR ENERJİYE GEÇİŞİN BÖLGE ENERJİ JEOPOLİTİĞİNE YANSIMALARI

Bölgesel ortak çabalarla enerji geçişinin hızlandırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın şekilde kullanılmasının çevresel baskılar ve iklim kriziyle mücadele anlamında Doğu Akdeniz bölgesine şüphesiz faydaları olacaktır. Bunlar örneğin artan enerji talebini daha düşük bir fiyattan karşılamak gibi makro ekonomik faydalar, yeni işler yaratmak ve enerji yoksulluğunu azaltmak gibi sosyo-ekonomik faydalar, ülkelerin enerji yoğunluğunu düşürmek gibi çevresel faydalar ve hem bölge ülkeleri arasında hem de AB gibi bölgesel ekonomilerle geliştirilecek iş birliği faydaları olarak düşünülebilir. Fakat yukarıda değinilen Doğu Akdeniz’in enerji jeopolitiğinin çok denklemlili doğası enerji geçişinde dahi bizi sadece iyimser bir pencereden değil iş birliği ve çatışma gibi iki farklı pencereden bakmak zorunda bırakmaktadır. Amaçlanan enerji dönüşümü bölgedeki enerji güvenliği, karşılıklı bağımlılık ve bölgesel iş birliği açısından yeni fırsatlar getirecek midir? Bu aynı zamanda çatışmaları azaltmak için bir olanak sağlayacak mıdır? Bu noktadan hareketle aşağıda Doğu Akdeniz’de yenilenebilir enerjiye geçişin bölge enerji jeopolitiğine etkileri tartışılacak ve konuyu iki farklı pencereden değerlendiren uzmanların görüşleri, iş birliği potansiyellerini hangi noktadan ele aldıkları ve enerji geçişinde çatışmanın önüne geçebilmek için ortaya koydukları öneriler ele alınacaktır.

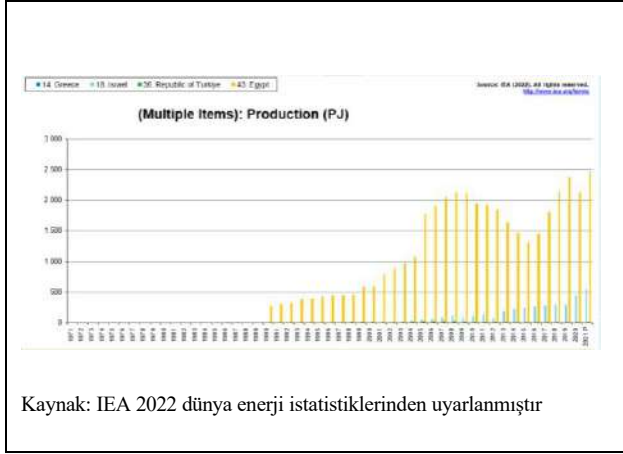
3.1. Geçiş Sürecinde Enerji Güvenliği

İkinci bölümde enerji jeopolitiğine dair yapılan analiz, enerji güvenliği sorununun çok karmaşık ve çok yönlü olduğunu ortaya koymaktadır. Bunu bazı verilerle ifade etmek enerji geçişinin enerji güvenliğini ne yönde etkilediğini değerlendirmek için daha anlamlı olacaktır. Veri grafikleri Doğu Akdeniz özelinde enerji görünümünü karşılaştırmalı bir şekilde sunabilmek adına IEA ve IRENA’nın dünya enerji istatistiklerinden türetilmiştir²¹. Buna göre; 1990’lu yılların başından günümüze kadar Mısır doğalgaz üretimini 8 kat artırarak 2500 Petajoule’a (PT) çıkarmıştır. Ardından İsrail 500 PT gibi çok daha az miktardaki üretimle ikinci sırada yerini almıştır (Şekil-2). Yine Mısır, ham petrol, LNG ve ham stok üretiminde büyük bir farkla öndedir (Şekil-3). Mısır, ihracat altyapısı ile de sektöre hâkim olmaktadır; ancak İsrail’in üretimi de bölgede ihracat payı olarak yadsınmayacak noktadadır. Covid-19 pandemisinden sonraki süreçte küresel fiyatlarda artış ve Ukrayna krizi nedeniyle Avrupa’nın talebi bölgedeki doğalgaz ihracatçısı bu ülkeler açısından olumlu bir ortam yaratmıştır.

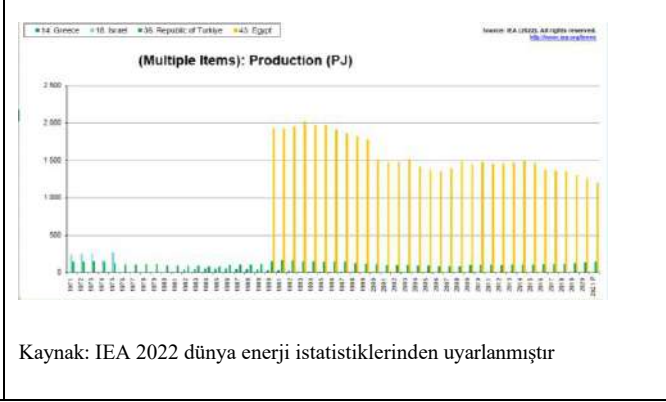
²⁰ James Kneebone, a.g.e.

²¹ IEA Dataset: World Energy Statistics and Balances (2022), <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>; IRENA (2022), Renewable Energy Statistics 2022, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2022.pdf?rev=8e3c22a36f964fa2ad8a50e0b4437870

Şekil-2: Doğu Akdeniz’de Doğalgaz Üretimi (PJ).

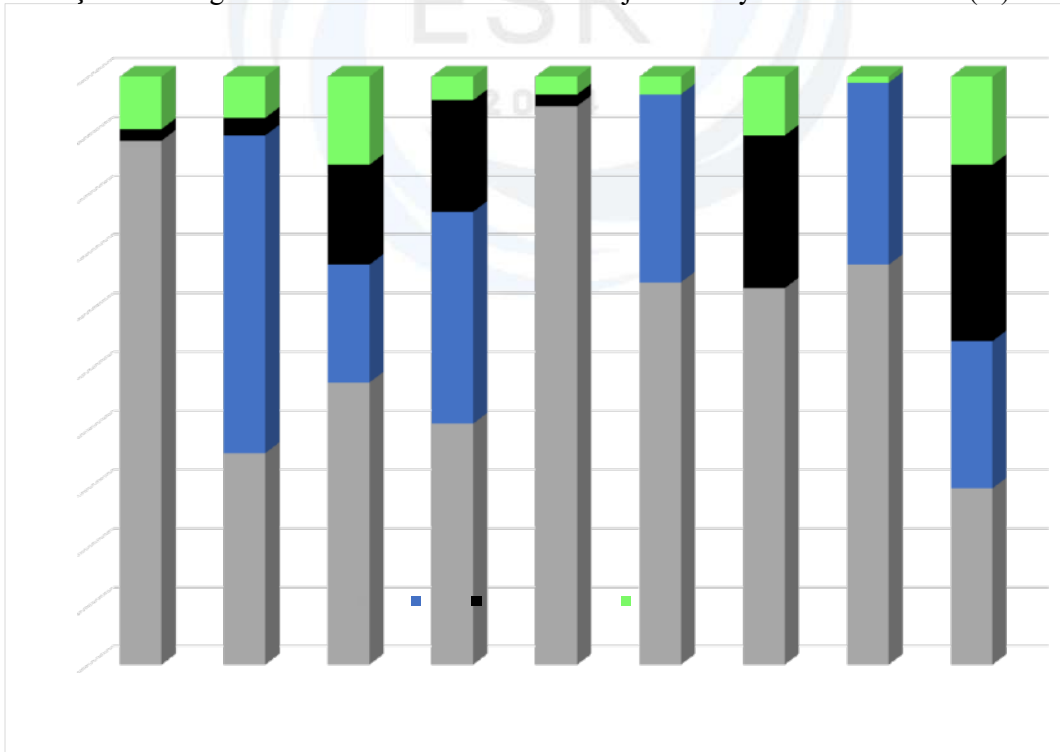


Şekil-3: Doğu Akdeniz’de Ham Petrol, LNG & Ham Stok Üretimi (PJ)



2019 yılı enerji arzı kaynak türlerine göre (Şekil-4); Türkiye enerjide dışa bağımlı bir ülke olmakla birlikte enerji karışımı anlamında daha çeşitli bir tablo sergilemekte; ancak kömür arzı halen önemli bir payı oluşturmaktadır. Mısır’a ait verilerde doğalgaz rezervlerine sahip olmanın avantajı nedeniyle kömürü çok az miktarda tedarik ettiği ortaya çıkmaktadır. Suriye başta olmak üzere Libya ve Lübnan için de enerji arzı neredeyse sadece fosil yakıttan oluşturmaktadır.

Şekil-4: Doğu Akdeniz Ülkeleri 2019 Yılı Enerji Arzı Kaynak Türü Oranları (%)



Yenilenebilir enerji kaynaklarının arzındaki mevcut görünümüne bakıldığında 2014 ile 2019 yılları karşılaştırmasına göre sıçrama ya da önemli bir artış hareketi yoktur. 2019 yılı verilerine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzındaki payı Türkiye ve Yunanistan'da her ikisinde yüzde 15 olup bölgede ön sıralardadır. Bunları Filistin (%10), Kıbrıs (%9) ve Mısır (%8) takip etmektedir (Şekil-5).

Şekil-5: Doğu Akdeniz Ülkelerinin Enerji Arzındaki Yenilenebilir Enerji Payı (%)

Doğu Akdeniz Kıyı Ülkelerinin Enerji Arzındaki Yenilenebilir Enerji Payı (%)

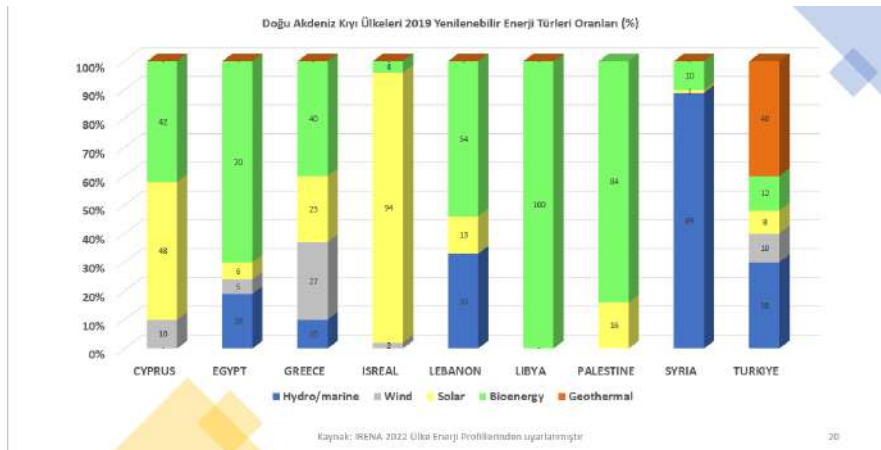


Kaynak: IRENA 2022 Ülke Enerji Profillerinden uyarlanmıştır.

19

Kaynak türleri bakımından 2019 verileri, Türkiye'nin çeşitli olarak tüm kaynakları kullandığına işaret etmektedir. Şekil-6'ya göre bölge ülkelerinin henüz rüzgâr enerjisinden yeteri kadar istifade etmediği görülmektedir. İsrail'in güneş enerjisi arz payının yüzde 94 ve Kıbrıs'ın yüzde 48 oranında olması dikkat çekmektedir. Biyoenerji ise çok çarpıcı oranlarda özellikle Libya'da tek yenilenebilir kaynak olarak öne çıkmakta, ardından Filistin (%84), Mısır (%70), Lübnan (%54), Kıbrıs (%40) ve Yunanistan (%40) takip etmektedir. Biyoenerjinin, çoklu enerji taşıyıcılara dönüştürülebilir özelliğinden dolayı (sıvıyakıt, ısı, elektrik, hidrojen gibi) bu ülkeler tarafından çekici bir seçenek haline geldiği anlaşılmaktadır.

Şekil-6: Doğu Akdeniz Ülkeleri 2019 Yılı Yenilenebilir Enerji Türleri Oranları (%)

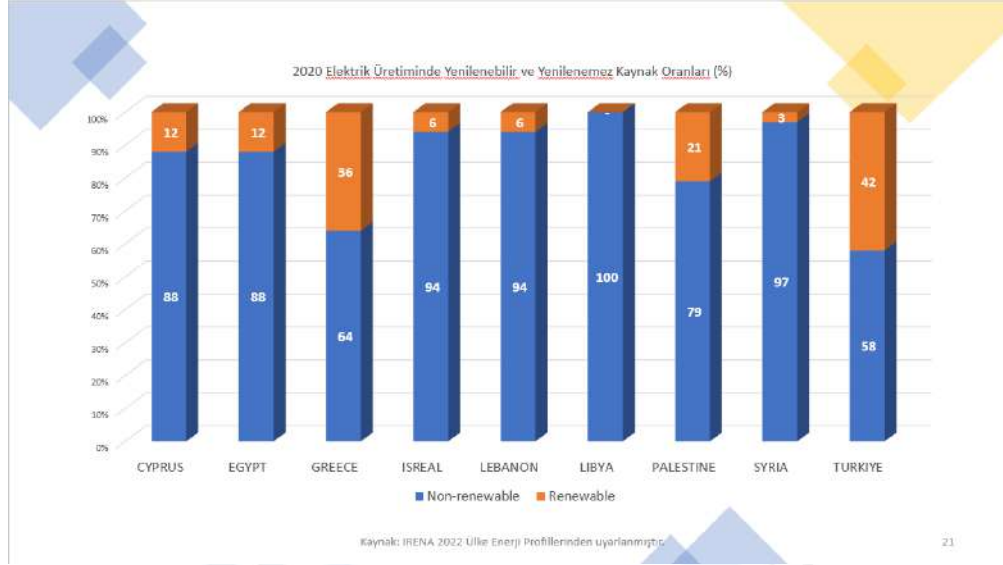


Kaynak: IRENA 2022 Ülke Enerji Profillerinden uyarlanmıştır.

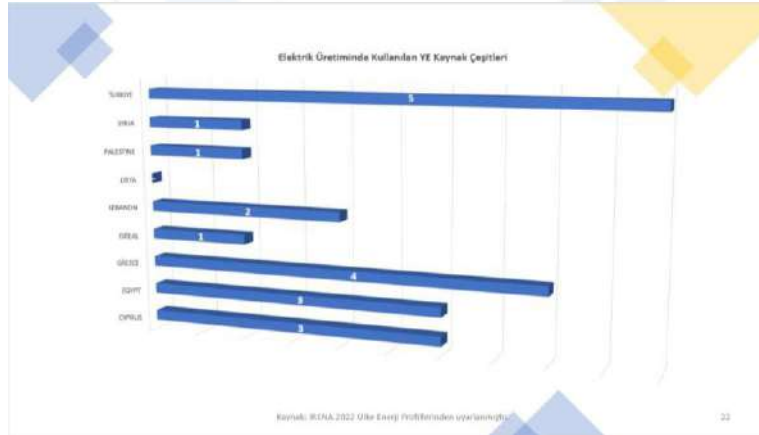
20

2020 verilerine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payına bakıldığında Türkiye (% 42), Yunanistan (%36) ve Filistin (%21) ilk sıralarda yer almaktadır (Şekil-7). Türkiye elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynak türlerinin tamamını kullanabilme özelliğini göstermektedir (Şekil- 8).

Şekil-7: 2020 Yılı Elektrik Üretiminde Yenilenebilir ve Yenilenemez Kaynak Oranları (%)



Şekil-8: Elektrik Üretiminde Kullanılan Yenilenebilir Enerji Kaynak Çeşitleri



Paris Anlaşması kapsamında verilen taahhütlere ilişkin ulusal hedefler Doğu Akdeniz ülkelerini enerji güvenliği stratejilerini yenileme yoluna götürmektedir. Bu hedefler IRENA'nın *Renewable energy targets in 2022* adlı çalışmasından, ülkelerin enerji strateji planlarından ve BMİDÇS'ye bildirdikleri Ulusal Katkı Beyanlarının en güncel versiyonlarından derlenmiş şekilde Tablo-3'te gösterilmektedir. Bu hedefler ülke ve eyalet düzeyindeki yasalarda, politikalarda ve ulusal eylem planlarında içselleştirilmektedir.

Tablo-3: Doğu Akdeniz Ülkeleri Yenilenebilir Enerji Ulusal Hedefler Enerji Planları

| Ülke | Kaynak | Ulusal Hedef |
|------------|--|--|
| Mısır | Mısır Ulusal Katkı Beyanı Haziran 2023 (Versiyon no: 3); Mısır 2035 Entegre Sürdürülebilir Enerji Stratejisi | Dış desteğe bağlı olarak; 2035 yılına kadar elektrik üretiminin %42'sini yenilenebilir kaynaklardan sağlamayı hedeflemekte. Bu hedefin gerçekleşmesini %22 güneş PV, %14 rüzgâr, %4 CSP ve %2 hidroelektrik yoluyla planladı. |
| İsrail | İsrail Ulusal Katkı Beyanı Temmuz 2021 (Versiyon no: 2); 465/2020 sayılı Hükümet Kararı | 2030 yılında elektrik üretiminin %70'ine doğalgaz ile ulaşmayı, temiz enerjiye dayalı güvenilir ve verimli bir enerji ekonomisinin teşvik edilmesini hedeflemekte. Elektrik üretiminin %30'unu ağırlıklı olarak güneş ve kısmen rüzgâr olmak üzere yenilenebilir enerjiden sağlamayı planladı. |
| Filistin | Filistin Ulusal Katkı Beyanı Ekim 2021 (Versiyon no: 2) | Uluslararası finansman desteğine bağlı koşullu eylemler olarak: Elektrik şebekesini, 2030 yılına kadar öncelikle güneş fotovoltaik (PV) kaynaklı yenilenebilir enerji dağıtımını mümkün kılacak şekilde iyileştirmeyi; 2035'e kadar tüm sektörlerde enerji verimliliğini %20 artırmayı; 2040 yılına kadar elektriğin %20-33'ünün başta güneş enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerjiden üretmeyi hedeflemekte. |
| Lübnan | Lübnan Ulusal Katkı Beyanı Mart 2021 (Versiyon no: 2) | 2030 yılında enerji talebinin %18'ini (elektrik talebi) ve ısı talebinin %11'ini (bina sektöründe) yenilenebilir enerji kaynaklarından koşulsuz olarak üretmeyi; ve enerji talebinin %30'unu (elektrik talebi) ve ısı talebinin % 16,5'ini (bina sektöründe) yenilenebilir enerji kaynaklarından koşullu olarak üretmeyi taahhüt etmekte. |
| Suriye | Suriye Ulusal Katkı Beyanı Kasım 2018 (Versiyon no: 1) | Uluslararası finansman desteğinin sağlanması durumunda, yenilenebilir enerji oranını 2030 yılına kadar elektrik üretiminin %10'una ulaştırmayı hedeflemekte. |
| Kıbrıs | State-of-play inventory of legislation and regulation for Clean Energy on European Islands. Fact Sheet: Cyprus, 2021 euislands.eu ; AB ve üye ülkeleri Katkı Beyanı Ekim 2023 (Versiyon no: 3) | 2030 itibarıyla nihai tüketimde YEK'in payını (%22,9), elektrikte (%30,3), ulaşımda (% 14,1) ve ısıtma ve soğutmada (%39,4)'e yükseltmeyi hedeflemekte. |
| Türkiye | Türkiye Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı Nisan 2023; Ulusal Enerji Planı 2022 | 2020-2035 dönemine yönelik senaryoda • Elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payını %34,2'ye, yenilenebilir enerji kaynaklarının payını %54,7'ye yükseltmekte, • Elektrik kurulu gücünde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payını %43,5'e, yenilenebilir enerji kaynaklarının payını %64,7 düzeyine yükseltmekte. ²² . |
| Yunanistan | Ulusal Enerji ve İklim Planı 2019 ; AB ve üye ülkeleri Katkı Beyanı Ekim 2023 (Versiyon no: 3) | 2030 itibarıyla YEK'in payını nihai tüketimde (%35), elektrikte (%61), ulaşımda (% 19) ve ısıtma ve soğutmada (%43)'e yükseltmeyi ; Elektrik üretiminde kurulu YEK kapasitesini (ağırlıklı olarak PV, rüzgar ve hidro) toplamda 19 GW'e yükseltilmeyi; YEK güç üretimini toplamda 38 TWh'e çıkartmayı hedeflemekte. |
| Libya | Libya Yenilenebilir Enerjiler Stratejik Planı | 2030 yılına kadar elektrik üretiminin %22'sini yenilenebilir kaynaklarından sağlamayı hedeflemekte. Bu hedefi, 3.350 MW güneş PV, 850 MW rüzgar enerjisi ve 400 MW CSP aracılığıyla gerçekleştirmeyi planladı. |

Bölgedeki ülkelerin enerji karışımlarında farklılık olsa da yukarıdaki veriler enerji geçişi hedeflerinin hırslı oranlara işaret ettiğini ve bunlara ulaşmak için sıvıratıcı projelerin hayata geçirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

²² Türkiye Ulusal Enerji Planı 2022, T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,

https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

Mısır, elektrik karışımındaki yenilenebilir enerji payını yüzde 250'lik bir artış oranıyla 2035 yılına kadar yüzde 42'e çıkarmayı; İsrail, 2030 yılına kadar elektriğinin yüzde 30'unun yenilenebilir kaynaklardan üretilmesini; Lübnan yenilenebilir enerji dağıtımını finanse etmeye adanmış mekanizmalara sahip bir ülke olarak elektrik üretiminde 2030 yılına kadar yüzde 30'a ulaşmayı; Kıbrıs da yüzde 150 artış oranıyla yüzde 30'a ulaşmayı; Türkiye 2035'te yüzde 64.7 ve Yunanistan ise 2030'da yüzde 61 oranında yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimini hedeflemektedir. Tablo-3'te öne çıkan bir vurgu, Ek 1 dışı ülkeler olarak Mısır, Lübnan, Filistin ve Suriye'nin diğer ülkelere yardım alarak elde etmeyi beklediği koşullu hedeflerinin yenilenebilir enerji alanındaki altyapısal eylemleri de kapsıyor olmasıdır. Dolayısıyla dış finansman desteği karbon salımının azaltımı için önemli hale gelmektedir.

3.2. Geçiş Sürecinde Karşılıklı Bağımlılık İlişkileri

Yukarıdaki veriler ışığında anlaşılacağı üzere, bol miktarda yenilenebilir enerji kaynağı elde etmek ve değerlendirmek için bölgenin enerji jeopolitiğinde karşılıklı bağımlılıklar ve bölgesel işbirliği fırsatları önemli hale gelmektedir.

Bölgede, ekonomilerin artan elektrifikasyonunun yerleşme ve dijitalleşme ile birlikte modern şebekeler aracılığıyla yeni etkileşimler yaratması ve sınır ötesi hale gelmesi öngörülmektedir. Sınır ötesi ara bağlantılar, fazla elektriği aktarabilecek ve elektrik kesintilerini önleyebilecektir. Fakat burada düşünülmesi gereken husus elektrik piyasasının bu yolla entegrasyonu, sadece fiziksel karşılıklı bağlantı anlamına gelmemekte, siyasi kararları da sürece dahil ederek karşılıklı bağımlılığa ilave boyut katmaktadır. Kıbrıs örneği vermek gerekirse, Emine Sülün'ün de işaret ettiği gibi *"Kıbrıs'ı kıta Avrupası elektrik şebekesine ve AB elektrik piyasasına bağlamak sadece teknik bir mesele olmamakta, aynı zamanda adanın fiilen hala bölünmüş olması nedeniyle son derece önemli bir siyasi karar haline getirmektedir"*²³. Sülün'e göre Kıbrıs Sorunu'nun siyasi olarak çözüme kavuşturulmaması nedeniyle AB İç Elektrik Piyasasının ilgili teknik ve piyasa kurallarına uyum konusundaki zorlukların ötesinde, Kıbrıs'ın kuzey kesiminin durumu belirsizdir.

Altyapı bağlantıları yeni rekabet alanları yaratabilirken aynı zamanda yüksek derecede güven ve özveri gerektiren yeni karşılıklı bağımlılıklar da yaratacaktır. Geçiş sürecinde enerji güvenliğini sağlamak ve iklim taahhütlerini yerine getirmek üzere özellikle Mısır, İsrail, Yunanistan ve Kıbrıs'ın yenilenebilir kaynaklara yönelik dahil oldukları mevcut girişim ve yatırım projeleri bölgenin enerji jeopolitiğine karşılıklı bağımlılık ilişkileri ve iş birliği dinamikleri bağlamında etki süreçleri başlatmıştır ve bunlar bir sonraki bölümde değerlendirilmektedir. Öne çıkan bu mevcut girişimlere kısaca değinmek gerekirse;

Mısır'da hidrojen: Mısır, Doğu Akdeniz'in yeşil hidrojen gelişiminin lokomotifi ve şu anda yapım aşamasında olan kamu hizmeti ölçeğinde yeşil hidrojen üretim kapasitesine sahip tek ülke olarak nitelendirilmektedir. Mısır, aynı zamanda dünyanın en büyük amonyak üreticilerinden biridir. Mavi ve yeşil hidrojen gelişim sürecine Norveç, Hollanda ve İtalyan Eni gibi şirketler dahil olmuştur. Mısır'ın temiz enerji dönüşümü için ABD ve Almanya, 5 GW verimsiz doğal gaz üretimini devre dışı bırakacak 10 GW'lık yeni rüzgar ve güneş enerjisi projelerinin konuşlandırılmasını desteklemek için Kasım 2022 tarihinde 250 milyon dolardan fazla kaynak taahhüt etmiştir. Bu proje Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD)

²³ Emine Eminel Sülün, Energy Transition Geopolitics In The Eastern Mediterranean And Prospects For A Green Energy Dialogue In Divided Cyprus, Peace Research Institute Oslo (PRIO), 2022.

[https://www.prio.org/download/publicationfile/3552/6%202022%20Energy%20Transition%20Geopolitics.p df](https://www.prio.org/download/publicationfile/3552/6%202022%20Energy%20Transition%20Geopolitics.pdf), sayfa 13-14.

tarafından koordine edilmektedir²⁴. EBRD ayrıca stratejik ortaklık anlaşması çerçevesinde Mısır'da yenilenebilir bir hidrojen endüstrisinin ve ticaretinin geliştirilmesi ve AB'nin 2030'da 20 milyon ton yenilenebilir hidrojen tüketimine ulaşma hedefini destekleyecek ve bu nedenle Rus fosil yakıtlarına bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olacak yatırımlara destek verecektir²⁵.

EuroAfrica Interconnector (AvroAfrika Arabağlantısı)²⁶: Mısır, Kıbrıs, Yunanistan ve Avrupa arasındaki 2.000 MW kapasiteli elektrik ara bağlantısıdır ve bu ülkelerin ulusal elektrik şebekelerini 1396 km'lik deniz altı HVDC (yüksek voltajlı doğru akım) kablosuyla birbirine bağlayan bir "elektrik otoyolu" olarak anılmaktadır. Proje, Afrika ile Avrupa'yı birbirine bağlayan toplam uzunluğu 1670 km olan bir enerji otoyoludur. Kıbrıs ve Mısır'daki gaz rezervlerinin yanı sıra mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin AB tarafından tedarik edebilmesini sağlayacaktır. Kıbrıs - Mısır bağlantısı Aralık 2022'de hizmete girecek; Kıbrıs - Girit bağlantısı ise Aralık 2023'te devreye alınacaktır.

EuroAsia Interconnector (AvroAsya Arabağlantısı)²⁷: İsrail, Kıbrıs, Yunanistan ve Avrupa arasındaki 2.000 MW'lık elektrik ara bağlantısıdır. Ulusal elektrik şebekelerini 1.208 km'lik bir deniz altı HVDC kablosuyla birbirine bağlayan Avrupa Ortak Çıkar Projesi'dir (European Project of Common Interest, PCI). Bağlantının 2025 yılında devreye girmesi planlanmaktadır. Bu arabağlantı da hem gaz hem de yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleyebilir nitelikte bir yatırımdır.

3.3. Geçişin İş Birliği ve Anlaşmazlık Dinamikleri

Enerji geçişinin Doğu Akdeniz'in enerji jeopolitiğe etkilerinin ne olacağı sorunsalı ilgili uzmanlar ve akademisyenler tarafından *olumlu* ve *şüpheli* olarak adlandırabileceğimiz iki ana yaklaşımla ele alınmaktadır. Olumlu etkileri olacağını savunan uzmanlar, genel olarak, enerji geçişinde aşamalar kaydedilmesiyle hem bölgesel hem de uluslararası düzeyde yeni ekonomik perspektifler ve siyasi işbirliklerin geliştirilebileceğini savunmaktadır. Olumlu yaklaşımlar ayrıca bölgenin enerji geçişine dayalı olarak yeniden haritalandırılmasının, bölge üzerinde yalnızca kalıcı bir ekonomik ve ekolojik etkiye sahip olmakla kalmayacağını, aynı zamanda siyasi istikrarını da olumlu yönde etkileyeceğini dile getirmektedir²⁸. Diğer tarafta, köklü siyasi ve hatta askeri anlaşmazlıklar nedeniyle, karar vericilerin bölgesel işbirliği içinde bir enerji geçişi çabasına girileceğine şüpheli yaklaşan tartışmalar mevcuttur. Bu ana yaklaşımlar aşağıda bölgesel işbirlikleri ve bölge-dışı aktörlerle ilişkiler bağlamında ele alınmaktadır.

3.3.1. Bölgesel İşbirlikler

3.3.1.1. Avrupa Birliği ile İşbirliği

Avrupa Birliği'nin özellikle son 20 senedir bölgeye yönelik uzun vadeli stratejileri ve son dönemde Ukrayna krizi üzerine yoğunlaşan ilişkiler bakımından Doğu Akdeniz bölgesinin enerji jeopolitiği AB'nin enerji politikaları ile iç içe geçmiş süreçler ve dolayısıyla karşılıklı bağımlılık şeklinde nitelik kazanmaktadır. AB bağlamında konuyu olumlu yaklaşımla değerlendiren bazı uzmanlar Doğu Akdeniz'de yenilenebilir enerjiye geçişin iyi bir strateji olabileceğini, bunun hem emisyon azaltımı hem AB'nin enerji

²⁴ Accelerating Egypt's Clean Energy Transition, Media Note Office Of The Spokesperson November 12, 2022, <https://eg.usembassy.gov/accelerating-egypts-clean-energy-transition/>

²⁵ COP27: EU and Egypt step up cooperation on the clean energy transition, EC Press release, 16 November 2022, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6925

²⁶ EuroAfrica Interconnector: About us <https://www.euroafrica-interconnector.com/about-us/>

²⁷ EuroAsia Interconnector: About us <https://euroasia-interconnector.com/about-us/>

²⁸ Moritz Rau, Günter Seufert, Kirsten Westphal, a.g.e.

güvenliği hem de bölgede siyasi istikrar oluşturmaya katkıda bulunacağını belirtmektedir. AB'nin uzun dönem stratejilerine bakıldığında;

- 20-20-20 hedefleri ve 2020 yılına kadar yenilenebilir enerji paylaşım hedeflerine ulaşılmasıyla ilgili kuralları belirleyen 2009/28/EC sayılı Direktif'te AB Üye Devletlerinin üretilen elektriğin bir AB üyesi ülkede tüketilmesi suretiyle "üçüncü ülkelerde" yenilenebilir elektrik tesislerine yatırım yaparak ulusal hedeflerine ulaşmalarına izin vermektedir. Bu amaçla AB Akdeniz'de yenilenebilir enerjiye yönelik planlarını daha çok güneye genişletmiş; ve 2008 yılında Akdeniz için Birlik (UfM) kapsamında *Akdeniz Güneş Planı (MSP)* girişimi başlatılmıştır. Bu girişim birbirini tamamlayan iki hedef içermektedir: 2020 yılına kadar Akdeniz çevresinde 20 GW'lık yeni yenilenebilir enerji üretim kapasitelerinin geliştirilmesi ve önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanması. Bu plan uluslararası finans kurumlarıyla işbirliklerini ve daha çok enerji iletimine odaklanan Fransız MEDGRID gibi endüstriyel yenilenebilir enerji girişimlerine verilen destek ve daha çok elektrik üretimine odaklanan Alman DESERTEC girişimini de kapsamaktadır.²⁹
- AB daha iddialı iklim ve enerji politikası hedefleri olan 2050 Enerji Yol Haritası ve Temmuz 2021'de yürürlüğe giren Avrupa İklim Yasası'nın yanısıra üçüncü taraflara yönelik REPowerEU paketi ve Akdeniz ve Ekonomik ve Yatırım Planı ile hareket etmektedir. AB ortak bir Akdeniz enerji politikası geliştirmek ve Mısır, İsrail gibi bölgedeki tüm fosil yakıt tedarikçileriyle metan emisyonları da dahil olmak üzere karbonsuzlaşma konusunda işbirliğini sürdürmek istemektedir³⁰.
- AB'nin Komşuluk ve Genişleme Politikaları kapsamında Komisyonun finansman desteği ile 2012 yılından bu yana Med-TSO (Akdeniz İletim Sistemi Operatörleri Derneği) Akdeniz havzasındaki, İletim Sistemi İşleticileri arasında sistemin teknik ve yasal uyumuna yönelik çalışmalar yürütmektedir. TEİAŞ'ın üyeleri arasında yer aldığı Med-TSO, TEASIMED 2 (2023-2025) evresinde olup Akdeniz-TSO ülkelerinin (20 üye ülke) iletim şebekelerinin yeterlilik gereklilikleri ve enerji güvenliği dikkate alınarak kademeli entegrasyonunun teşvik edilmesi, sınır ötesi elektrik alışverişinin artırılması ve ulusal kalkınma planlarının ve şebekelerin işletilmesine ilişkin ilgili kuralların koordinasyonu yoluyla Akdeniz bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun sağlanması amaçlanmaktadır³¹.

Uzmanlar, 2050 hedefine odaklanan AB'nin mümkün olan en karbonsuz ekonomiye doğru temel bir dönüşümden geçtiğini ve AB'nin artık Doğu Akdeniz'in enerji durumuna bakış açısında farklılaşma olduğuna işaret edilmektedir³². Bu nedenle bölgeden doğal gaz ithal etmek giderek önem kaybedecektir³³. AB, bölgenin güneş ve rüzgar enerji potansiyeline ve yenilenebilir elektrik ticareti ve hidrojen ithalatı konusunda işbirliği olasılıklarına artan bir ilgi göstermektedir. Bu çerçevede uzmanlar finansman ve altyapı destekleri yoluyla artacak işbirliğine vurgu yapmaktadır, bunlar;

²⁹ Manfred Weissenbacher, Renewable Energy in the Mediterranean Context: State of the Play and Future Perspectives, IEMed Mediterranean Yearbook 201, <https://www.iemed.org/publication/renewable-energy-in-the-mediterranean-context-state-of-the-play-and-future-perspectives/>

³⁰ EC Joint Communication To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions, EU external energy engagement in a changing world, Brussels, 18.5.2022, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=JOIN%3A2022%3A23%3AFIN&qid=1653033264976>

³¹ Med-TSO en yeni projesine başlıyor: TEASIMED (Verimli, Yeterli, Sürdürülebilir ve Enterkonnekte Akdeniz Elektrik Sistemi), TEİAŞ, <https://www.teias.gov.tr/haberler/med-tso-en-yeni-projesine-basliyor-teasimed-verimli-yeterli-surdurulebilir-ve-enterkonnekte-akdeniz-elektrik-sistemi>; Teasimed 2 (ongoing, 2023 – 2025), Med-TSO, <https://med-tso.org/en/teasimed2-ongoing-2023-2025-3/>

³² Moritz Rau, Günter Seufert, Kirsten Westphal, a.g.e.

³³ Laurent Ruseckas, Europe and the Eastern Mediterranean: the Potential for Hydrogen Partnership, SWP Comment 2022/C 50, 29.08.2022 <https://www.swp-berlin.org/en/publication/europe-and-the-eastern-mediterranean-the-potential-for-hydrogen-partnership>

Elektrik üretimine dayalı altyapılar: Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kullanımına odaklanan yeni bir enerji altyapısının geliştirilmesi, büyük sanayinin büyük ölçekli elektrifikasyonu ve elektrikli mobiliteye geçiş aynı zamanda bölgesel yenilenebilir enerji kapasitesinin hızla artırılmasını ve büyük ölçekli enerji depolama tesislerinin kurulmasını teşvik edecektir. Karim Elgendy'nin değerlendirmesine göre güneş fotovoltaik, rüzgar enerjisi ve pil depolama maliyetlerindeki dramatik düşüş, bu tür altyapının hızla konuşlandırılmasını sağlayan unsurlardır³⁴.

Elektrik bağlantıları: Türkiye ve Yunanistan arasında ve Kıbrıs Cumhuriyeti ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti arasında halihazırda mevcut elektrik arabağlantıları henüz Türkiye ile Yunanistan arasındaki deniz sınırı anlaşmazlığı ve Kıbrıs gibi mevcut bölgesel sorunlar tarafından olumsuz etkilenmiyor gözükmektedir³⁵. Bu anlamda daha önce değinilen *EuroAsia* ve *EuroAfrica Interconnector* Projeleri önemli hale gelmektedir. Doğu Akdeniz üzerinden Avrupa, Afrika ve Orta Doğu elektrik şebekeleri arasındaki kıtalararası elektrik bağlantıları fazla elektriği aktarma ve darboğazlarda arzı dengeleme ve böylece elektrik kesintilerini önleme fırsatı sunacaktır³⁶.

Hidrojen: Hidrojenin giderek önem kazandığını vurgulayan uzmanların görüşüne göre AB'nin hidrojen stratejisinde Doğu Akdeniz bölgesel bir potansiyele sahiptir. Bölgedeki doğalgaz temelli enerji işbirliğinin hidrojen gelişimine genişletilmesi halinde yeni sinerjiler yaratılacağı düşünülmektedir. Başlangıçta doğal gaz taşımacılığına yönelik bir proje olan EastMed boru hattı gibi projelerin ne ölçüde yeniden yorumlanabileceği ve bunun yerine yeşil hidrojenin taşınması için kullanılabileceği konusunda AB'nin enerji ile ilgili politika platformlarında halihazırda görüşmeler yapılmaktadır. AB'nin REPowerEU planı kapsamında 2030 yılına kadar yılda 10 milyon ton yeşil hidrojen ithal etmeyi planlaması, Akdeniz Yeşil Hidrojen Ortaklığının geliştirilmesi konusunda hem Mısır hem de Türkiye ile görüşmeleri gündemine almıştır³⁷.

3.3.1.2. Bölge Ülkeleri Arasında Barışın Temelini Atacak Fırsatlar

Yenilenebilir enerjilerin ve elektrik bağlantısının tüm Doğu Akdeniz'de yaygınlaştırılmasına yönelik yapıcı ve kapsayıcı yaklaşımların Kıbrıs'ta iki toplum arasındaki ve Yunanistan ile Türkiye arasındaki deniz yetki alanlarına ilişkin ihtilafların siyasi olarak kriz niteliğini büyük ölçüde azaltacağı yönünde görüşler bulunmaktadır. Diğer yandan, güvensizlik ve köklü düşmanlıkların hala olumlu girişimleri engelleyebileceği de bu görüşleri veren uzmanların önemseddiği bir husustur.

Benzer bir perspektiften bölge ülkeleri arasındaki fırsatları irdeleyen Michaël Tanchum, Yunan adalarının kendi elektriğini üretmesi ile ilgili Avrupa Komisyonu finansman desteği kapsamındaki Tilos (Technology Innovation for the Local Scale) yatırım projelerinin Türkiye ile ilişkileri ve Kıbrıs sorununun çözümünü olumlu yönde etkileyeceğini belirtmektedir. Tanchum'ye göre Yunanistan'ın ücra adaları için bu sorunu aşmanın bir yolu, komşu Türkiye'ye kısa mesafeler boyunca elektrik bağlantıları kurmaktır. Kazan-kazan çözümü, Türkiye'ye giden bu tür elektrik ara bağlantıları,

³⁴ Karim Elgendy, The Future of Eastern Mediterranean Energy and Climate Collaboration, Insight Turkey Spring 2022 / Volume 24, Number 2, sayfa 50. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/48678905>

³⁵ Karim Elgendy, a.g.e., sayfa 51.

³⁶ Moritz Rau, Günter Seufert, Kirsten Westphal, a.g.e.

³⁷ Jorgo Chatzimarkakis, Fuel of the Future: A Blueprint for a Mediterranean Market for Emission-Free Hydrogen, ELIAMEP | Policy Paper #116/2022, <https://www.eliamep.gr/wp-content/uploads/2022/11/Policy-paper-116-Chatzimarkakis-final-EN.pdf>, sayfa 3-6.

Yunan adalarının ihraç edilebilir fazlaları için bir alım mekanizması oluşturacak ve böylece kıyıdaki Türkler daha fazla güce erişirken, yenilenebilir enerji üretim kapasitelerinin geliştirilmesine yönelik yatırımları teşvik edecek ve elektrik maliyetlerini azaltacaktır. Tanchum yenilenebilir enerjiden güç üretimi, elektrik ara bağlantısı ve elektrik ticareti konularında benzer işbirliği biçimlerinin, Kıbrıs sorununun çözümünden çok daha önce Kuzey ve Güney Kıbrıs arasında yürütülmesi mümkün olduğunu; bunun da işbirliğine daha fazla güven ve adil bir çözümde paydaş ilgisi yaratacağını ifade etmektedir³⁸.

Doğu Akdeniz'in enerji geçişinin barışçıl olması için ülkelerin özverili olması gerektiğini vurgulayan uzmanlar ve üst düzey devlet yetkilileri Türkiye'nin Doğu Akdeniz Gaz Forumu'na (EMGF) dahil edilmesi ve Türkiye EMGF'ye kabul edilene kadar, Türkiye'nin kurucu üye olduğu, bölgesel yenilenebilir enerji işbirliğini teşvik etmek için paralel bir platformun oluşturulması yönünde görüşler de öne sürmektedir³⁹. EMGF'nin, siyasi fay hatları arasında köprü kurmak ve Doğu Akdeniz enerji işbirliği için yeni bir harita oluşturmak suretiyle, yenilenebilir enerji üretimi ve elektrik bağlantısında sınır ötesi işbirliğini kolaylaştıracak bir formül haline getirilme fikri de dile getirilmektedir⁴⁰.

3.3.2. Bölge Dışı Aktörler ile Küresel Etkileşimler

Doğu Akdeniz bölgesinin enerji geçişi sadece AB ve Akdeniz'i ilgilendiren bir konu değildir. Enerji jeopolitiğinin değişim sürecine ABD, Rusya ve Çin başlıca aktörler olarak dahil olmaktadır. Burada dikkati çeken husus, bu ülkelerin geçiş sürecine kendi küresel stratejileri ve finansmanları dahilinde girmeleri aslında bölgenin enerji geçiş jeopolitiğini bölgesel olmanın ötesinde küresel rekabete dönüştürmektedir.

Çin'in 2013 yılında duyurduğu *Kuşak ve Yol Girişimi* (Belt and Road Initiative-BRI), fiziksel altyapı, siyasi koordinasyon, ticaretin önündeki engellerin azaltılması, finansal entegrasyon ve kişiler arası temaslardan oluşan beş bağlantıyı geliştirmeye odaklanmaktadır. Daha sonra bu girişime dijital bağlantı boyutu (Dijital İpek Yolu) da eklenmiş ve Çin'in küresel bağlantısının önemli bir ayağı haline gelmiştir. Bu girişim Çin'in dış politikasının özünü temsil etmekte ve Çin'li uzmanların değerlendirmesine göre, *"hem kara hem de deniz yolları boyunca ve en belirgin şekilde enerji ve ulaşım sektöründe fiziksel altyapının geliştirilmesi olmaya devam etmektedir"*.⁴¹

Çin'in Doğu Akdeniz bölgesine yönelik niyetleri BRI'den ziyade çok yönlü ve tarihsel temellidir. Enerji jeopolitiği boyutundan bakıldığında Çin, dünya ekonomisini derinden etkileyen bir ülke olmanın yanısıra dünyadaki en büyük yenilenebilir enerji üreticisidir⁴² ve dolayısıyla enerji transfer güvenliğini sürdürmek için Doğu Akdeniz'e kıyaslı olan ülkeler ve ada ülkeleri ile iyi ilişkiler sürdürmeyi benimsemiştir. Çin'in Doğu Akdeniz'deki yenilenebilir enerji yatırımlarının çoğu, bölgenin coğrafyasının belirli avantajlar sunması nedeniyle güneş teknolojilerine yapılmaktadır. Örneğin, küresel bir enerji merkezi olmayı hedefleyen Mısır'a Çin, BRI kapsamında güneş enerjisini yaygınlaştırma desteği taahhüt etmektedir.⁴³

³⁸ Michaël Tanchum, Two practical proposals to solve eastern Mediterranean energy and boundary disputes, Heinrich Böll Stiftung HBS-İstanbul, 10 October 2020 <https://tr.boell.org/en/2020/10/10/two-practical-proposals-solve-eastern-mediterranean-energy-and-boundary-disputes>

³⁹ Panel: The Role of the Energy Transition in Eastern Mediterranean Energy Security, Regional Clean Energy Outlook Conference, Atlantic Council, 27 Ekim 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=Uci53XGNSZU>

⁴⁰ Michael Tanchum, An Eastern Mediterranean Poised between Escalation and Cooperation, Energy Politics in the MENA Region: From Hydrocarbons to Renewables?, ISPI Report, 2022, sayfa 73.

⁴¹ The EU Connectivity Strategy: Putting Words into Action Manuel Widmann, Ağustos 2021, sayfa 13. <https://eias.org/wp-content/uploads/2021/08/The-EU-Connectivity-Strategy.pdf>

⁴² Renewables 2022 Executive summary, IEA 2022 <https://www.iea.org/reports/renewables-2022/executive-summary>

⁴³ Clemens Hoffmann & Ceren Ergenc (2022) A Greening Dragon in the Desert? China's Role in the Geopolitical Ecology of Decarbonisation in the Eastern Mediterranean, Journal of Balkan and Near Eastern Studies, DOI: 10.1080/19448953.2022.2131079

Çin yenilenebilir enerji altyapılarına desteğinin yanısıra “barışçıl yükseliş” ve “kalkınma barışı” stratejilerini izleyerek gerek birebir gerek gerekse çoklu temaslar halinde ülkelerle işbirliği alanlarını genişletip Doğu Akdeniz’deki varlığını artırmaktadır⁴⁴.

Çin’in stratejisine yanıt olarak AB’nin 2021 yılı sonunda 300 milyar Avro finansman gücüyle harekete geçtiği Küresel Geçit (Global Gateway) aslında daha geniş bir açıdan bakıldığında AB’nin neden Doğu Akdeniz’i kendine entegre etmek istediği daha anlaşılır hale getirmektedir. Bu noktada Çin faktörünün bir endişe yarattığını söylemek yanlış olmayacaktır.

Kuşak ve Yol Girişimi’nin küresel olduğu kadar bölgede de istikrarlı ilerlemesi, Avrupa Birliği’nin yanısıra ABD ve Rusya’nın da bölgede nasıl duruş sergilemesi gerektiğini ve hatta birbirleri arasındaki tutumu belirleyen bir dinamik olduğu söylenebilir. Süreç içinde örneğin ABD’den AB’ye Çin’e karşı daha sert bir tavır alması şeklinde tavsiyelerle tezahür etmiştir.

ABD açısından değerlendirildiğinde geçtiğimiz on yılı aşkın bir zaman zarfında, keşfedilen hidrokarbon rezervlerinin Doğu Akdeniz ülkeleri arasındaki ilişkileri değiştireceği ve Avrupa’ya daha fazla istikrar ve yeni enerji kaynakları getireceği yönünde bir beklenti hakimdi. ABD tarafında son yıllarda bunun yetersiz kaldığı ve özellikle Ukrayna krizi ile girilen yeni süreçte Avrupa için Rus gazına bir alternatif olarak görülen bölgenin çok maliyetli hale geldiği anlaşılmaktadır. Nitekim ABD, EastMed projesinden belirsizlik koşulları altında maliyetli bir yatırım olması nedeniyle çekildiğini açıklamıştır. AB ve ABD’nin boru hattının geliştirilmesine verdiği desteğin azaltılmasının diğer nedenleri hem teknik zorluklar hem de Türkiye ile Kıbrıs arasında önerilen güzergahın bölgesel anlaşmazlıklara neden olmasıdır⁴⁵.

Bu değişen durumun ABD’nin bölgesel istikrarı, enerji geçişinin sunduğu fırsatlar üzerinden sağlamayı planladığı sonucu çıkarılabilir. Çünkü genel itibarıyla ABD, Doğu Akdeniz enerjisini Avrupa’ya fiziksel olarak bağlama yaklaşımını sürdürmektedir ve bu doğrultuda ABD hem gaz hem de yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleyebilen elektrik ara bağlantılarına odaklanmaya başlamıştır. ABD, Doğu Akdeniz ülkeleriyle güçlendirilmiş güvenlik ve enerji işbirliğine ilişkin bir strateji izlemekte ve strateji özellikle İsrail, Kıbrıs Cumhuriyeti ve Yunanistan ile ilişkilerin güçlendirilmesine vurgu yapmaktadır⁴⁶.

Tarihsel olarak sıcak denizlere inme politikası olan Rusya, Doğu Avrupa, Kırım, Güney Kafkasya ve Suriye’de askeri varlığının yanı sıra deniz tesisleri kurarak Doğu Akdeniz’de önemli bir aktör haline gelmiştir. Rusya’nın NATO üyeleri Yunanistan, Fransa ve özellikle Türkiye ile ikili ilişkilerini derinleştirdiği ve Orta Doğu ve Kuzey Afrika’yı da kapsayan daha geniş coğrafyalardaki dinamiklerden yararlandığı görülmektedir. Rusya’nın Doğu Akdeniz’e yönelik politikası, geniş çaplı esnekliğe ve yumuşak ve sert güç unsurlarını birleştirme yeteneğine dayanmaktadır. Rusya araştırmaları uzmanı Zaur Gasimov’a göre Rusya’nın tahılına ve turistlerine bağımlı olan AB üyesi olmayan Türkiye gibi ülkelerin Rusya’nın Ukrayna’yı işgalinden sonra AB tarafından uygulanan türden Rusya karşıtı yaptırımları uygulamayı istememesi Rus etkisinin bölgedeki derinliğinin bir göstergesidir⁴⁷.

⁴⁴ Sun D. & Zhang, J. (2022). China’s proposal for the Eastern Mediterranean conflict resolution: a “developmental peace”. BRIQ Belt & Road Initiative Quarterly, 4(1), 32-53, sayfa 35-36. https://briqjournal.com/sites/default/files/yazi-ici-dosyalar/2022-12/Sun%20Degang_ENG_0.pdf

⁴⁵ Analysis: Eastern Mediterranean, EIA, Güncelleme tarihi: 16 Kasım 2022, https://www.eia.gov/international/analysis/regions-of-interest/Eastern_Mediterranean

⁴⁶ S.1102 - Eastern Mediterranean Security and Energy Partnership Act of 2019, <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/1102/text>

⁴⁷ Gasimov, Zaur. "Russia under Putin in the Eastern Mediterranean: The Soviet Legacy, Flexibility, and New Dynamics" Comparative Southeast European Studies, vol. 70, no. 3, 2022, pp. 462-485. <https://doi.org/10.1515/soeu-2021-0061>

Yukarıda bölge-dışı aktörler bağlamında yapılan analizden yola çıkarak yenilenebilir enerjiye geçişin yeni tür ekonomik işbirlikleri ortaya çıkardığı ve uluslararası enerji sistemindeki bölgeselleşme süreçlerini güçlendirdiği yönünde bir değerlendirme yapmak mümkün hale gelmektedir. Diğer yandan bazı uzmanların yenilenebilir enerji projelerinin kaçınılmaz olarak mevcut jeopolitik ittifakları değiştireceği yönündeki görüşlerini de dikkate almak gerekir. Crikemans'ın görüşüne göre yenilenebilir enerji kaynaklarına ve yeni teknolojilere yapılan yatırım, ya birkaç büyük gücün (Çin ve/veya ABD) olduğu bir dünya düzenine yol açacak yeni jeopolitik güç merkezleri oluşturacak; ya da jeopolitik gücün bir çok ülke arasında daha eşit dağıldığı bir dünyaya yol açacaktır. Veyahut, yenilenebilir enerjiye yaptıkları araştırma ve geliştirme yatırımları ve nadir toprak malzemelerine sahip olmaları nedeniyle Çin ve ABD'nin kilit roller oynayacağı ikili-çok kutuplu bir sistem ortaya çıkacaktır⁴⁸.

Bu çalışma ise yukarıda yapılan aktör analizi ışığında AB'nin uzun vadeli stratejilerinin bölge ülkeleri ile birlikte hızlı ve somut şekilde uygulamaya konulduğu takdirde genişlemiş bir bölgesel ittifak ve enerji jeopolitiğinin bölgesel bir güç merkezi olarak ortaya çıkacağını öngörmektedir. Bölgeler arası elektrik ticareti için özellikle iletim kapasitesine yatırım yapılması devletler arasındaki olumlu yönde karşılıklı bağımlılığı artıracak ve jeopolitik istikrar için daha etkin çözümler sağlayacaktır.

3.3.3. Uyuşmazlık Dinamikleri

Enerji geçişini bölgesel işbirliği halinde başarmanın önünde bazı zorlayıcı dinamiklerden de bahsetmek gerekmektedir. Bunlar temelde köklü siyasi ve hatta askeri anlaşmazlıklardır. Doğu Akdeniz enerji jeopolitiğinde enerji geçişinin yaratacağı etkilere şüpheyle yaklaşan uzmanlar yenilenebilir enerji kaynaklarının, fosil yakıtların neden olduğu çatışma türleriyle aynı türde uyuşmazlıklara yol açacağını ya da var olan anlaşmazlıkların süreğenlik göstereceğini düşünmektedir. Buna göre;

- Kıbrıs, Yunanistan ve Türkiye arasındaki Münhasır Ekonomik Bölgelerin sınırlandırılmasına ilişkin çözülmemiş anlaşmazlıklar, açık deniz yenilenebilir enerjilerinin ve sınır ötesi elektrik ara bağlantısının genişletilmesini de engelleyebilir. Yunanistan, İsrail ve Kıbrıs Cumhuriyeti arasında 8 Mart 2021'de imzalanan Avrasya Ara Bağlantısı ile ilgili mutabakatta öngörülen güzergahın kıta sahanlığı olarak iddia ettiği bölgeyi kısmen geçmesi nedeniyle Türkiye bu plana karşı çıkmaktadır.
- Bir tarafta EMGF yoluyla enerji meselelerini ekonomik ve güvenlik işbirliği ile geliştirmeye çalışan Yunanistan, Mısır, İsrail ve Kıbrıs Cumhuriyeti diğer tarafta Türkiye Doğu Akdeniz'de bölgesel bloklaşmayı zaman zaman keskin hale getirmektedir. Örneğin Odysseas Christou, "*Doğu Akdeniz'deki doğal rezervlerin eş zamanlı keşfi ve işletilme olasılığı, çeşitli bölgesel aktörler arasında ikili ve çok taraflı seviyelerde yeni işbirliklerine kapı açarken, mevcut güvenikleştirme ilişkilerini şiddetlendirir*" demektedir⁴⁹. Fakat aynı zamanda Türkiye açısından enerji arzını olumsuz etkileyecek şekilde bir güvensizlikleştirme ortaya çıkarmaktadır.

⁴⁸ Roman Vakulchuk, Indra Overland, Daniel Scholten, Renewable energy and geopolitics: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 122, April 2020, 109547,

https://www.researchgate.net/publication/338445998_Renewable_energy_and_geopolitics_A_review , sayfa 7.

⁴⁹ Odysseas Christou, Beyond Hegemony: Cyprus, energy securitization and the emergence of new Regional Security Complexes?

https://www.researchgate.net/publication/276204135_Energy_Security_and_the_Transformation_of_Regional_Securitization_Relations_in_the_Eastern_Mediterranean sayfa 1 ve 3.

- Doğu Akdeniz enerji jeopolitiğinde zaman zaman yakalanan istikrarlı havalara kalıcı veya kapsamlı işbirliğine yönelik yapısal bir değişimi sağlamamaktadır. Enerji geçişi sayesinde kısmen ekonomik, teknik ve çevresel girdilerle işbirliği fırsatları kollanmakla beraber, ironik bir şekilde, siyasi konular örneğin yeni seçimler, İsrail'in Gazze saldırıları, İran'ın Hizbullah ve Hamas'a verdiği ideolojik ve askeri destek gibi unsurlar ve bölgeyi kendi gündemleriyle küresel rekabete çeken Çin, Rusya ve ABD gibi faktörler kalıcı bir işbirliğinin önüne geçmektedir.

DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Enerji kaynakları fosil temelli olsun ya da yenilenebilir, devletler arasında var olan iş birliklerini artıran ya da esaslı sorunları karmaşıklaştıran jeopolitik unsurlardır. Bu çalışma, Doğu Akdeniz'de yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinin bölgenin enerji jeopolitiğine yansımalarını incelemiştir. Bu kapsamda Doğu Akdeniz'in enerji jeopolitiğinin genel doğasını ele almış ve ardından bölge ülkelerinin enerji görünümüne, ulusal iklim ve enerji hedeflerine ve enerji geçişine yönelik büyük çaplı yatırımlarına odaklanmıştır. Enerji geçişinin enerji güvenliği boyutunu, karşılıklı bağımlılık ilişkilerini ve işbirliği dinamiklerini irdelemiş ve bölgenin enerji jeopolitiğini ne yönde etkileyeceğine dair bölge uzmanlarının farklı perspektiflerine yer vermiştir.

Çalışma, iklim kriziyle mücadelenin bölgenin enerji jeopolitiğini etkileme potansiyeline sahip bir dinamik olduğu sonucuna varmaktadır. Bölgedeki devletlerin iklim kriziyle mücadele eylemleri ve bununla ilintili karşılıklı bağımlılıkları bölgenin istikrarını sağlamaya yönelik olduğu sürece işbirliği zemininde bir geçiş yaşanacaktır. Fakat ulusal politikalar bölge içinde ayrışan çıkarlarla hareket ederse geçiş süreci çatışma konuları oluşturacak ve zaten bölgenin enerji jeopolitiğinin doğasında yer edinmiş esaslı sorunları derinleştirecektir. Geçiş süreci, sadece bölgesel ekonomik işbirliği fırsatları değil, aynı zamanda yeni istikrarsızlıklar çıkarma potansiyeline sahiptir. Gidilmesi gereken yön bölgesel istikrarı gerektiren barışçıl karşılıklı bağımlılıklar ve işbirliği modelleridir.

Enerji geçişi sürecinde bölgenin enerji jeopolitiğine güçlü etkileri olan diğer bir dinamik, Bölgenin bölgedışı güçlü devlet aktörlerinin, AB'nin ve uluslararası şirketlerin yenilenebilir enerjiye geçişi konu alan küresel stratejilerinin (Çin'in *Kuşak ve Yol Girişimi*, ve AB'nin *Küresel Geçit'i* ve Rusya'nın esnek ve sert politikaları gibi) odağında olması ve böylelikle yeni bir küresel rekabet alanına dönüşmesidir. Çalışmanın, üçüncü bölümünde yapılan aktör analizleri neticesinde vardığı sonuç, yenilenebilir enerjiye geçişin yeni tür işbirlikleri ortaya çıkardığı ve uluslararası enerji sistemindeki bölgeselleşme süreçlerini hareketlendirdiği yönündedir. Bu bağlamda Doğu Akdeniz ile AB'nin bölgeselleşmesi bölgesel istikrarın sağlanması açısından daha kurumsal bir çaba olarak değerlendirilebilir. Doğu Akdeniz ülkelerinin özellikle son 20 yıllık süre zarfında AB ile olan iç içe geçmiş karşılıklı bağımlılıkları AB'nin uzun vadeli strateji ve politikalarına dayanmaktadır. Bunun genel anlamda faydası emisyon azaltımına katkıda bulunacağıdır. Ancak enerji geçişinde AB ile bölgeselleşme seçeneğinin başarılı olması için gereken kritik zemin AB'nin ayrışmacı olmayan ve tüm tarafları bölgenin barış ve güvenliğine teşvik eden bir yaklaşım edinmesidir.

Diğer yandan AB ile daha zayıf bir işbirliği, bunun yerine kamplaşmış işbirlikleri ve bölgesel istikrarsızlık anlamına gelecektir. Bir başka deyişle, Bölge ülkelerinin, iklim eylemi ve enerji geçişi için bir çerçeve üzerinde anlaşmaya varmamaları ülkeleri en nihayetinde farklı güçlerle buluşturacaktır. Bu ayrışma, birbirinden kopuk altyapılara, Gazze savaşı, İsrail-İran gerginliği, Suriye krizi gibi siyasi sorunların karmaşılaşmasına ve varolan MEB uyuşmazlıkları gibi bölgesel gerilimlerin artmasına yol açacaktır.

Bu durumun bazı ülkelere belki olumlu izdüşümleri olurken, Türkiye gibi ülkeler için de olumsuzlukları olacaktır. Dolayısıyla Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı, kısmen güvenlik açığı olan ve bölge ülkeleri arasındaki işbirliklerinde çoğu zaman dışlanmışlık durumlarıyla yüzleşen ülkelerin enerji geçiş sürecinde bağımlılık koşullarını ve bölge işbirliklerindeki yerini iyi belirlemesi gerekmektedir. Çalışma sonlandırılırken, enerji geçişinin bölgenin enerji jeopolitiğinde olumlu etkiler yaratması adına AB ile bölgeselleşmenin yanı sıra bölgede barış temelli bir enerji diplomasinin geliştirilmesi ve bunun da uzlaşmacı bir kültür yaratılarak elde edilmesi önerilmektedir. Bölgede sektörel sivil toplum ve akademi platformları bu yönde rol oynayacak önemli paydaşlar olarak görülebilir. Bu anlamda Türkiye, tam bağımsız ve akılcı ilkelere dayalı bir denge politikası izlediği sürece, bölgenin barışçıl enerji geçişine önemli katkılar verecek güce ve kaynaklara sahiptir.

KAYNAKLAR

- A. G Yaşa. ve M.Yılmaz, Doğu Akdeniz’de Bulunan Doğalgaz Rezervlerinin Bölgesel Enerji Politikalarına ve Rekabete Etkisi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 32, 1(1-17), 2022
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1973874>
- Ali, E., W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N.J.M. Hilmi, G. Le Cozannet, and P. Lionello, 2022: Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233–2272, doi:10.1017/9781009325844.021.
- Clemens Hoffmann & Ceren Ergenc (2022) A Greening Dragon in the Desert? China’s Role in the Geopolitical Ecology of Decarbonisation in the Eastern Mediterranean, Journal of Balkan and Near Eastern Studies, <https://doi.org/10.1080/19448953.2022.2131079>
- Emine Eminel Sülün, Energy Transition Geopolitics In The Eastern Mediterranean And Prospects For A Green Energy Dialogue In Divided Cyprus, Peace Research Institute Oslo (PRIO), 2022.
<https://www.prio.org/download/publicationfile/3552/6%202022%20Energy%20Transition%20Geopolitics.pdf>
- Gasimov, Zaur. "Russia under Putin in the Eastern Mediterranean: The Soviet Legacy, Flexibility, and New Dynamics" Comparative Southeast European Studies, vol. 70, no. 3, 2022, pp. 462-485.
<https://doi.org/10.1515/soeu-2021-0061>
- James Kneebone, The Mediterranean as a leader in the clean hydrogen economy: production, transmission, end-use, European University Institute, 22 December 2022, <https://fsr.eui.eu/the-mediterranean-as-a-leader-in-the-clean-hydrogen-economy-production-transmission-end-use/>
- James Stocker, No EEZ Solution: The Politics of Oil and Gas in the Eastern Mediterranean, Middle East Journal , Autumn 2012, Vol. 66, No. 4 (Autumn 2012), sayfa.579-597.
- John V. Bowlus, Eastern Mediterranean gas: Testing the field, European Council on Foreign Relations, https://ecfr.eu/special/eastern_med/gas_fields#:~:text=The%20United%20States%20Geological%20Survey,feet%20of%20technically%20recoverable%20gas
- Jorgo Chatzimarkakis, Fuel of the Future: A Blueprint for a Mediterranean Market for Emission-Free Hydrogen, ELIAMEP | Policy Paper #116/2022, <https://www.eliamep.gr/wp-content/uploads/2022/11/Policy-paper-116-Chatzimarkakis-final-EN.pdf>
- Karim Elgendy, The Future of Eastern Mediterranean Energy and Climate Collaboration, Insight Turkey Spring 2022 / Volume 24, Number 2, sayfa 39-54. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/48678905>
- Laurent Ruseckas , Europe and the Eastern Mediterranean: the Potential for Hydrogen Partnership, SWP Comment 2022/C 50, 29.08.2022 <https://www.swp-berlin.org/en/publication/europe-and-the-eastern-mediterranean-the-potential-for-hydrogen-partnership>

- Manfred Weissenbacher, Renewable Energy in the Mediterranean Context: State of the Play and Future Perspectives, IEMed Mediterranean Yearbook 2012, <https://www.iemed.org/publication/renewable-energy-in-the-mediterranean-context-state-of-the-play-and-future-perspectives/>
- Michaël Tanchum, An Eastern Mediterranean Poised between Escalation and Cooperation, Report ISPI, Energy Politics In The Mena Region From Hydrocarbons To Renewables? (Editör:Valeria Talbot), 2022, sayfa.51-73.
- Michaël Tanchum, Two practical proposals to solve eastern Mediterranean energy and boundary disputes, Heinrich Böll Stiftung HBS-İstabil, 10 October 2020 <https://tr.boell.org/en/2020/10/10/two-practical-proposals-solve-eastern-mediterranean-energy-and-boundary-disputes>
- Moritz Rau, Günter Seufert, Kirsten Westphal, The Eastern Mediterranean as a Focus for the EU's Energy Transition, Stiftung Wissenschaft und Politik, 10.02.2022, <https://www.swp-berlin.org/10.18449/2022C08/>
- Murat Koray, Doğu Akdeniz'in Jeopolitik ve Jeostratejik Önemi, Teknolojik Dönüşümler ve Denizaltılarının Rolü, 19 Mart 2020 https://tasam.org/tr/TR/Icerik/53558/dogu_akdenizin_jeopolitik_ve_jeostratejik_onemi_teknolojik_donusumler_ve_denizaltilarinin_rolu
- Roman Vakulchuk, Indra Overland, Daniel Scholten, Renewable energy and geopolitics: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 122, April 2020, 109547, https://www.researchgate.net/publication/338445998_Renewable_energy_and_geopolitics_A_review
- Simone Tagliapietra, The Future of Renewable Energy in the Mediterranean. Translating Potential into Reality (April 20, 2015). FEEM Working Paper No. 030.2015, <https://ssrn.com/abstract=2596601>
- Sun D. & Zhang, J. (2022). China's proposal for the Eastern Mediterranean conflict resolution: a "developmental peace". BRIQ Belt & Road Initiative Quarterly, 4(1), 32-53 sayfa 35-36 https://briqjournal.com/sites/default/files/yazi-ici-dosyalar/2022-12/Sun%20Degang_ENG_0.pdf

Kurumsal Teknik Raporlar, Strateji ve Politika Belgeleri, Panel ve Diğer Cevrimici Kaynaklar:

- 10 soruda Doğu Akdeniz'de enerji denklemi <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/10-soruda-dogu-akdeniz-de-enerji-denklemi/1504248>;
- Accelerating Egypt's Clean Energy Transition, Media Note Office Of The Spokesperson November 12, 2022, <https://eg.usembassy.gov/accelerating-egypts-clean-energy-transition/>
- "Akdeniz'in Kirlenmeye Karşı Korunmasına Ait Sözleşme", T.C.Kültür ve Turizm Bakanlığı, <https://teftis.ktb.gov.tr/TR-263670/akdenizin-kirlenmeye-karsi-korunmasına-ait-sozlesme.html>
- Analysis: Eastern Mediterranean, EIA, Güncelleme tarihi: 16 Kasım 2022, https://www.eia.gov/international/analysis/regions-of-interest/Eastern_Mediterranean
- COP27: EU and Egypt step up cooperation on the clean energy transition, EC Press release, 16 November 2022, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6925
- Dataset: World Energy Statistics and Balances, IEA (2022), <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
- EC Joint Communication To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions, EU external energy engagement in a changing world, Brussels,

18.5.2022, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=JOIN%3A2022%3A23%3AFIN&qid=1653033264976>

EuroAfrica Interconnector: About us <https://www.euroafrica-interconnector.com/about-us/>

EuroAsia Interconnector: About us <https://euroasia-interconnector.com/about-us/>

Eastern Mediterranean, Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Eastern_Mediterranean, son güncelleme 26 Kasım 2022.

Med-TSO en yeni projesine başlıyor: TEASIMED (Verimli, Yeterli, Sürdürülebilir ve Enterkonnekte Akdeniz Elektrik Sistemi), TEİAŞ, <https://www.teias.gov.tr/haberler/med-tso-en-yeni-projesine-basliyor-teasimed-verimli-yeterli-surdurulebilir-ve-enterkonnekte-akdeniz-elektrik-sistemi>

İklim Değişikliğinin Akdeniz'deki Etkileri. Aşırı Isınan Bir Denizden Altı Hikaye” MMI (WWF Akdeniz Girişimi, 2021) https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/wwf_med_tr3.pdf

Paris Anlaşması, T.C.Dışişleri Bakanlığı web sayfası, <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>

Panel: The Role of the Energy Transition in Eastern Mediterranean Energy Security, Regional Clean Energy Outlook Conference, Atlantic Council, 27 Ekim 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=Uci53XGNSZU>

Renewable Energy in the Mediterranean, Aston Centre for Europe, 2011 <https://cor.europa.eu/en/engage/studies/Documents/renewable-energy-mediterranean.pdf>

Renewables 2022 Executive summary, IEA 2022 <https://www.iea.org/reports/renewables-2022/executive-summary>

Renewable Energy Statistics 2022, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2022.pdf?rev=8e3c22a36f964fa2ad8a50e0b4437870

S.1102 - Eastern Mediterranean Security and Energy Partnership Act of 2019, <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/1102/text>

Teasimed 2 (ongoing, 2023 – 2025), Med-TSO, <https://med-tso.org/en/teasimed2-ongoing-2023-2025-3/>

The EU Connectivity Strategy: Putting Words into Action Manuel Widmann, Ağustos 2021, sayfa 13. <https://eias.org/wp-content/uploads/2021/08/The-EU-Connectivity-Strategy-.pdf>

Türkiye Ulusal Enerji Planı 2022, T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

85: Enerji Sektöründe Yapay Zeka ve Dijital Dönüşüm: Bilimetric Bir İnceleme**İbrahim Etem Kaya**TEDAŞ Gelişim Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Endüstri Mühendisi
Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Yönetim ve Organizasyon Doktora Öğrencisi**Sevgi Kaya**

TEİAŞ Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Endüstri Mühendisi

ÖZET

Her geçen gün hızlı bir şekilde gelişen yapay zeka ve dijital dönüşüm teknolojileri, enerji sektöründe zorlukların üstesinden gelmek için önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, elektrik enerjisi sektöründe yapay zeka ve dijital dönüşüm teknolojilerine yönelik akademik yayınları bütüncül bir yaklaşım ile incelemek ve bu çalışmaların araştırma eğilimlerini ortaya koymaktır.

Nicel araştırma yöntemi ile yapılan araştırmada bilimetric ve içerik analizi yaklaşımları birlikte kullanılmıştır. Veriler, Elsevier Scopus veri tabanı üzerinden derlenmiştir. Anahtar kelime ağ analizi ise VOSviewer (Sürüm 1.6.20) programı aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve görselleştirilmiştir.

Elektrik enerjisi sektöründe çalışmalar; yıllara göre dağılım, en üretken yazarlar, en çok tekrar eden kelimeler ve en fazla akademik yayın yapan ülkeler ve kurumlar gibi kategorilerde analiz edilmiştir. Yapay zeka ve diğer dijital teknolojilerle ilgili akademik çalışmaların 2015 yılından sonra hızla arttığı ve bunların çoğunun Çin tarafından yapıldığı görülmektedir. Çin'i sırasıyla ABD, Hindistan, Birleşik Krallık ve Almanya takip etmektedir. Türkiye ise 17. sıradadır. Yapılan çalışmalarda kullanılan anahtar kelimelere bakıldığında en çok Akıllı Şebekeler, Enerji Verimliliği, Nöral Ağlar, Nesnelerin İnterneti, Tahminleme, Enerji Yönetimi ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları gibi alanlarda çalışıldığı görülmektedir.

Sonuç olarak, elektrik enerjisi sektöründe yapay zeka ve diğer dijital teknolojilerin kullanımı hızla artmaktadır. Bu teknolojilerin sektörde önemli bir dönüşüm potansiyeli taşıdığı ve önümüzdeki yıllarda daha yaygın bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Türkiye'nin de bu dönüşümün ön saflarında yer alması için altyapı yatırımlarını, araştırma ve geliştirme faaliyetlerini ve eğitim programlarını artırması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zeka, Dijital Dönüşüm, Bilimetric Analiz, Enerji, Elektrik

ABSTRACT

Rapidly advancing artificial intelligence and digital transformation technologies offer significant advantages in addressing challenges within the energy sector. This study aims to comprehensively examine academic publications focused on artificial intelligence and digital transformation technologies in the electricity sector and to reveal the research trends of these studies.

In this study, a quantitative research approach was adopted, combining scientometrics and content analysis methods. Data was collected from the comprehensive scholarly publication database, Elsevier Scopus. Keyword network analyzes were conducted and visualized using VOSviewer (Version 1.6.20).

Studies in the electricity sector were analyzed in categories such as distribution by year, most productive authors, most frequently occurring words, and countries and institutions with the highest number of academic publications. It was observed that academic studies on artificial intelligence and other digital technologies have increased rapidly since 2015, and most of these studies were conducted by China. China is followed by the United States, India, the United Kingdom, and Germany, respectively. Turkey ranks 17th. When examining the keywords used in the studies, it was observed that most studies focused on areas such as Smart Grids, Energy Efficiency, Neural Networks, Internet of Things, Forecasting, Energy Management, and Renewable Energy Sources.

In conclusion, the use of artificial intelligence and other digital technologies in the electricity sector is rapidly increasing. It is predicted that these technologies have significant transformation potential in the sector and will be used more widely in the coming years. Turkey needs to increase its infrastructure investments, research and development activities, and educational programs in order to be at the forefront of this transformation.

Keywords: Artificial Intelligence, Digital Transformation, Scientometrics Analysis, Energy, Electricity

GİRİŞ

Elektrik enerjisi sektörü, artan nüfus, ekonomik kalkınma ve sürdürülebilirlik gibi çeşitli faktörlerden kaynaklı bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Bu zorluklar arasında artan enerji talebi, yenilenebilir enerji entegrasyonu, şebeke güvenliği ve optimizasyonu, enerji verimliliği ve müşteri memnuniyeti gibi unsurlar yer alır [1,2]. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve sektörün daha sürdürülebilir ve verimli bir hale gelmesini sağlamak için yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapay zeka ve dijital dönüşüm, elektrik enerjisi sektöründe birçok alanda önemli bir değişim potansiyeli taşımaktadır. Yapay zeka, şebeke optimizasyonu, arıza tahmini ve önleme, enerji fiyatlandırma ve talep tahmini gibi alanlarda önemli katkılar sağlayabilir. Dijital dönüşüm ise veri toplama ve analizi, iletişim ve iş birliği, müşteri hizmetleri ve otomasyon gibi alanlarda sektöre yeni imkanlar sunmaktadır [3].

Bu çalışmada, elektrik enerjisi sektöründe yapay zeka ve dijital dönüşümün kullanımına ilişkin güncel gelişmeler incelenmektedir. Elektrik enerjisi sektöründe yapay zeka ve dijital dönüşümün önemini ve potansiyelini vurgulayarak sektördeki paydaşlara bu teknolojilerin kullanımı konusunda rehberlik etmesi amaçlanmaktadır.

Bu doğrultuda ilk bölümde elektrik enerjisi, yapay zeka ve dijital dönüşüme yönelik bilgiler verildikten sonra ikinci bölümde çalışmanın yöntemi ele alınacaktır. Daha sonra çalışmanın bulguları sunulacak ve yorumlanacaktır. Son olarak çalışmanın sonuçları değerlendirilecektir.

1.1. Elektrik Enerjisi Sektöründe Yapay Zeka ve Dijital Dönüşüm

Son yıllarda yaşanan hızlı teknolojik değişimler, ekonomik ve sosyal hayatın her alanında köklü dönüşümlere yol açmaktadır. Sanayi Devriminin lokomotifini olan elektrik enerjisi, Dördüncü Endüstri Devrimi'nde yapay zekaya yerini bırakırken; nesnelerin internetine dayalı, veri odaklı bir ekosistem hızla şekillenmektedir. Bu alanda öncü olan ülkeler, küresel rekabette bir adım öne çıkmaktadır [4].

Enerji sektöründe yapay zeka, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, robotik, siber güvenlik, blok zinciri ve simülasyon gibi teknolojilerin enerji bileşenleriyle bütünleşmesiyle dijital dönüşüm hız kazanmaktadır. Bu sayede, enerji sektöründe akıllı, mikro ve hibrit şebekeler, uzaktan kontrol sistemleri ve sanal santraller gibi yenilikçi çözümler ortaya çıkmaktadır. Dijitalleşmenin ekonomik faydaları arasında doğru tahminler, maliyet düşüşleri,

sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve esneklik yer alırken, otomasyon sayesinde hataların azalması, üretim hızının artması ve maliyetlerin düşürülmesi sağlanmaktadır [5].

Enerji sektöründeki dijital dönüşümün en kritik noktası, elektrik şebekelerinin gelişmesi ve şehirlerin yenilenebilir enerjiye yönelmesidir. Milyonlarca akıllı sensörden gelen verilerin sürekli toplanması ve analiz edilmesiyle geleceğin enerji şebekeleri otomatik akıllı sayaçlar, akıllı şebekeler ve akıllı enerji yönetim sistemleri üzerinden koordineli çalışacaktır. Önümüzdeki 10 yılda ABD ve diğer ülkelerde modern akıllı enerji altyapısına yaklaşık 25 trilyon dolar yatırım yapılacaktır [6].

Yapay zeka ve dijital dönüşüm tüketici etkileşimi ve talep yönetimi alanında önemli bir rol oynamaktadır. Nesnelerin internetiyle birleşen yapay zeka, tüketici davranışlarını analiz ederek enerji talebini daha doğru tahmin etmeyi ve böylece ekonomik yük dağılımını optimize etmeyi sağlamaktadır [7].

Binalardaki enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturan ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin optimizasyonunda da yapay zeka kullanılabilir. Makine öğrenimi algoritmaları, bu sistemlerin verimliliğini artırarak enerji tasarrufu sağlama potansiyeline sahiptir [8]. Dijital dönüşümün etkileyeceği bir diğer konu da bakım, onarım ve arıza faaliyetleridir. İngiltere'de görüntü işleme teknolojisiyle ulusal şebeke oluşturularak elektrik hatlarının insansız hava araçları ile denetlenmesi, arıza tespitinde önemli bir adım olmuştur [9].

Ülkemizde de enerji sektöründe dijitalleşmeye yönelik önemli adımlar atılmaktadır. Başta TÜBİTAK olmak üzere üniversiteler, kamu kurumları ve özel sektörde çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu projelerde yapay zeka, büyük veri analitiği ve diğer dijital teknolojiler kullanılmaktadır. EPDK bünyesinde “Milli Akıllı Sayaç Projesi” ve “Enerjide Milli Teknolojiler Projesi” gibi projelerle yerli yazılımlar geliştirilmektedir. TEİAŞ'ta yapay zekanın kullanıldığı, “Elektriksel Güç Kalitesi ve Şebeke İzleme”, “Yük Tevzi Bilgisi Sistemi Geliştirme” ve “İklimsel Haritaların Uluslararası Standartlara Göre Hazırlanması” gibi önemli alanlarda üç proje bulunmaktadır. Ayrıca Erciyes Üniversitesi yapay zeka merkezinde enerji verimliliğine yönelik projeler yürütülmektedir [10].

YÖNTEM

Hem yerli hem de yabancı literatürde, belirli bir konudaki akademik çalışmaların gelişimini ve etkilerini değerlendirmek için bilimetric araştırma yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Bilimetric araştırma, belirli bir bilimsel alandaki yayınların nicel olarak analiz edildiği bir yöntemdir [11]. "Bilimin bilimi" olarak da adlandırılan bu yaklaşım, bir disiplinin temel yapısını ortaya çıkarmayı, bilimsel çıktılarının etkisini ölçmeyi ve araştırma verimliliğini değerlendirmeyi hedefler [11,12]. Bu yöntem aynı zamanda yayınların ve araştırmacıların etkilerini analiz etmek, bilimsel disiplinlerin büyümesini ve yapısını incelemek için de kullanılır [13,14].

Bu çalışmalar araştırma trendlerini ve boşluklarını nicel verilerle destekleyerek, araştırmacılara daha bilinçli kararlar verme imkanı sunar [15].

Belirli konularda literatürün yıl, ülke, kuruluş, yazar gibi kriterlere göre dağılımını ve eğilimini ortaya çıkarmak için çalışmalarda farklı bilimetric analiz araçları kullanılmaktadır. Bu çalışmada Scopus veri tabanı ve VOSviewer programı tercih edilmiştir [16,17].

Başlık, özet ve anahtar kelimeler üzerinden 7.03.2024 tarihinde, "elektrik enerjisi" ve aşağıda tabloda belirtilen anahtar sözcüklerle Scopus veri tabanında yapılan aramada 49575 belgeye ulaşılmıştır. 2222 erken görünüm çalışma ve 1.079.251 patent bulunmuştur. Araştırma konusu ile ilgili olmayan tıp, sinirbilim, ilaç, psikoloji, hemşirelik, veterinerlik alanlarında yapılan çalışmalar hariç tutulmuştur.

Disiplinler açısından bakıldığında çalışmaların büyük çoğunluğu mühendislik (31885) ve bilgisayar bilimi (21285) olduğu görülmektedir. Bu disiplinleri enerji (18377), matematik (9295) ve fizik (4699) alanları takip etmektedir. Ulaşılan veriler ile yıl, ülke, yazar, kurum gibi kriterler incelenmiştir.

Elektrik Enerjisi sektöründe dijital dönüşüm ve yapay zeka kapsamında kullanılabilecek arama kelimeleri tabloda gösterilmektedir: [18].

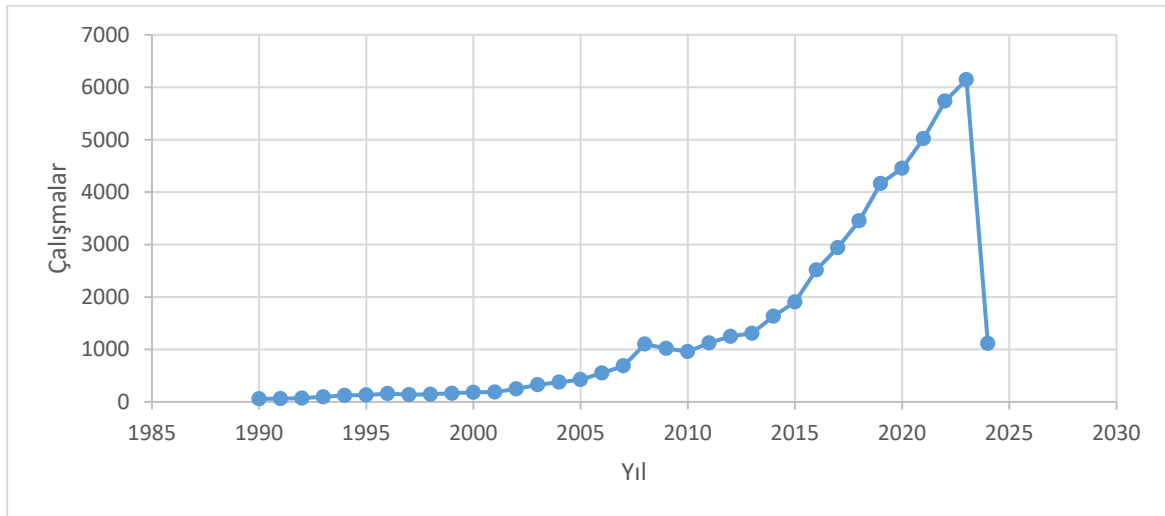
2024

Tablo 1. Veri tababında araştırma yapılan anahtar sözcükler

| | | |
|----|---------------------------------------|---|
| 1 | Elektrik enerjisi (electrical energy) | Dijital dönüşüm (digital transform*) |
| 2 | | Bilgi sistemi (information system*) |
| 3 | | Dijital ikiz (digital twin) |
| 4 | | Endüstri 4.0 (industry 4.0) |
| 5 | | Blok zinciri (blockchain*) |
| 6 | | Akıllı sözleşmeler (smart contract*) |
| 7 | | Robotik süreç (robotic process) |
| 8 | | Makine öğrenmesi (machine learn*) |
| 9 | | Derin öğrenme (deep learn*) |
| 10 | | Yapay zeka (artificial intelligence) |
| 11 | | Yapay sinir ağı (neural network) |
| 12 | | Nesnelerin interneti (internet of things) |
| 13 | | Bulut bilişim (cloud computing) |
| 14 | | Siber güvenlik (cyber security) |
| 15 | | Arttırılmış gerçeklik (augmented reality) |
| 16 | | Sanal gerçeklik (virtual reality) |
| 17 | | Veri analitiği (data analytics) |
| 18 | | Büyük veri (big data) |

ARAŞTIRMA BULGULARI

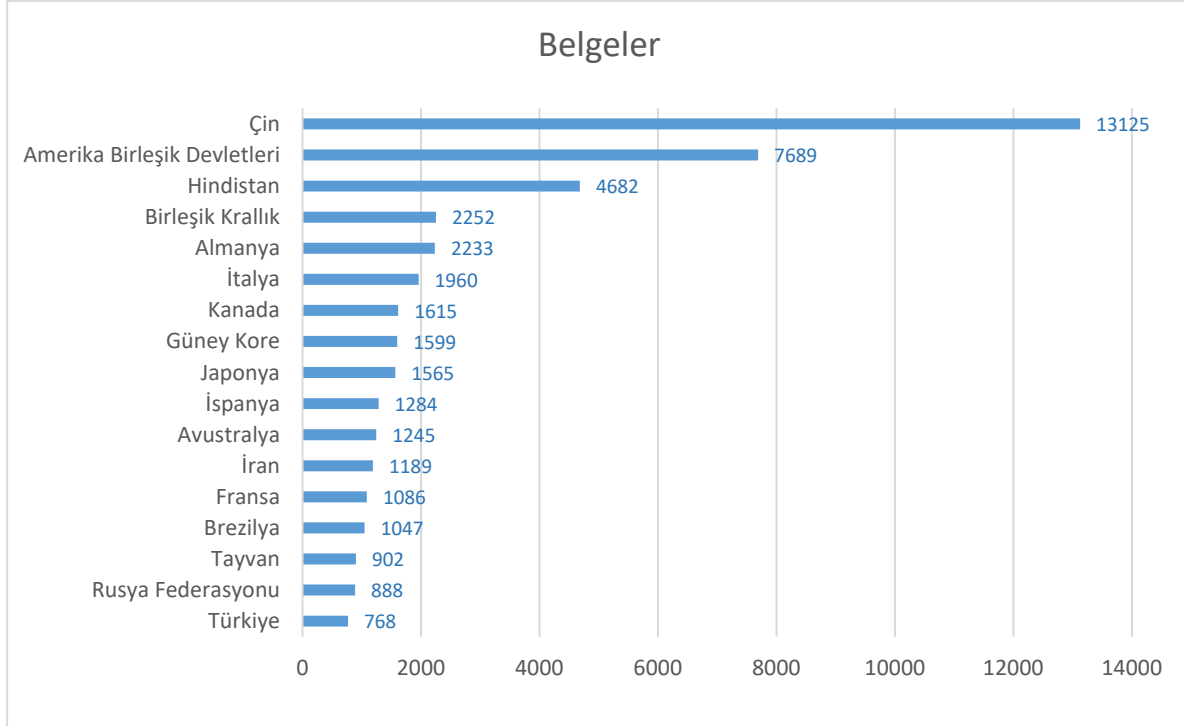
Grafik 1: Yıl Bazında Yayımlanan Çalışma Sayısı



Kaynak: Scopus (2024).

Grafik 1’de görüldüğü üzere, yapay zeka ve dijital dönüşüm üzerine yayımlanan çalışmaların yıllara göre çoğunlukla arttığı, özellikle 2010’dan itibaren sürekli bir artış kaydettiği görülmektedir. 2023 yılında çalışma sayısının 6000’i geçtiği görülmektedir. 2024 yılının ilk aylarındaki makale sayısı daha şimdiden 1000’i geçmiştir.

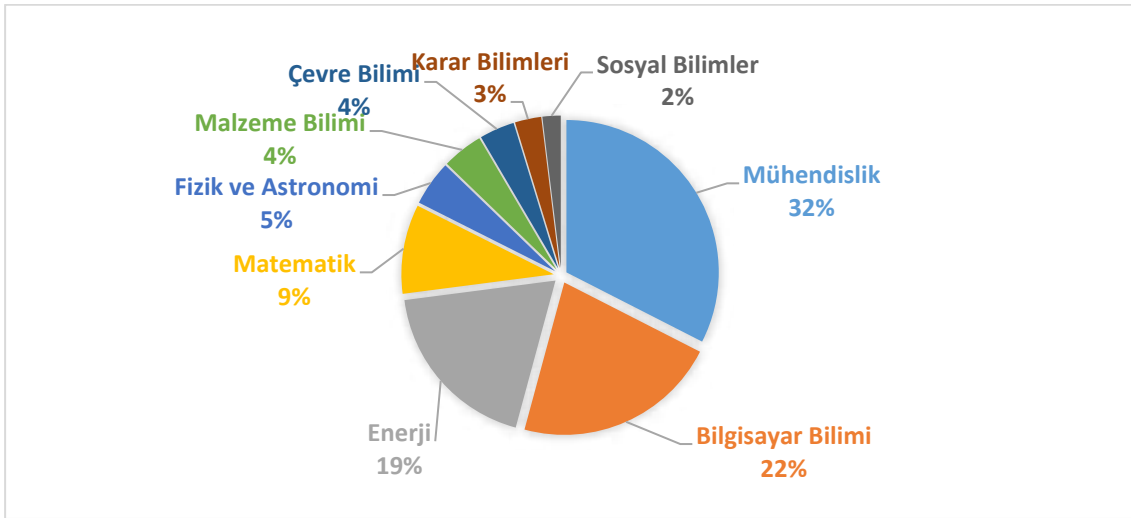
Grafik 2: Ünelere Göre Yayınlanan Çalışma Sayısı



Kaynak: Scopus (2024).

Grafik 2’den anlaşılacağı üzere, araştırılan konuda 13125 makale ile en çok yayına sahip ülke Çin’dir. Bunu 7689 makale sayısı ile Amerika Birleşik Devletleri, 4682 makale sayısı ile Hindistan takip etmektedir. Bu verilere göre Çin ve Amerika Birleşik Devletleri’nin yapay zeka ve dijital dönüşüm literatürüne önemli katkılar sunduğu söylenebilir. Bu konuda en fazla yayına sahip ülkenin Çin olmasının, Çin’in enerji konusuna verdiği önemden kaynaklandığı söylenebilir. Hızla gelişen ekonomiye sahip Hindistan 3. Sırada yer alması da bir diğer önemli konudur. Dünyanın ekonomisine yön veren ülkelerin konu ile ilgili çalışmalara daha fazla ağırlık verdiği görülmektedir. Türkiye ise bu sıralamada 768 makale ile 17. Sırada yerini almaktadır.

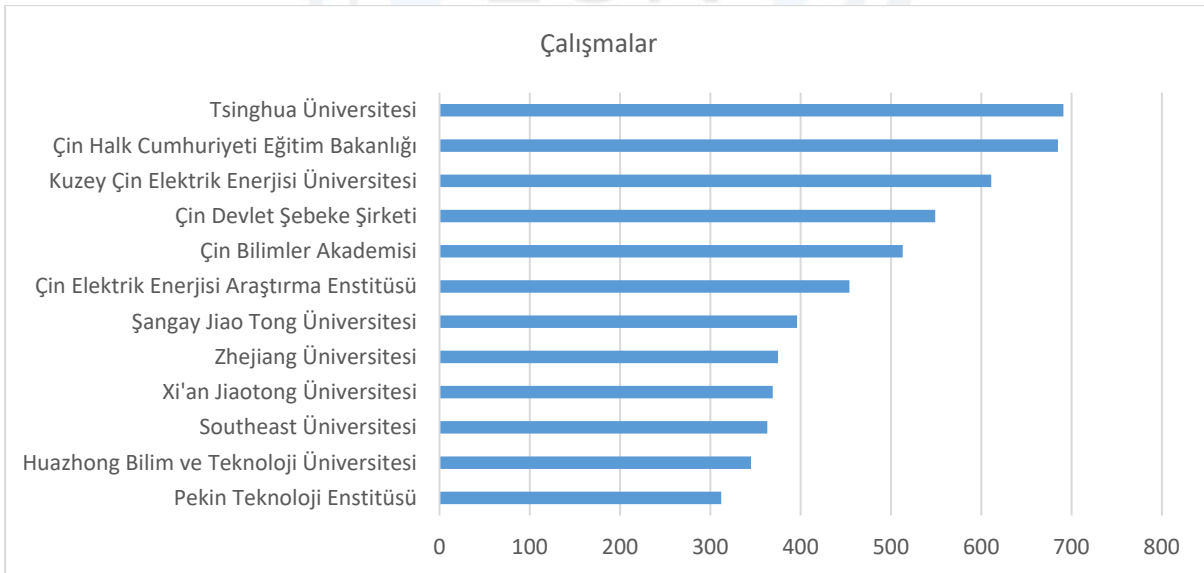
Grafik 3: Çalışmaların Konu Alanları



Kaynak: Scopus (2024).

Makalelerin konu dağılımına baktığımızda %32 ile en fazla mühendislik alanında çalışıldığı gözükmemektedir. %22 ile bilgisayar bilimi, %19 ile enerji öne çıkmaktadır.

Grafik 4: En Üretken Kuruluşlar

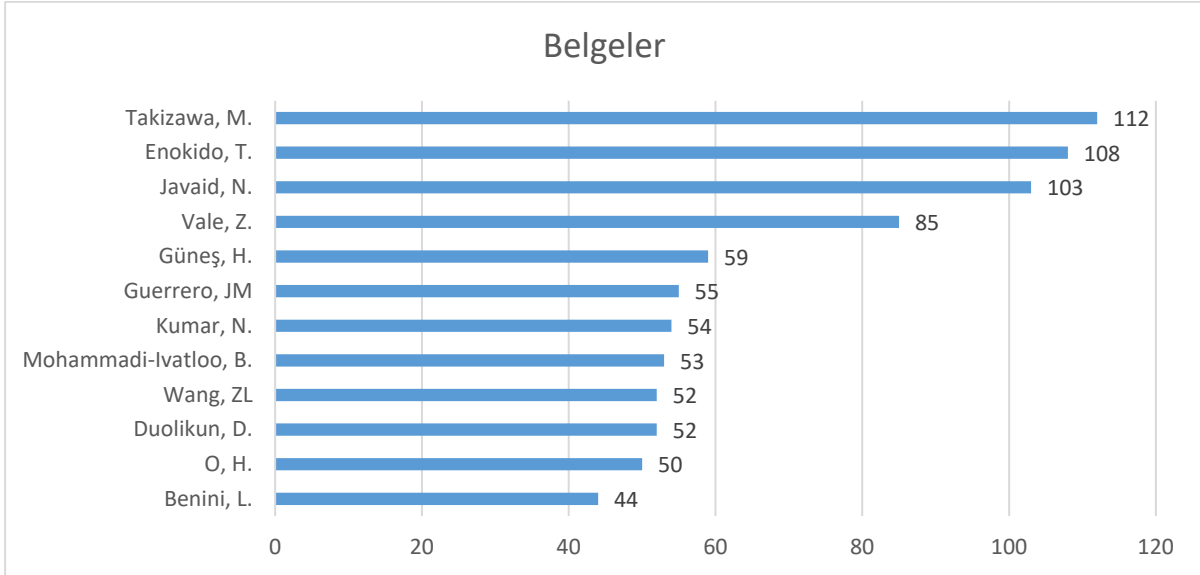


Kaynak: Scopus (2024).

Yayın açısından en üretken kuruluş 691 makale ile Çin'de bulunan Tsinghua Üniversitesi'dir. Grafikte bulunan kuruluşların tamamı Çin'de bulunmaktadır. Üniversitelerin

dışında Çin Devlet Şebeke Şirketinin de yayım olarak en üretken kuruluşlardan olması önemli bir husustur.

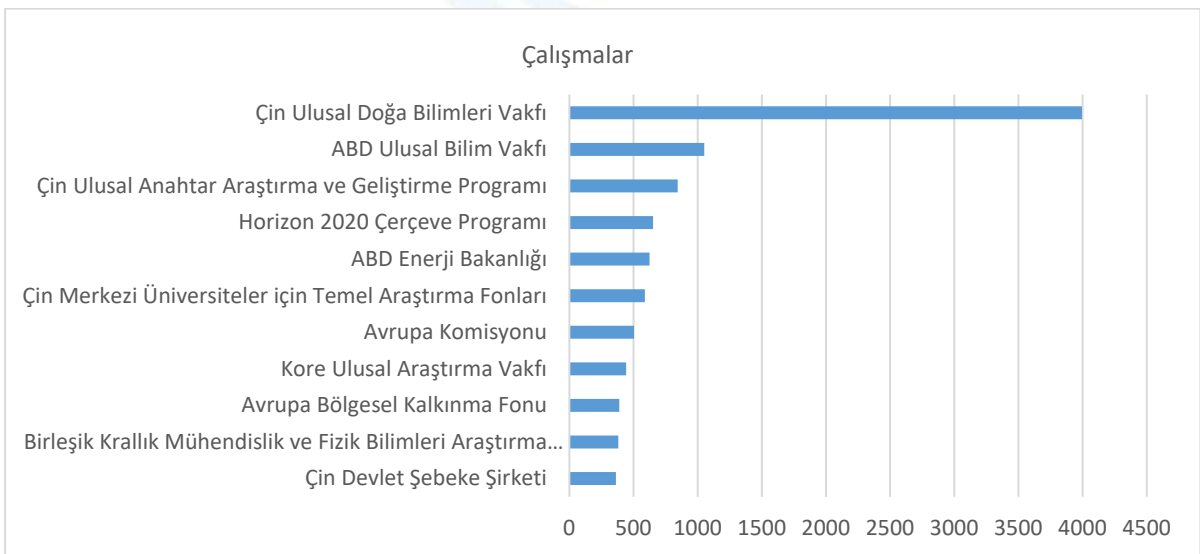
Grafik 5: En Üretken Yazarlar



Kaynak: Scopus (2024).

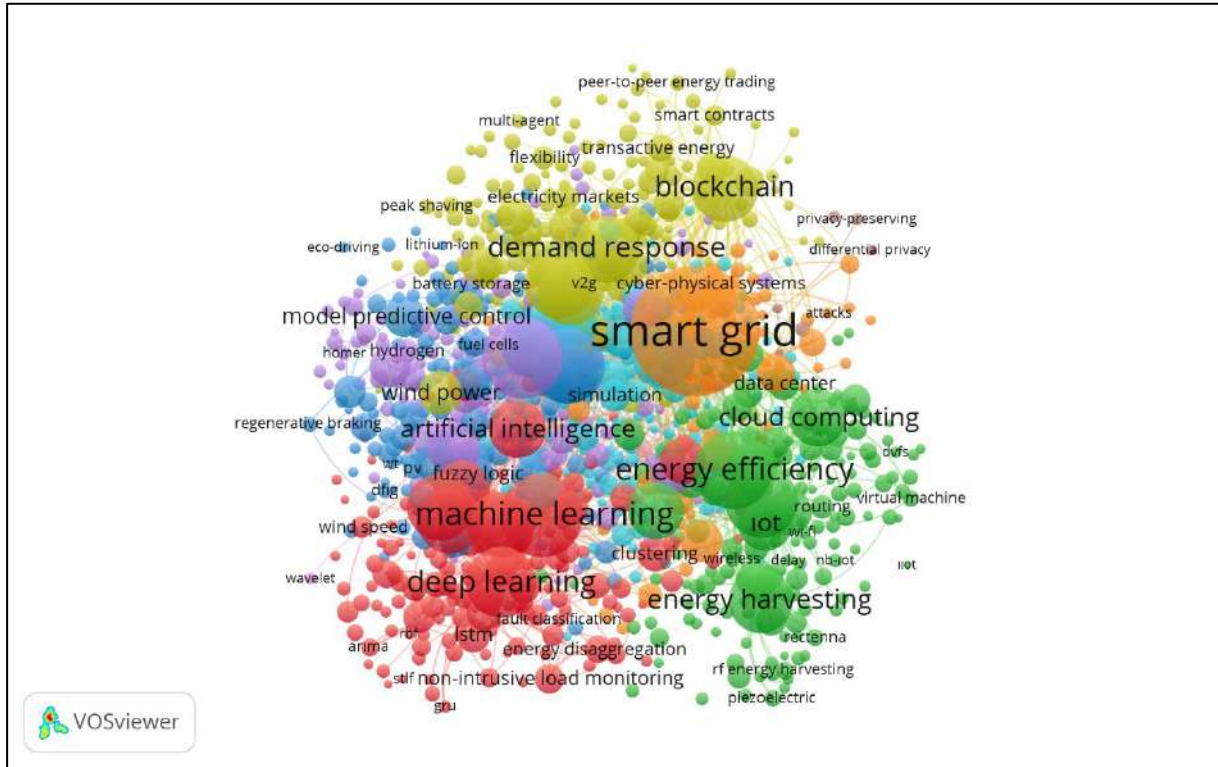
Takizawa, M. 112 çalışma ile yazarlar arasında en fazla yayım yapan kişidir. Bunu Enokido, T. 108 atıfla, Javaid, N. 103 yayımla takip etmektedir.

Grafik 6: Araştırmalara Finansal Destek Sağlayan Kuruluşlar



Kaynak: Scopus (2024).

Grafik 8: Kelime Analizi Ağ Haritası



Kaynak: VOSviewer (2024).

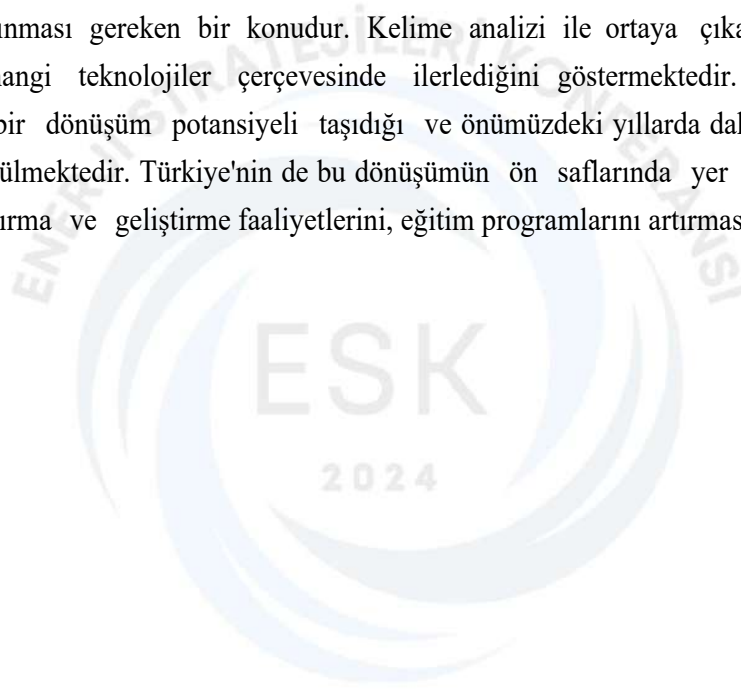
Grafik 7’de görüldüğü üzere elektrik enerjisi, yapay zeka ve dijital dönüşüm konularında yapılan çalışmaların özetlerinde geçen kelimeler analiz edilmiştir ve 6 ana grup olduğu tespit edilmiştir.

1. Sarı renkli olarak ifade edilen (demand response, electricity markets, blockchain ve micro grid) mikro şebekeler, talebe yanıt verilmesi, blok zinciri ve elektrik piyasası gibi konuların olduğu gruptur.
2. Turuncu renkli olarak ifade edilen grup (smart grid, security, cyber physical system) akıllı şebekelerin ve onların güvenliği ile ilgili konuları içermektedir.
3. Kırmızı grup ise daha çok (Big data, machine learning, deep learning, artificial intelligence) makine öğrenmesi, büyük veri ve derin öğrenme gibi yapay zeka konularına odaklanmaktadır.
4. Yeşil grup (Internet of things, energy efficiency, energy harvesting, cloud computing) nesnelerin interneti, enerji verimliliği, bulut bilgisayar gibi konuları içermektedir.
5. Mavi grup (energy management, energy storage, electric vehicle) enerji yönetimi, enerji depolama ve elektrikli araçlarla ilgili çalışmaların olduğu gruptur.
6. Mor grup ise mavi grupla benzer ve ortak çalışmaların olduğu (renewable energy, wind energy, solar energy) yenilenebilir enerji, rüzgar ve güneş enerjisi çalışmalarına odaklanan gruptur.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu araştırmada elektrik enerjisi alanında dijital dönüşüm ve yapay zeka gibi güncel konularla yapılan yayınların bilimetric analiz yönetimi ile doküman, yıl, ülke, kuruluş, yazar, üniversite bazında incelenerek okuyuculara ve araştırmacılara literatürün son durumu sunulmuştur. Elektrik ve enerji sektörünün son yıllarda gittikçe önemi artmakta ve önemli dönüşüm geçirmektedir. Çalışma konusuna yönelik olarak bilimetric ve içerik analizinde yeterince çalışma olmadığı görülmektedir. Bu nedenle detaylı yapılacak çalışmalara ve literatüre katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Çin ve ABD başta olmak üzere dünyadaki en ileri ekonomilere sahip ülkelerde yer alan kuruluşların bariz şekilde önde olduklarını ve çalışmalarını ile önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Çin'de yer alan Bakanlıkların ve Devlet Şirketlerinin çalışmalar yayınladığı, bazı çalışmalara finansal destek verdiği dikkate alınması gereken bir konudur. Kelime analizi ile ortaya çıkan ağ haritasındaki gruplar, alanın hangi teknolojiler çerçevesinde ilerlediğini göstermektedir. Bu teknolojilerin sektörde önemli bir dönüşüm potansiyeli taşıdığı ve önümüzdeki yıllarda daha yaygın bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Türkiye'nin de bu dönüşümün ön saflarında yer alması için altyapı yatırımlarını, araştırma ve geliştirme faaliyetlerini, eğitim programlarını artırması gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Dünya Enerji. (2021). 2021 Yenilenebilir Enerji Küresel Durum Raporu Özeti. <https://dunyaenerji.org.tr/2021-yenilenebilir-enerji-kuresel-durum-raporu-ozeti/>
- [2] TESAB. (n.d.). Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye Elektrik Enerjisi Sektörü Değerlendirmesi. <http://www.tesab.org.tr/attachments/article/78/Avrupa-Yesil-Mutabakati-ve-Turkiye-Elektrik-Enerjisi-Sektoru-Degerlendirmesi.pdf>
- [3] Doğan, E., & Narin, M. (2024). Enerji Sektöründe Dijitalleşme ve Blokzincir Teknolojisindeki Gelişmenin Ekonomik Etkileri. Uluslararası Ekonomi Ve Yenilik Dergisi, 10(1), 125-148. <https://doi.org/10.20979/ueyd.1438329>
- [4] Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi. (2021). Ulusal Yapay Zeka Stratejisi 2021-2025. <https://cbddo.gov.tr/yapay-zeka/>
- [5] Türkiye Makine Mühendisleri Odası (TMMOB). (2021). Dijitalleşme ve Enerji sunumu. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/3Oturum-BatuVarlik-DijitallesmeveEnerji.pdf
- [6] U.S. Department of Energy. (2020). <https://www.energy.gov>
- [7] Shura. (2021). Türkiye’de enerji sektörünün dijitalleşmesi kapsamında iş modellerinin, teknolojilerin ve gerekli mevzuat altyapısının değerlendirilmesi. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/03/dijitallesme-mart2022.pdf>
- [8] Mhlanga, D. (2023). Artificial intelligence and machine learning for energy consumption and production in emerging markets: a review. *Energies*, 16(2), 745. [geçersiz URL kaldırıldı]
- [9] Makala, B., & Bakovic, T. (2020). Artificial intelligence in the power sector. [Kitabın Adı] (Bölüm No.). [Yayınevi].
- [10] Türkiye Bilimler Akademisi. (2023). TUBA-978-625-8352-19-1. (Rapor No.) Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.
- [11] Serenko, A. (2013). Meta-analysis of scientometric research of knowledge management: Discovering the identity of the discipline. *Journal of Knowledge Management*, 17(5), 773-812. <https://doi.org/10.1108/JKM-05-2013-0166>
- [12] Wang, G. G., Gilley, J. W., & Sun, J. Y. (2012). The “Science of HRD Research”: reshaping HRD research through scientometrics. *Human Resource Development Review*, 11(4), 500-520. <https://doi.org/10.1177/1534484312452265>

- [13] Gao, S., Hu, Y., Janowicz, K., & McKenzie, G. (2013). A spatiotemporal scientometrics framework for exploring the citation impact of publications and scientists. *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems* (pp. 204-213). <https://doi.org/10.1145/2525314.2525368>
- [14] Kim, M. C., Zhu, Y., Kim, M. C., & Zhu, Y. (2018). Scientometrics of Scientometrics: Mapping historical footprint and emerging technologies in scientometrics. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.77951>
- [15] Ekinci, G., & Bilginer Özsaatçı, F. G. (2023). Yapay Zeka ve Pazarlama Alanındaki Yayınların Bibliyometrik Analizi. *Sosyoekonomi*, 31(56), 369-388. <https://doi.org/10.17233/sosyoekonomi.2023.02.17>
- [16] Gerçek, M., & Gerçek, R. G. (2022). İnsan kaynakları yönetimi çalışmalarının bibliyometrik analizi (2017-2021). *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(4), 816-832. <https://doi.org/10.25287/ohuiibf.1063903>
- [17] Tunçsiper, Ç. (2023). Dijital Dönüşüm ve Sağlık Ekonomisi: Dijital Sağlık Üzerine Bibliyometrik Bir Analiz. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 12(1), 21-31. <https://doi.org/10.37989/gumussagbil.1240687>
- [18] Yeşilçelebi, G. (2022). Denetimde Dijital Dönüşüm: Bilimetric Bir İnceleme. *Sayıştay Dergisi*, 33(126), 381-408. <https://doi.org/10.52836/sayistay.1143867>
- [19] Öztürk, N., & Kurutkan, M. N. (2020). Kalite Yönetiminin Bibliyometrik Analiz Yöntemi ile İncelenmesi. *Journal of Innovative Healthcare Practices*, 1(1), 1-13.

133: Elektrik Güç Sistemleri Uygulamalarında Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi: Mevcut Durum ve Perspektifler

Fatma Avli Fırış

K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-
Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

ÖZET

Son yıllarda enerji ekonomisinde karbonsuzlaştırma hareketiyle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan ilgi, bu kaynakların sistem entegrasyonundaki muazzam artışını kaçınılmaz kılmıştır. Ancak, dünya çapında mevcut elektrik güç sistemleri, kesintili yapıya sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının kitlesel ölçekte entegrasyonunu ciddi şebeke kesintileri olmadan yönetecek donanıma sahip değildir. Kesintili yenilenebilir enerjilerin %20'den fazla penetrasyonunun şebekeyi büyük ölçüde istikrarsızlaştırabileceği genel olarak kabul edilmektedir. Bu doğrultuda, sistem güvenilirliğini ve performansını artırmaya yönelik çözümlerden biri olarak, enerji depolama cihazlarının güç sistemlerine entegre edilmesi önerilebilmektedir. Esnek bir güç kaynağı olan enerji depolama sistemleri, elektrik şebekelerindeki pek çok doğal verimsizliği ve eksikliği hafifleterek şebeke güvenilirliğini artırabilmekte; güç üretimini etkili bir şekilde yöneterek kesintili yenilenebilir kaynakların tam entegrasyonunu kolaylaştırabilmektedir. Bu minvalde enerji depolama sistemlerinin iki önemli avantaj sunduğu söylenebilmektedir. İlk olarak, elektrik üretimini yük veya elektrik kullanıcılarından ayırarak, arz ve talebi düzenlemeyi kolaylaştırmaktadır. İkinci olarak ise yerel şebekeler veya mikro şebekeler için dağıtılmış depolama fırsatları sağlar, bu da şebeke güvenliğini büyük ölçüde artırır ve dolayısıyla enerji güvenliğini sağlar. Bu makalede, enerji depolama sistemlerinin güç sistemlerine entegrasyonunun önemi ve bu süreçte karşılaşılan çeşitli zorluklar ele alınmaktadır. Bu minvalde ilk olarak enerji depolama teknolojileri detaylı bir şekilde sınıflandırılmakta; sonrasında ise enerji depolama sistemlerinin sağlayabileceği avantajlar ve bu teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki teknik, ekonomik ve sosyal zorluklar tartışılmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, elektrik güç sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin entegrasyonuna kapsamlı bir bakış sunmayı amaçlamakta; bu bağlamda depolama odak noktasını, zorluklarını, muhtemel gelecek görünümünü ve araştırma boşluklarını vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, güç sistemleri, enerji depolama, entegrasyon.

ABSTRACT

In recent years, the decarbonization movement in energy economics, coupled with the growing interest in renewable energy sources, has inevitably led to a significant increase in their integration into power systems. However, existing global electrical power systems lack the capability to manage the large-scale integration of intermittent renewable energy sources without causing significant grid disruptions. It is widely accepted that the penetration of intermittent renewable energies exceeding 20% could greatly destabilize the grid. As a solution to enhance system reliability and performance, the integration of energy storage devices into power

systems has been proposed. Energy storage systems (ESS), as flexible power sources, can alleviate many inherent inefficiencies and deficiencies in electrical grids, thereby enhancing grid reliability and facilitating the full integration of intermittent renewable sources through effective power management. In this context, energy storage systems offer two significant advantages. First, they decouple electricity generation from load or electricity consumption, making it easier to balance supply and demand. Second, they provide distributed storage opportunities for local grids or microgrids, which substantially increases grid security and, consequently, energy security. This paper examines the importance of integrating energy storage systems into power systems and the various challenges encountered in this process. In this regard, it first provides a detailed classification of energy storage technologies, followed by a discussion of the advantages that energy storage systems can offer, as well as the technical, economic, and social challenges hindering their widespread adoption. Ultimately, this study aims to provide a comprehensive overview of the integration of energy storage systems in electrical power systems, highlighting the focus areas, challenges, potential future outlook, and research gaps in this domain.

Keywords: Renewable energy, power systems, energy storage, integration.

GİRİŞ

Günümüzde modern dünya her geçen gün daha da çağdaş hale gelmektedir. Elektrik enerjisi, yaşamın her alanında ana itici güç olup, konutlardan büyük sanayilere kadar hemen her sektörde tüketilmektedir. Elektrik üretimi ise büyük ölçüde gazla çalışan jeneratörler, dizel jeneratörler, kömürle çalışan jeneratörler gibi geleneksel enerji üretim sistemlerine dayanmaktadır. Son zamanlarda, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki sanayiler, üretilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmını tüketmektedir. Büyük sanayiler, toplam elektrik üretiminin neredeyse üçte birini kullanmakta olup, bu oran her geçen gün artmaktadır [1]. Bu denli yüksek enerji tüketimi, küresel ölçekte ciddi sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yenilenemeyen enerji üretimi nedeniyle iklim değişiklikleri meydana gelmekte ve bu durum devam ederse, dünya büyük bir tehlike ile karşı karşıya kalacaktır [1].

Geleneksel enerji üretim sistemleri ağırlıklı olarak doğal gaz, kömür, dizel gibi fosil yakıtları kullanmakta olup, bu durum karbon emisyonları ve diğer sera gazlarının salınımından başlıca sorumludur [2]. Karbon ve diğer sera gazlarının salınımı, küresel sıcaklıkların her geçen gün artmasına yol açmaktadır [2]. Karbon emisyonlarının azaltılması, yeryüzü sıcaklığının kontrol altına alınması, kurulum ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesi gibi pek çok avantaj, geleneksel enerji üretimi yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla elde edilebilir [3]. Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt kıtlığı ve çevresel sorunları hafifletmek amacıyla güç sektöründe kullanılmakta olup, sera gazı emisyonlarından arındırılmıştır [4].

Yenilenebilir enerjiye geçişin önündeki en büyük zorluk, bu kaynakların değişken ve kesintili doğasıdır; bu da enerji arz ve talebini dengeleme noktasında teknik uyum gerektirmektedir [5]. Enerji depolama sistemleri, pik yük talebini karşılayarak, voltaj kararlılığını artırarak ve güç kalitesini iyileştirerek büyük ölçekli yenilenebilir enerji entegrasyonunu önemli ölçüde kolaylaştırır.

Bu bağlamda, büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin arz ve talep dengesini sağlaması gerekmektedir. Uygun enerji depolama sistemi seçimi, güç sistemlerini önemli ölçüde geliştirebilir ve yenilenebilir enerji üretiminin belirsizliğini azaltabilir.

Güç sistemlerinin optimum çalışmasını sağlamak için çeşitli enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır [6]. İşlevleri, uygulama alanları, ham maddeleri ve yapılarına göre enerji depolama sistemleri; mekanik enerji depolama (MES), kimyasal enerji depolama (CES), elektriksel enerji depolama (ESS), elektrokimyasal enerji depolama (EcES) ve termal enerji depolama (TES) olmak üzere beş kategoriye ayrılabilir [7]. Esnek enerji depolama ve dağıtım işlemi, enerji depolama sistemlerini güç sektöründe daha popüler hale getirmektedir. Enerji depolama sistemleri, son yıllarda kaydedilen gelişmelerle kalıcı bir teknoloji haline gelmiş olup, güç sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bazı sınırlamalarını hafifletmek için uygun bir çözümdür [8]. Enerji arz-talep dengesinin sağlanması, güç dalgalanmalarının giderilmesi, yük dengeleme ve güç kalitesinin iyileştirilmesi, enerji depolama sistemlerinin güç sistemlerindeki başlıca uygulamalarından bazılarıdır. Ayrıca, yenilenebilir enerji üretim belirsizliğinin azaltılması, frekans düzenlemesi ve voltaj kontrolü gibi önemli hizmetler de enerji depolama sistemleri tarafından sağlanmaktadır [9].

ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

2.1. Mekanik Enerji Depolama

Mekanik enerji depolama (MES), en basit ve en esnek enerji depolama sistemidir. Çalışma prensibine göre, bu depolama sistemi üç ana kategoriye ayrılabilir: pompajlı hidro depolama, sıkıştırılmış hava depolama ve volan depolama [10,11].

2.1.1. Pompajlı Hidro Depolama

Pompajlı hidro depolama (PHS) sistemi, elektrik enerjisini su rezervi olarak depolar. Düşük talep dönemlerinde, fazla güç, alt seviyedeki su rezervuarından üst seviyedeki su rezervuarına su pompalamak için kullanılır. Yüksek talep dönemlerinde ise depolanan su, hidroelektrik enerji üretim sisteminde olduğu gibi türbinlere doğru salınarak elektrik üretir. PHS sistemi, önemli güç dönüşüm kayıplarına sahip olmasına rağmen, depolanan enerjinin %70 ila %85'ini geri kazanmak mümkündür [12]. PHS'nin kurulumu için gerekli alan, yüksek sermaye yatırımı ve güvenlik, PHS sisteminin pratik uygulanabilirliği açısından bazı kısıtlamalar arasında yer almaktadır [13].

2.1.2. Sıkıştırılmış Hava Depolama

Üretilen fazla elektrik enerjisi, sıkıştırılmış hava enerjisi olarak depolanabilir. Düşük talep dönemlerinde, elektrik enerjisi, bir elektrik motorunu çalıştırarak havayı sıkıştırmak ve yeraltındaki bir hava konteynerinde depolamak için kullanılabilir. Depolanan sıkıştırılmış hava, doğal gaz ile birlikte yakılarak geleneksel gazla çalışan enerji santrali gibi elektrik üretir. Sıkıştırılmış hava depolama (CAS) sisteminin depolama kayıpları, nispeten düşüktür [14,15]. CAS, modern enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, CAS sistemlerine sahip bazı enerji santralleri inşaat aşamasındadır [16]. Dünya genelinde iki tanesi Almanya'da ve biri ABD'de olmak üzere üç CAS tesisi kurulmuştur. ABD'de üç büyük ölçekli CAS sistemi ve Birleşik Krallık'ta bir CAS sistemi inşa aşamasındadır [17]. CAS'ın esnek çalışması ve yüksek verimliliği, bu sistemin avantajları arasında yer alırken, sermaye yatırımı [17], çevresel kaygılar ve topolojik karmaşıklık [18,19] gibi bazı sınırlamalar da mevcuttur.

2.1.3. Volan Depolama

Elektrik enerjisi, volan depolama (FS) sistemi kullanılarak kinetik enerji şeklinde depolanabilir. Bir FS'nin tüm yapısı, rotorun sabit dönüş hızını ve düşük güç dönüşüm kayıplarını korumak için çok düşük sürtünme ile hazırlanmıştır [20]. Depolanan enerji, kinetik enerjinin motora geri kazandırılmasıyla geri kazanılabilir ve bu durumda motor bir jeneratör olarak çalışır [21].

Güç yoğunluğu, uzun ömür, düşük bakım maliyeti ve yüksek verimlilik, FS sisteminin avantajlarından bazılarıdır [22]. Volan depolamanın başlıca dezavantajları ise çok yüksek sermaye maliyeti, kısa operasyon süresi ve belirgin iç kayıplardır [23,24]. Farklı MES sistemlerinin kilit noktaları Tablo 3'te kaydedilmiştir.

2.2. Kimyasal Enerji Depolama

Kimyasal enerji depolama (CES) sistemi, elektrik enerjisini atomlar ve moleküller arasındaki kimyasal bağlara dayalı olarak daha uzun süreli depolayabilir. Elektron transfer reaksiyonu, depolanan enerjiyi daha sonra kullanım için üretebilir. Popüler CES sistemi, birkaç kategoriye ayrılan yakıt hücresidir (FC). FC, hidrojen/metal ve hava ile beslenen anot ve katot elektrotlarından oluşur. Devredeki kimyasal bağlanmada, elektron iletim hattından geçerek elektrik üretir [25]. Bu bölümde birkaç iyi bilinen FC sistemi ele alınmıştır.

2.2.1. Hidrojen Yakıt Hücresi

Hidrojen yakıt hücresi (HFC), bir CES sistemi olarak enerji sistemlerinde artan ilgi görmektedir. HFC'nin temel hammaddeleri hidrojen ve oksijendir. Bu iki gaz arasındaki kimyasal reaksiyon, elektrik ve su üretir. Su ile elektrik arasındaki ters reaksiyon ise hidrojen ve oksijen üretebilir. HFC, yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (0,6-1,2 kWh/kg). HFC'nin verimliliği nispeten düşük bir sonuç gösterir (%20-50). Büyük ölçekli enerji desteği, tatmin edici depolama kapasitesi, kendi kendine şarj olma yeteneği ve basit yapısı, HFC'nin bazı avantajlarıdır. Buna karşılık, düşük verimlilik, maliyet etkinliği eksikliği ve gaz üretim motoru karmaşıklığı HFC'nin dikkat çekici dezavantajlarından [25,26].

2.2.2. Metal-Hava Yakıt Hücresi

Metal-hava yakıt hücresi (MFC), hammadde olarak metal ve hava kullanır; metal, anot elektrodunda ana yakıt, hava ise katot elektrodunda bir oksidandır. Aynı zamanda, kendi kendine şarj olabilen bir depolama teknolojisidir ve bu teknoloji enerji sistemlerinde kullanım için geliştirilme aşamasındadır. Şarj edilebilir metal yakıt hücrelerinin verimliliği tatmin edici bir aralıkta değildir (<%50) ve ömrü de oldukça kısadır. Elektrik üretimi için anot tarafında alüminyum ve çinko gibi metaller yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük maliyet, yüksek enerji yoğunluğu ve büyük potansiyeli, MFC'yi enerji sistemleri uygulamaları için daha cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, MFC henüz şarj edilebilir bir teknoloji değildir, bu da onu verimsiz kılmaktadır; ancak şarj edilebilir metal yakıt hücreleri geliştirilme aşamasındadır [26]. Çinko metaline yönelik MFC'nin kimyasal reaksiyonları aşağıdaki gibidir:

Anot için: $Zn+4OH \rightarrow Zn(OH)_2+2e^-$.

Katot için: $Zn(OH)_2 \rightarrow ZnO+H_2O+2OH^-$.

2.2.3. Eritilmiş Karbonat Yakıt Hücresi

Ticari uygulamalar için eritilmiş karbonat yakıt hücresi (MCFC), en erken geliştirilmiş yakıt hücresidir. MCFC, yüksek sıcaklık yönelimi ile kaliteli verimlilik ve çevre dostu özelliklere sahiptir. MCFC, 600°C-650°C aralığında yüksek sıcaklıkta çalışır ve bu da bu yakıt hücresi teknolojisini daha cazip hale getirir. Yüksek sıcaklık, bu yakıt hücresinin katalizör metaller olmadan iyi performans göstermesini sağlar. Bu yakıt hücresi, katalizör metal olmadan çalışabildiği için depolama maliyeti ve işletme hassasiyeti azalır ve işletim esnekliği sağlanır. Bu yakıt hücresi, sistem verimliliğini artırabilir ve hidrojenin yakıt hücresi içinde dönüşümü nedeniyle soğutma sistemi maliyetlerini azaltabilir. Bu yakıt hücresi teknolojisi, birincil şebekelerde bant genişliği tabanlı enerji üretim sistemleri için en iyisidir [27,28]. MCFC'nin kimyasal reaksiyonları aşağıdaki gibidir:

Anot için: $CO_2+H_2 \rightarrow H_2O+CO_2+2e^-$.

Katot için: $CO_2+0.5O_2+2e^- \rightarrow CO_2$.

2.2.4. Katı Oksit Yakıt Hücresi

Katı oksit yakıt hücresi (SOFC), zirkonyum oksit ile üretilmiş olup sıvı maddeler içermez. 800°C-1100°C aralığında yüksek sıcaklıkta çalışabilir. Yüksek çalışma sıcaklığı, kimyasal reaksiyonlar ve dönüşümler sırasında meydana gelebilecek kimyasal zehirlenmeleri önler. Bu yakıt hücresi, oksijen ve hidrojen ile beslenir. Katot elektrolitinden anot elektroduna oksijen iyonlarının dönüşümü elektrik enerjisi üretir. Diğer yakıt hücreleri arasında en yüksek kimyasal reaksiyon toleransı ve daha iyi stabilite, SOFC'nin başlıca avantajlarıdır. Ancak bu yakıt hücresinin hammaddesi çok pahalıdır, ve verimliliği [29,30] tatmin edici değildir, bu da bu yakıt hücresinin sınırlamaları arasında yer alır. SOFC'nin kimyasal reaksiyonları aşağıdaki gibidir:

Anot için: $H_2+O^2 \rightarrow H_2O+2e^-$ ve $CO+O^2 \rightarrow CO_2+2e^-$.

Katot için: $O_2+4e^- \rightarrow 2O^2$.

2.3. Elektrik Enerjisi Depolama

Elektrik enerjisi depolama (EES) sistemi, elektrik enerjisini elektrik veya manyetik alan şeklinde depolayabilir. Bu tür bir depolama sistemi, kısa süreli kullanım için önemli miktarda enerji depolayabilir. Süper kapasitör ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri, EES sistemlerine örnek olarak verilebilir.

2.3.1. Süper Kapasitör

Süper kapasitör (SC), diğer adıyla ultra kapasitör, geleneksel kapasitörlere kıyasla daha yüksek enerji kapasitesine sahiptir. SC, genel bir kapasitör gibi iki elektrota sahip olup, ancak enerjiyi geleneksel kapasitörlere göre 10 ila 100 kat daha fazla depolayabilir. Batarya depolamanın şarj-deşarj döngüsü sınırlıdır, oysa SC'nin >1 milyon şarj-deşarj döngüsüne sahip olduğu bilinmektedir. SC depolama sisteminin güvenilir ömür, hızlı şarj işlemi ve hava koşullarına karşı dayanıklılık gibi bazı avantajları vardır.

2.3.2. Süper İletken Manyetik Enerji Depolama

Enerji depolama kapasitesi ve verimliliği, süper iletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemini çekici bir depolama teknolojisi haline getirir. SMES, çok düşük sıcaklıkta süper iletken bobinler üzerinden doğru akım geçirerek elektrik enerjisini manyetik alan olarak depolar. SMES, düşük sıcaklık SMES ve yüksek sıcaklık SMES olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Düşük sıcaklık SMES -268°C ila -270°C aralığında çalışırken, yüksek sıcaklık SMES -163°C'de çalışır. Güç sistemi gereksinimlerine göre giriş-çıkışı kontrol etmek için şarj dönemlerinde DC akım artar vedeşarj dönemlerinde azalır. Çok yüksek elektrik verimliliği, uzun ömür ve esnek işletim, SMES sisteminin bazı avantajlarıdır.

2.4. Elektro-Kimyasal Enerji Depolama

Batarya enerji depolama sistemi (BESS), elektro-kimyasal enerji depolama (EcES) sistemine bir örnektir. BESS, güç sisteminin ana ve temel bileşenlerinden biridir. BESS, kullanılan hammaddeler ve uygulamalara göre çeşitli kategorilere ayrılabilir.

2.4.1. Nikel-Kadmiyum Batarya Depolama

Nikel-kadmiyum batarya, zorlu koşullara dayanabilen sağlam ve güvenilir bir bataryadır. Kurşun-asit bataryalarla karşılaştırıldığında, nikel-kadmiyum bataryaların birkaç avantajı vardır; ancak, nikel-kadmiyum bataryaların bileşenleri pahalıdır. Son birkaç on yıldır, nikel-kadmiyum batarya, acil durum tıbbi ekipmanları, profesyonel video kameralar, çift yönlü kontrol radyoları gibi cihazlar için tercih edilen batarya olmuştur. Nikel-kadmiyum batarya, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve daha az toksik metallerle sahip yeni bataryalar lehine kullanımdan kaldırılmaktadır.

2.4.2. Nikel-Metal Hidrit Batarya Depolama

Nikel-metal hidrit batarya depolama, büyük boyutlarda olup yüksek basınçlı çelik kaplar içerir. Nikel-metal hidrit bataryanın temel avantajları, yüksek güç yoğunluğu ve çevre dostu hammaddelerdir. Modern nikel-metal hidrit batarya, nikel-kadmiyum bataryaya kıyasla %40 daha yüksek enerji yoğunluğu sunar, ancak bu bataryanın ömrü nikel-kadmiyum bataryaya göre daha kısadır. Nikel-metal hidrit batarya genellikle lityum batarya teknolojisinde bir ara aşama olarak kabul edilir.

2.4.3. Kurşun-Asit Batarya Depolama

Farklı uygulamalarla yönlendirilen kurşun-asit batarya, küçük sızdırmaz kurşun-asit (SLA) batarya ve büyük valf ayarlı kurşun-asit (VLA) batarya olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. SLA ve VLA bataryaları, düşük aşırı voltaj verimliliğine sahiptir, bu da bataryanın şarj sırasında gaz oluşturma potansiyelini aşmasını engeller. SLA ucuzdur, ancak işletme maliyetleri çok yüksek olabilir. SLA ve VLA bataryalarının en iyi performans gösterdiği sıcaklık 25°C'dir.

2.4.4. Sodyum-Kükürt Batarya Depolama

Sodyum-kükürt, sıvı sodyumun negatif aktif malzeme olarak kullanıldığı yüksek sıcaklıklı bir bataryanın geliştirilmesine olanak tanır. Çalışma sıcaklığı 300°C olup, katı bir elektrolit kullanarak bu bataryayı yaygın olarak kullanılan ikincil hücreler arasında üstün kılar. Bu bataryanın ömrünün 15 yıla kadar olduğu ve verimliliğinin %85'e kadar çıkabileceği iddia edilmektedir. Sodyum-kükürt bataryası, 1 ms başlatma süresi bildiren en hızlı işlevsel tepki sürelerinden birine sahiptir.

2.4.5. Lityum-İyon Batarya Depolama

Li-ion batarya, en umut verici ve en hızlı yükselen batarya türüdür. Kırılgandır ve güvenli çalışma için bir koruma devresine ihtiyaç duyar. Bu bataryanın nispeten kısa bir ömrü vardır ve bu, büyük bir endişe kaynağıdır. Bu bataryanın yaşlanma sorunları üzerine yapılan araştırmalar büyük ilerleme kaydetmektedir. Enerji maliyeti oranı açısından bakıldığında, bu batarya diğer BESS türleri arasında en pahalı bataryadır.

2.4.6. Vanadyum Redoks Akış Bataryası Depolama

Redoks akış bataryası, yeniden şarj edilebilir bir uygulama olması nedeniyle ikincil bir batarya olarak bilinir. İki redoks çift arasında enerji dönüşüm prensibi bir elektrokimyasal reaksiyondur. Redoks reaksiyonu, iki farklı organizma arasında elektronların değiş tokuş edildiği bir mekanizmadır. Bir elementin oksidasyon durumunda, bir elektron kazanıldığında veya kaybedildiğinde bir değişiklik meydana gelir. Vanadyum redoks akış bataryasının diğer batarya teknolojilerine göre uzun ömür, yüksek enerji dönüşüm verimliliği, aktif termal yönetim, güvenlik ve çevre koruma özellikleri ve yüksek performans gibi avantajları vardır.

2.5. Termal Enerji Depolama

Elektrik enerjisi, gerektiğinde kullanılmak üzere termal ısıtma veya soğutma olarak depolanabilir. Endüstriyel ve konut alanlarında elektrik enerjisinin yaklaşık %50'si genellikle ısıtma veya soğutma hizmetleri için kullanılır [31]. Termal enerji depolama (TES) sistemi, 2017'den 2022'ye kadar TES uygulamasının %11 oranında artırılacağı tahmin edilen bir depolama teknolojisidir [32]. TES, elektrik enerjisini -40°C ile 400°C arasında bir sıcaklık aralığında termal enerji olarak depolayabilir.

2.5.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama (SHS), elektrik enerjisini termal enerji olarak depolamak için basit ve etkili bir teknolojidir. Termal ısıtma veya soğutma enerjisini depolamak için duyulur sıvı veya katı ortamlar kullanılır.

Polimerler, mermer taş, doğal kil ve seramikler de termal enerji depolamak için kullanılabilir [33,34]. SHS malzemeleri maliyet açısından uygun, verimli (verimlilik %50 ile %90 arasında) ve çevre dostudur [35,36]. Enerji yoğunluğu ve depolama verimliliği, termal yalıtımın iyileştirilmesiyle daha da artırılabilir. Düşük sermaye yatırımı, esnek operasyon ve çevre dostu olma, duyulur ısı depolama sisteminin bazı avantajlarıdır.

2.5.2. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama (LHS) teknolojisi, duyulur ısı depolama sisteminin güncellenmiş versiyonudur. Depolanan enerji yoğunluğu, duyulur ısı depolamaya göre nispeten daha yüksektir. Faz değişim malzemeleri (PCM) olarak bilinen yağ asidi ve parafin gibi malzemeler, LHS performansını artırmak için kullanılır [33]. PCM, katıdan sıvıya veya katıdan katıya faz değiştirebilir. LHS'nin enerji depolama kapasitesi, duyulur ısı depolama sistemine göre daha yüksektir. Depolama verimliliği %75 ile %90 arasında değişmektedir [36]. Bu depolama teknolojisi, hem kısa hem de uzun vadeli uygulamalar için kullanılabilir, bu da bu teknolojinin bir avantajıdır [33].

2.5.3. Termo-Kimyasal Sorpsiyon Depolama

Termo-kimyasal sorpsiyon depolama (TCSS) sistemi, diğer TES sistemleri arasında en yüksek enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu teknoloji, elektrik enerjisini geri dönüşümlü bir termo-kimyasal prosedür kullanarak ısıtma veya soğutma olarak depolar [34]. TCSS henüz ticari olarak kullanılmamaktadır çünkü ticari piyasada bulunabilirlik için hâlâ geliştirilme aşamasındadır. Bu depolama sistemi, %75 ile %100 arasında çok yüksek bir depolama verimliliğine sahiptir. TCSS, ticari kullanım için kullanılabilir hâle geldiğinde endüstriyel ısıtma (175°C), soğutma (-18°C) ve konut ısıtma (25°C ile 50°C arası) ve soğutma (0°C ile 12°C arası) amaçları için kullanılabilir [33,36]. Atık ısı geri kazanılabilir, bu da bu depolama sisteminin bir avantajıdır.

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ UYGULAMALARI

Enerji depolama sistemi (ESS) uygulamaları, iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Yenilenebilir enerji (YE) sistemleri olan ve olmayan güç şebekelerinde uygulamalar. YE sistemleri olan ve olmayan güç şebekelerinde ESS uygulamaları, hem üretim hem de dağıtım tarafında yer alır. Bu bölümde, güç şebekelerindeki çeşitli ESS uygulamalarının kapsamlı bir tartışması sunulmaktadır.

3.1. YE Sistemleri Olmadan Üretim Tarafı Uygulamaları

Bir güç şebekesinin dağıtım tarafı, elektrik enerjisi tüketicilerine ve bağlı yüklere aittir. Dağıtık enerji kaynakları (DER) genellikle yardımcı hizmetler sağlamak amacıyla burada yerleştirilir. Bu bölümde, YE sistemleriyle entegre edilmiş ESS biriminin dağıtım tarafındaki olası uygulamaları sunulmaktadır.

ESS, üretim tarafında optimum güç sistemi operasyonunda önemli bir rol oynayabilir. Bir güç şebekesinin üretim tarafı, genellikle uzun mesafelerde yüksek voltajlı elektrik ile çalışır. Genellikle, YE sistemleri, dağıtım tarafında bir dağıtık enerji kaynağı (DER) sistemi olarak kullanılırken, üretim tarafında YE sistemlerinin ESS ile entegre edildiği güç şebekelerinde nadiren bulunur. ESS'nin YE sistemleri olmadan üretim tarafındaki ana uygulamaları aşağıdaki bölümde tartışılmaktadır.

3.1.1. Çıktı Yumuşatma

Rotor hızındaki, alan kaynağındaki, yük değişikliklerindeki vb. değişiklikler nedeniyle, geleneksel birincil jeneratörün çıktısı nominal değerinden sapabilir. ESS, reaktif güç sağlayarak sistemi destekleyebilir ve çıkışı kontrol edebilir. Bazen ESS, üretim tarafında güç şebekelerini destekleyerek, fazla enerjiyi emerek çıkıştaki ani yükselmeleri önleyebilir. ESS ayrıca, depolanan enerjiyi sağlayarak çıkış düşüşünü telafi

edebilir. ESS'nin bu uygulaması, dağıtım tarafındaki güç kalitesi sorunlarını büyük ölçüde azaltabilir [37].

3.1.2. Zaman Kaydırma

Temelde, birincil şebeke, talep profiline dayalı olarak güç üretimini sürdürmek için üretim gönderim hizmetine sahiptir. Çoğu küçük ölçekli güç sistemi, ESS'nin zaman kaydırma rolü oynayabileceği güç üretim gönderim tekniğine sahip değildir. Zaman kaydırma, üretim tarafında yük dengeleme ile neredeyse aynıdır. ESS birimi, düşük talep saatlerinde fazla enerjiyi emer ve depolanan enerjiyi yüksek talep saatlerinde enjekte eder. Zaman kaydırma uygulamaları için zirve ve düşük talep yükleri arasındaki enerji açığı önemli ölçüde azaltılacaktır. Ana gereksinimler, ESS'nin uzun süreli çalışma süresi ve depolama verimliliğidir. Güç sisteminin yüksek kurulu kapasitesi de zaman kaydırma için önemli bir faktördür.

3.2. YE Sistemleri ile Dağıtım Tarafı Uygulamaları

3.2.1. Frekans Düzenleme

Frekans düzenleme, modern bir güç sistemi için temel bir terimdir. Güç talebinin zaman içindeki değişimi, sistem frekansının kararsızlığına neden olur [38]. ESS, frekans sapması sorununa etkili bir çözüm sağlayarak sistem frekansını izin verilen seviyeye geri getirebilir [39,40]. ESS ile birlikte aktif güç kontrolü ve bir düşüş kontrol döngüsüne sahip kontrolör, güç sistemine bir frekans düzenleyici olarak hizmet edebilir. Birincil düzenleyici, ikincil düzenleyici ve üçüncül düzenleyici olmak üzere üç farklı frekans düzenlemesi, arz-talep dengesizliğini azaltabilir ve frekans sapması sorununu telafi edebilir [41,42]. Araştırmacılar, frekans sapması sorununu en aza indirmek için çeşitli stratejiler önermiştir. Merkezi, merkezi olmayan ve dağıtılmış bir kontrol sistemi, YE bağlantılı küçük ölçekli güç sistemleri için güç arzı dengesizliğini, voltaj ve frekans değişimini azaltmak amacıyla önerilmiştir [43]. Durum yaklaşımlı MPC tabanlı bir dağıtılmış ikincil kontrol tekniği [44], yük frekans düzenleme hizmeti için önerilmiştir. Önerilen teknik, sapma değerinden nominal değere doğru yük frekansını yavaşça artırabilir.

3.2.2. Gerilim Kontrol Desteği

Güç sisteminin kararlılığı, gerilim kontrol desteği gerektirir. Sistem gerilimi, güç sistemi gereksinimine göre izin verilen bir seviyede tutulmalıdır. ESS, reaktif güç desteği sağlayarak gerilim kontrol kaynağı olarak hizmet verebilir. ESS genellikle dağıtık kaynak (DR) olarak kullanılır, bu kaynaklara yerel güç kaynakları da denir. Reaktif güç desteği uzun mesafeden başlatılamaz, bu nedenle yerel bileşenler bu durumu destekleyerek gerilim kontrol operasyonunu gerçekleştirebilir. Gerilim kontrol desteği için iki uzlaşma algoritması, yani ağırlıklı uzlaşma kontrolü (WCC) ve dinamik uzlaşma kontrolü (DCC) Ref [45,46]'de tartışılmıştır. Sistem gerilim seviyesini gereken aralıkta tutmak ve gerilim sapmasını en aza indirmek için Ref [47]'de bir dağıtılmış kontrol sistemi ve koordineli kontrol sistemi önerilmiştir.

3.2.3. Döner Rezerv

Güç sisteminin ara sıra enerji açığını telafi etmek için kullanılan yedek üretim kapasitesi, döner rezerv olarak bilinir [48]. Enerji açığı, güç sistemini kapatmaya zorlayabilir. ESS, enerji açığını karşılamak için uygun bir çözümdür. ESS, fazla enerjiyi depolayabilir ve enerji açığı döneminde, ESS'deki depolanan enerji, talebi karşılamak için şebekelere iletilebilir [49,50].

3.2.4. Güç Kalitesinin İyileştirilmesi

Arz-talep dengesizliği, üretim gücündeki dalgalanmalar vb., bir güç sisteminin güç kalitesini düşürebilir. ESS, güç kalitesi sorununu en aza indirmek ve güç kalitesini artırmak için uygun bir çözüm olabilir.

ESS'nin uygulanması, güç sisteminin optimum şekilde çalışmasına yardımcı olabilir ve elektrikli bileşenlerin hızlı bir şekilde bozulmasını önleyebilir. Güç kalitesinin iyileştirilmesi için birim taahhüdü (UC) ve sayısal simülasyon [51], harmonik güç dalgalanmasını azaltmak için bir kontrol tekniği [52], çıkış güç kalitesini iyileştirmek için bir ayırık Kalman filtresi (DKF) [53] mevcut literatürde bulunmaktadır. Güç kalitesinin iyileştirilmesi ile ilgili benzer çalışmalar [54,55]'de bulunabilir.

3.2.5. Tepe Yük Kesme, Enerji Yönetimi ve Enerji Arbitraji

Bir güç sisteminde yük profili zamanla değişebilir ve yük eğrisi, yüklerdeki değişiklikleri gösterebilir. Elektrik ekipmanlarının artmasıyla birlikte tepe talep de artar. Tepe talebi karşılamak, her tür güç sistemi için önemli bir zorluktur [56]. İşletme, bakım ve yakıt maliyetleri her geçen gün artmaktadır [57]. Bu nedenle, tepe yük azaltma, enerji sağlayıcıları ve son kullanıcılar için birincil endişe kaynağıdır. ESS, tepe yük sorununu hafifletmek için uygun bir çözümdür. ESS, tepe yük kesme uygulamaları için düşük talep dönemlerinde enerji depolayabilir ve tepe dönemlerde depolanan enerjiyi sağlayabilir. Mevcut literatürde, ESS teknolojilerini kullanarak tepe yükü azaltmak için çeşitli stratejiler bulunmaktadır. İç içe geçmiş çok amaçlı optimizasyon yöntemi, doğrusal programlama yöntemiyle genetik algoritma (GA) [58], doğrusal olmayan programlama yöntemi [59] ve tepe yük kesme uygulamaları için ESS şarj-deşarj kontrol tekniği [60] mevcut literatürde bulunmaktadır. Tepe yük kesme ile ilgili daha fazla araştırma [61]'de bulunabilir. Bunun yanı sıra, enerji yönetimi, elektrik enerjisinin israfını ve bir güç sisteminin işletme maliyetlerini azaltmak ve tüm elektrik bileşenlerinin işletimini optimize etmek için uygun bir teknik olabilir. ESS, enerji yönetiminin sonuçlarını elde etmek için bir yedek güç kaynağı olarak kullanılabilir. Mevcut literatürde, farklı amaçlar için enerji yönetimi konusunda birkaç araştırma bulunmaktadır. BESS ile enerji tüketim maliyetlerini azaltma [61], hibrit şebeke-BESS ile güç şebekesinde tekno-ekonomik faydalar sağlama [62], akıllı ev-EV enerji akışını kontrol etme [63] ve ESS entegrasyonu ile farklı maliyet türlerini azaltma [64] konularında geniş bir şekilde tartışılmaktadır. Buna karşılık, elektrik enerjisi, birim başına elektrik maliyetinin nispeten düşük olduğu düşük talep zamanlarında ana şebekeden satın alınabilir ve ESS kullanılarak enerji depolanabilir. Genellikle, elektrik maliyeti tepe saatlerde çok yüksektir. Depolanan enerji, aşırı talebi karşılamak için kullanılabilir veya ana şebekeye satılabilir. Enerji arbitraj uygulamaları için ESS, ekonomik kâr elde etmek için mükemmel bir elektrik bileşenidir [65,66].

3.2.6. Fotovoltaik ve Rüzgar Sistemlerinde Depolama

Fotovoltaik ve rüzgar sistemlerinin üretimi doğal davranışa bağlıdır. Bulutlu günlerde PV üretimi, fırtınalı koşullarda rüzgar üretimi kesintiye uğrar. PV ve rüzgar sistemlerinde ESS'nin dahil edilmesi, yükler için kesintisiz güç sağlamaya yardımcı olur [67,68]. PV ve rüzgar sistemlerinden fazla üretim, ESS tarafından emilecek ve düşük YE üretim dönemlerinde depolanan enerji enjekte edilecektir. PV ve rüzgar sistemlerinde ESS'nin dahil edilmesi, son kullanıcılara önemli ekonomik faydalar sağlayabilir [69].

3.2.7. YE Çıktı Düzgünleştirme

YE sistemi ile ESS'nin uygulanması, YE üretimindeki belirsizliği en aza indirmek için en iyi çözümdür. Doğal davranıştaki değişiklikler, YE üretiminde değişikliğe neden olabilir, bu da YE üretiminin doğal davranıştaki belirsizlik nedeniyle dalgalanabileceği anlamına gelir. Çıktı dalgalanması, voltaj değişimi, ters akım akışı, frekans sapması vb. sorunlar, ESS birimini YE sistemiyle bağlayarak azaltılabilir. YE üretim çıktısındaki dalgalanmayı azaltmak için mevcut literatürde bir model öngörü kontrol (MPC) stratejisi [70], bir geri adım kontrolörle uyarlanabilir bir yansıtma komut filtresi [71], hibrit enerji

depolama sistemi (HESS) için merkezi bir kontrol sistemi [72] bulunmaktadır. YE çıktısını düzgünleştirme ile ilgili benzer çalışmalar [73–81]'de bulunabilir.

3.2.8. YE Sistemi Sabitleme ve Zaman Kaydırma

Günümüzde çevresel kaygılar, büyük ölçüde sera gazı emisyonları ile ilişkilidir. Büyük YE sistemleri çevresel sorunları dengeleyebilir. Rüzgar ve PV üretim sistemleri gibi YE sistemleri genellikle ESS ile entegre edilir. ESS, büyük YE üretim tesisi için enerji üretimi ve yönetim maliyetleri sırasında bir yedek jeneratör olarak işlev görebilir [73,74]. YE sistemlerinin enerji depolama sistemleri ile güçlendirilmesi üzerine yapılan araştırmalar [75,76,77]'te bulunabilir. YE kaynaklarına sahip küçük ölçekli güç sistemleri, ESS kullanarak zaman kaydırma uygulamaları da gerçekleştirebilir. YE bağlı güç sistemlerinde zaman kaydırma işlemleri aynı zamanda enerji düzgünleştirme hizmetleri de sağlayabilir. Güneşli günlerde, PV üretimi daha yüksek olur ve yeterli rüzgar akışında rüzgar jeneratöründen elde edilen üretim tatmin edici olabilir. YE üretimi, düşük kapasiteli güç sisteminin talebini karşılayabilir ve bu koşullarda bazı fazla güç mevcut olabilir. YE sistem entegreli ESS, YE birimlerinden üretilen fazla gücü depolayabilir ve zaman kaydırma işlemini gerçekleştirebilir [78,79]. Genellikle, zaman kaydırma işlemi, konut YE sistemleri gibi düşük kapasiteli küçük ölçekli güç sistemleri için uygulanabilir. YE entegreli ESS biriminin zaman kaydırma uygulaması, yalnızca bir gün içindeki bir dönemden diğerine geçişi değil, aynı zamanda çalışma gününden haftasonuna ve tersine geçişi de içerir. Zaman kaydırma özellikleri, uzun mesafede akım akışını azaltarak iletim kayıplarını azaltabilir [80,81].

3.2.9. YE Sistemi Salınımı Damping

YE sistemlerinin yüksek penetrasyonu, bir güç sisteminin esnekliğini ihlal edebilir. YE sistemlerinin artan penetrasyonu, operasyonel kararlılığı azaltabilir ve güç arzında salınım sorunlarına neden olabilir. YE'nin yüksek penetrasyonu ayrıca iletim hattı boyunca ters akım akışına da neden olabilir. 0.5 ila 1 Hz frekansında çalışan ESS birimi, güç salınımını dindirmek için sisteme gerçek güç emebilir ve enjekte edebilir. Filoya yanıt ve modülerlik, ESS'nin en çekici özelliklerindedir. Güç paylaşım operasyonunu başlatmak için çoğu ESS birimi birkaç saniye içinde çalışmaya başlayabilir. YE sistemlerinin yüksek penetrasyonu nedeniyle meydana gelen güç salınımı, ESS'nin uygulanması ile önemli ölçüde telafi edilebilir. BESS, SMES, FS ve SC, bu uygulama için uygun ESS'ler olabilir [82,83].

ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARININ AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

4.1. Teknik Avantajlar

Çeşitli enerji depolama sistemlerinin (ESS) uygulanmasının bazı kayda değer teknik avantajları aşağıda incelenmiştir [84,85].

4.1.1. Şebekenin Sağlam Karakteristiklerinin Geliştirilmesi

Geleneksel frekans kontrol üniteleri düşük gecikme süresi ve düşük rampa oranına sahiptir. Sonuç olarak, hızlı büyüme ile birlikte büyük ölçüde sürdürülebilir enerjinin de dahil olduğu şebeke genişlemesinden kaynaklanan yeni frekans tutarlılığı sorunlarının taleplerini tamamen karşılayamamaktadır. ESS'nin dinamik düzenlemesi, hızlı tepki ve yüksek kısa vadeli güç yönetim yetenekleri sayesinde elektrik şebekesi frekans yönetimine katılmasını sağlayarak ek avantajlar elde edilebilir. Bu, sistem frekansını belirlenen sınırlar içinde tutarak elektrik şebekesinin güvenilirliğini ve bütünlüğünü artıracaktır.

4.1.2. Sürdürülebilir Enerji Üretiminin Şebeke Uyumunun İyileştirilmesi

Sürdürülebilir üretimin (rüzgar ve güneş enerjisi üretimi gibi) farklı zaman dilimlerindeki güç dalgalanmaları, sistem yedek gereksinimlerini, üretim zamanlamasını, güvenlik işlevlerini ve diğer faktörleri önemli ölçüde etkilemiştir. Bu nedenle, Çin'in şebekeye bağlı rüzgar enerjisi için ulusal gereksinimleri, rüzgar çiftliklerinin çeşitli dönemlerdeki tepe güç dalgalanmalarının farklı teknik parametreleri karşılama zorunlu kılmaktadır. Rüzgar/13 PV/ESS, karma güç üretimi rüzgar gücü dalgalanmalarının güçlendirilmesine, rüzgar ve güneş enerjisi dalgalanmalarının şebeke üzerindeki etkisinin azaltılmasına, şebeke dayanıklılığının artırılmasına ve büyük rüzgar çiftlikleri ve güneş enerji santrallerinin şebekeye entegre edilmesi için elverişli koşullar sağlanmasına yardımcı olabilir.

4.1.3. Reaktif Güç Düzeltme Gereksinimi

Rüzgar ve güneş enerjisi üretimi, hat gerilim dalgalanmalarını kolayca oluşturabilir ve bu durum gerilim aralığını aşabilir. Dalgalanma yeterince şiddetli ise, elektrik şebekesinin gerilim tutarlılığını etkileyebilir. Pilot projede kullanılan ESS, reaktif güç dağıtım stratejisine dayalı olarak reaktif güç desteği sunabilir. Sonuç olarak, ESS, hat gerilimini sabit tutmak ve gerilim dalgalanmalarını ve titreşimlerini ortadan kaldırmak için ek reaktif güç ayarlama cihazlarına yardımcı olabilir ve şebekenin gerilim düzenlemesini güvence altına alabilir.

4.1.4. Güç Faktörü İyileştirme

Güç faktörü düzeltilmesi, genellikle günlük operasyonlarında büyük miktarda reaktif güç tüketen endüstriyel müşteriler tarafından gereklidir. Güç faktörü belirlenen bir eşik değer altına düşerse, genellikle onlara hizmet eden elektrik sağlayıcısı tarafından bir ceza uygulanır. Bu müşterilerin tesislerinde bir ESS kurulmuşsa, bu durumdan önemli ölçüde fayda sağlarlar.

4.1.5. Rüzgar Enerjisinin Kısıtlanması

Rüzgar enerjisi kısıtlaması, sadece rüzgar enerjisi büyümesi ve sürdürülebilir enerji kullanımını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda rüzgar çiftliklerinin sermaye gelirini de etkiler. Bir ESS, rüzgar enerjisinin tam potansiyeliyle kullanılabilmesi için bir şebekenin yönetilmesinde kullanılabilir. Ayrıca, "düşük talep" döneminde, bir ESS cihazı sürdürülebilir enerjiyi absorbe edebilir ve "yüksek" yük döneminde tepe tıraşlamayı gerçekleştirebilir. Bu, sistemde barındırılacak rüzgar enerjisi miktarını artırmakla kalmaz, aynı zamanda rüzgar enerjisi kısıtlamalarını da minimize eder.

4.2. Teknolojik Zorluklar

4.2.1. Kapasite

ESS gelişimi, düşük sermaye yatırımı, pratik kullanım için yüksek kapasite, yüksek verimlilik, uzun ömür, yüksek güvenlik gibi gereksinimler duyar. Şu anda, düşük sermaye yatırımı, düşük kapasiteli ESS ile sonuçlanmaktadır. Aksine, yüksek kapasiteli ESS, artan sermaye yatırımı ve yüksek işletme ve bakım riski ile sonuçlanır. Pratikte, ESS düşük maliyetli ve yüksek kapasiteli olmalıdır; bu da şu anda ESS uygulaması için büyük bir zorluktur. Ayrıca, düşük kapasiteli ESS, enerji destek uygulamaları için uygulanamaz çünkü elektrik talebinden dolayı güç sistemi ekipmanları hızla artmaktadır. ESS kapasitesi, güç sistemi uygulamaları için zorlu bir faktördür [11].

4.2.2. Ömür

ESS'nin ömrü, güç sistemi uygulamaları için en önemli faktördür; ancak şu anda, çoğu ESS teknolojisi sınırlı bir ömre sahiptir. Ekonomik fayda sağlamak için ESS, güç sistemine uzun vadede hizmet etmelidir. Üretim süreci, hammadde seçimi ve yanlış enerji yönetimi, ESS'nin yaşam döngüsünü azaltabilecek bazı olası nedenlerdir. ESS cihazlarının ömrünü iyileştirmek için birçok araştırma yapılmıştır. Ancak, ömür hala ESS uygulamaları için büyük bir zorluktur. ESS'nin ömrünü iyileştirmek için literatürde yeni topolojiler [86], tahmin tabanlı stratejiler [87] ve batarya depolama enerji yönetimi (BSEM) sistemleri [88] bulunmuştur. Benzer çalışmalar [89,90]'de de bulunabilir.

4.2.3. Güvenlik

Güvenlik, güç sistemi uygulamaları için ESS'nin geliştirilmesi ve entegrasyonu konusunda bir başka zorluktur. ESS uygulaması sırasında meydana gelen birkaç beklenmedik olay, ESS uygulamasına olan ticari ilgiyi azaltabilir. Güvenlik amacıyla, ESS teknolojisi sanayi ve ticari standartlara uygun olarak üretilmelidir [11,17].

4.2.4. Çevresel Etki

Temelde ESS, çevre dostu bir teknoloji olarak inşa edilmiştir. Ancak, üretim sorunları, hammaddeler, enerji depolama süreci ve reaksiyonlar, güç sisteminin karmaşıklığı nedeniyle ESS çevre üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Geniş enerji depolama desteği için en çok benimsenen ESS olan PHS, kurulum yeri nedeniyle çevreye olumsuz etki yapar. Depolama kaplarının yapılması nedeniyle geniş bir alanda ormansızlaşma meydana gelir, bu da ekolojik dengeyi bozabilir. BESS ile ilişkili olabilecek toksik kimyasallar, suyu ve toprağı kirletebilir. SMES'den kaynaklanan güçlü manyetik alan, çevreye ve sağlığa zarar verebilir. Ayrıca, çevresel kaygı, ESS uygulamaları için kritik bir zorluktur [11,17].

4.3. Ekonomik Zorluklar

Güç şebekesi ve yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin (ESS) pratik uygulamaları şu ekonomik zorlukları göstermektedir:

4.3.1. Maliyet Etkinliği

ESS uygulamaları için en büyük zorluk, depolama teknolojisinin maliyet etkinliğidir. Yaygın olarak kullanılan ESS teknolojileri, örneğin BESS, flywheel ve SC, kurulumu pahalıdır, oysa cihaz yalnızca toplam maliyetlerin %30 ila %40'ını gerektirir. Maliyet-fayda analizi, ESS'nin pratik uygulama için hala pahalı olduğunu göstermektedir. Araştırmacılar, pratik uygulamalar için ESS'nin toplam maliyetini azaltmaya daha fazla dikkat etmelidir. Mevcut literatürde, ESS'nin toplam maliyetini azaltmak için çeşitli stratejiler önerilmiştir, ancak bu zorluk pratik uygulamalar için hala görülmektedir. Güç sistemi uygulamaları için ESS'nin toplam maliyetini en aza indirmek amacıyla araştırmacılar tarafından kural tabanlı bir algoritma ve doğrusal kural tabanlı bir algoritma [91], sağlam karma tam sayılı doğrusal programlama (RMILP) [92] ve üç çok kriterli yaklaşım [93] önerilmiştir.

4.3.2. Endüstriyel Kabul

Farklı ESS teknolojilerinin ticarileştirilmesi için endüstriyel katılım gerekmektedir. Güç sistemleri, esas olarak güvenilirlik nedeniyle tanınmış şirketlerden ESS teknolojisini benimser. ESS'nin güvensizliği ve beklenmedik performansı, ESS teknolojisini ticari amaçlarla pazarlamanın birincil kısıtlaması olabilir. Endüstriyel kabul, ESS uygulamaları için olası bir zorluk olarak da karşımıza çıkmaktadır [70].

4.3.3. Hükümet ve Piyasa Politikaları

Dünya genelinde birkaç ülke, güç sistemi uygulamaları için ESS'nin uygulanması konusunda bazı kurallar koymuştur. Bu politikalar, bazen ESS ile bir projeyi yürütmeye yönelik son düzeydeki ilgiyi bozabilir. Ayrıca, ESS'nin piyasa düzeyindeki ilgisi ciddi şekilde azalabilir ve büyük şirketler piyasadan yatırımı çekebilir. İtalya, ESS üzerine yüksek bir şebeke işletim ücreti getirmiştir, bu da ESS ile yeni bir proje uygulamayı caydırabilir. Şu anda, İtalya'da batarya depolama ile birlikte güç şebekesi projeleri, BESS'i destekleyen politikaların olmaması nedeniyle yavaşlamış görünmektedir. Birleşik Krallık, İspanya, Almanya gibi bazı diğer Avrupa ülkelerinin, güç şebekelerine ESS entegrasyonu için kendi hükümet ve piyasa politikaları bulunmaktadır, bu da ESS uygulamalarının önündeki büyük engellerden biridir. Buna karşılık, Avustralya Temiz Enerji Konseyi, ESS dağıtımını artırmak ve Avustralya'da pratik uygulamalar için ESS kullanımını teşvik etmek amacıyla çoklu (on üç) piyasa politikası önermiştir. Bu politikalar, tüm ESS son kullanıcılarının eşitliğini sağlamayı, destek sunmayı ve tüketiciler için standart bir seviyeyi belirlemeyi, ESS projelerinden istenmeyen engelleri kaldırmayı vb. içerir ve Avustralya'da ESS projeleri kurulmasına olan ilgiyi artırır [94,95].

4.4. Sosyal Zorluklar

Sosyal kabul, enerji depolama teknolojilerinin dünya genelinde güç şebekesine kesintisiz ve zamanında uygulanması için önemli bir faktördür. Thomas ve diğerleri, ESS'ye yönelik tutumların kararsız olduğunu ve kabulün, ESS'nin güvenlik, çevresel etkiler ve güvenilirlikle ilgili teknik endişeleri ele alırken aynı zamanda toplumsal eşitlik ve kırılgan grupların korunması gibi toplumsal hedefleri de karşılayacak şekilde tasarlanıp düzenlenmesine bağlı olabileceğini ortaya koymuştur [96].

Bataryalar gibi çeşitli ESS türleriyle ilgili çevresel ve güvenlik riskleri, ESS'nin geniş çapta kabul edilebilirliği açısından kritik faktörlerden biri olabilir. Bu nedenle, tüketicilerin geri dönüşüm ve güvenlik sertifikasyonu gibi potansiyel hafifletme önlemleri hakkında iyi bilgilendirilmesi gerekmektedir. Politika yapımcılar, kullanıcıların ESS'lerin güvenliği, güvenilirliği ve uzun vadeli sürdürülebilirliği konusunda nasıl güven duyabileceklerini düşünmelidir. ESS tanıtım faaliyetleri, kırılgan kullanıcı gruplarını da kapsamalı ve bu tür bir enerji sistemi için esneklik ve piyasa değişim mekanizmaları bu zorlukları ele almalıdır.

ESS'nin çeşitli özelliklerinin seviyesi, tüm kullanıcı türleri için önemli olabilir; ancak, önerilen ve uygulanan biyografik, sosyal ve maddi bağlama bağlı olarak göreceli uygulama ve önemi tüketiciler arasında değişiklik gösterebilir [97]. Dünyanın birçok yerinde hala ESS teknolojilerinden ve bunların enerji esnekliği açısından sağladığı faydalardan habersiz olan birçok insan vardır. Sonuç olarak, kentsel alanların dışındaki ESS benimsenmesini artırmak için yaygın farkındalık gereklidir. Birçok yerde yenilenebilir enerji sistemleri ile birlikte bazı depolama teknolojileri çalışıyor olsa da, doğrudan kullanıcılar bunların nasıl çalıştığını veya operasyonel süreçler üzerinde herhangi bir kontrole sahip olup olmadıklarını bilmiyor olabilirler. Sonuç olarak, kullanıcılar ESS'nin faydalarını tam olarak tanımayabilirler.

Belirli bir bölgede ESS kurulurken, düzenleyiciler ve kullanıcılar ESS'nin yerel hava koşullarına uygun olup olmadığını değerlendirmelidir. Yılın büyük kısmında yüksek nem, aşırı sıcak veya düşük sıcaklık gibi aşırı hava koşulları mevcutsa, ESS teknolojisi seçimi buna göre yapılmalıdır. Belirli bir amaç için ESS uygulamalarının etkinliği, sistemin ne kadar iyi işletildiği ve bakımı yapıldığı ile belirlenir. Kullanıcılar, sistemin yeteneklerinin farkında olmalı ve ondan çok fazla veya çok az şey beklememelidir. Sistem operatörleri ve düzenleyiciler, kullanıcılara ilgili teknik bilgileri sağlamalıdır.

ESS hizmetinin dayanıklılığı için bakım ve rutin bakım sorunları kritik öneme sahiptir. Kurulum alanı müşteri destek alanından veya yerel olarak mevcut kaynaklardan uzakta ise, ESS hizmetinin sağlıklı özelliklerini sürdürmek zor olacaktır. Sonuç olarak, kullanıcı alanının uzaklığı kritik bir faktördür. ESS teknolojisinin yaygın olarak kullanılmaya başlamasından önce bu zorlukların ele alınmaması, istenmeyen senaryolara ve teknolojinin daha az teknik bilgiye sahip kullanıcılar arasında olumsuz bir algı oluşturmaya neden olabilir.

SONUÇLAR

Enerji depolama sistemlerinin (EDS) yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmadaki rolü küresel çapta büyük ilgi görmektedir. EDS teknolojilerinin maliyetlerini azaltma ve mevcut zorlukları aşma konusundaki araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışma, mevcut literatürü kapsamlı bir şekilde inceleyerek, temel EDS teknolojilerini, uygulamalarını ve zorlukları ele almak için yapılan yenilikleri belirlemiştir. Ayrıca, EDS dağıtımının sağladığı faydalar ve karşılaşılan zorlukları vurgulamış, büyük ölçekli EDS entegrasyonunu destekleyecek bir geçiş yol haritası önermiş ve sürdürülebilir ve iklim dostu bir enerji sistemi için gelecekteki araştırmalara yönelik yönlendirmeler sunmuştur.

2024

KAYNAKLAR

- [1] G. Makridou, K. Andriosopoulos, M. Doumpos, C. Zopounidis, Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries, *Energy Policy* 88 (Jan. 2016) 573–583, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.042>.
- [2] L.E. Singer, D. Peterson, International energy outlook 2010, *Int. Energy Outlook Projections* 0484 (May) (2011) 1–410.
- [3] R. Ahmad, N. Gupta, K.R. Niazi, A. Swarnkar, N.K. Meena, A nested optimization for optimal placement and management of solar generation and battery energy storage system in distribution systems, *J Energy Storage* (2018) 1–22.
- [4] K.H. Chua, Y.S. Lim, S. Morris, Battery energy storage system for peak shaving and voltage unbalance mitigation, *Int. J. Smart Grid Clean Energy* January (2013) 357–363, <https://doi.org/10.12720/sgce.2.3.357-363>.
- [5] G.M. Shafiullah, A.M.T. Oo, A.B.M. Shawkat Ali, P. Wolfs, Potential challenges of integrating large-scale wind energy into the power grid—a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20 (Apr. 2013) 306–321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.057>.
- [6] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C.N. Rasmussen, Review of energy storage system for wind power integration support, *Appl. Energy* 137 (Jan. 2015) 545–553, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103>.
- [7] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, Progress in electrical energy storage system: a critical review, *Prog. Nat. Sci.* 19 (3) (Mar. 2009) 291–312, <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
- [8] H. Nazaripouya, Y.-W. Chung, A. Akhil, Energy storage in microgrids: challenges, applications and research need, *Int. J. Energy Smart Grid* 3 (2) (Jul. 2019) 60–70, <https://doi.org/10.23884/IJESG.2018.3.2.02>.
- [9] M.M. Rana, M. Atef, M.R. Sarkar, M. Uddin, G. Shafiullah, A review on peak load shaving in microgrid—potential benefits, challenges, and future trend, *Energies (Basel)* 15 (6) (Mar. 2022) 2278, <https://doi.org/10.3390/en15062278>.
- [10] M. Mahmoud, M. Ramadan, A.-G. Olabi, K. Pullen, S. Naher, A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications, *Energy Convers. Manag.* 210 (December 2019) (Apr. 2020) 112670, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112670>.
- [11] O.S. Burheim, Mechanical energy storage, *Eng. Energy Storage* (2017) 29–46, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814100-7.00003-1>.
- [12] S. van der Linden, Bulk energy storage potential in the USA, current developments and future prospects, *Energy* 31 (15) (Dec. 2006) 3446–3457, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.016>.
- [13] P. Denholm, G.L. Kulcinski, Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems, *Energy Convers. Manag.* 45 (13–14) (Aug. 2004) 2153–2172, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.014>.
- [14] X. Luo et al., “Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale adiabatic compressed air energy storage systems with low-temperature thermal storage,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 589–600, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.091>.
- [15] H.L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, J.P. Lopes, Characterisation of electrical energy storage technologies, *Energy* 53 (2013) 288–298, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.037>.
- [16] R. Madlener and J. Latz, “Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 299–309, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.033>.
- [17] J. Wang, L. Ma, K. Lu, S. Miao, D. Wang, J. Wang, Current research and development trend of compressed air energy storage, *Syst. Sci. Control Eng.* 5 (1) (Jan. 2017) 434–448, <https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1377645>.

- [18] F.A. Bhuiyan, A. Yazdani, Energy storage technologies for grid-connected and offgrid power system applications, in: 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference, Oct. 2012, pp. 303–310, <https://doi.org/10.1109/EPEC.2012.6474970>.
- [19] L. Chen, T. Zheng, S. Mei, X. Xue, B. Liu, Q. Lu, Review and prospect of compressed air energy storage system, *J. Modern Power Syst. Clean Energy* 4 (4) (Oct. 2016) 529–541, <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0240-5>.
- [20] M. Swierczynski, R. Teodorescu, C.N. Rasmussen, P. Rodriguez, H. Vikelgaard, Overview of the energy storage systems for wind power integration enhancement, in: 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Jul. 2010, pp. 3749–3756, <https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5638061>.
- [21] R. Sebasti'an, R. Pe'na Alzola, Flywheel energy storage systems: review and simulation for an isolated wind power system, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (9) (Dec. 2012) 6803–6813, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.008>.
- [22] L. Wang, J.-Y. Yu, Y.-T. Chen, Dynamic stability improvement of an integrated offshore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system, *IET Renew. Power Gener.* 5 (5) (2011) 387, <https://doi.org/10.1049/ietrpg.2010.0194>.
- [23] Y. Xu, et al., Design of a multipulse high-magnetic-field system based on flywheel energy storage, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26 (4) (Jun. 2016) 1–5, <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2542340>.
- [24] M. Amiryar, K. Pullen, A review of flywheel energy storage system Technologies and their applications, *Appl. Sci.* 7 (3) (Mar. 2017) 286, <https://doi.org/10.3390/app7030286>.
- [25] S.G. Chalk, J.F. Miller, Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems, *J Power Sources* 159 (1) (Sep.2006) 73–80, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.058>.
- [26] M.K. Mahapatra, P. Singh, Fuel cells, *Future Energy* (2014) 511–547, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099424-6.00024-7>.
- [27] T. Leo, Molten carbonate fuel cells, *Compr. Renew. Energy* 4 (2012) 247–259, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00408-X>.
- [28] M. Farooque, H.C. Maru, Carbonate fuel cells: Milliwatts to megawatts, *J. Power Sources* 160 (2) (Oct. 2006) 827–834, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.127>.
- [29] C. Sun, R. Hui, J. Roller, Cathode materials for solid oxide fuel cells: a review, *J. Solid State Electrochem.* 14 (7) (Jul. 2010) 1125–1144, <https://doi.org/10.1007/s10008-009-0932-0>.
- [30] M.S. Toprak, M. Darab, G.E. Syvertsen, M. Muhammed, Synthesis of nanostructured BSCF by oxalate co-precipitation – as potential cathode material for solid oxide fuels cells, *Int. J. Hydrogen Energy* 35 (17) (Sep. 2010) 9448–9454, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.121>.
- [31] U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, M. Rood, Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79 (January) (Nov. 2017) 82–100, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.139>.
- [32] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2) (Feb. 2009) 318–345, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [33] A. de Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy Build* 103 (Sep. 2015) 414–419, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.
- [34] I. Sarbu, C. Sebarchievici, A comprehensive review of thermal energy storage, *Sustainability* 10 (2) (Jan. 2018) 191, <https://doi.org/10.3390/su10010191>.

- [35] A.D. Monde, A. Shrivastava, P.R. Chakraborty, Solar thermal energy storage, *Energy Environ. Sustain.* January (2018) 131–162, https://doi.org/10.1007/978-981-10-7206-2_8.
- [36] E. Or'ó, A. Gil, A. de Gracia, D. Boer, L.F. Cabeza, Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants, *Renew. Energy* 44 (Aug. 2012) 166–173, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.008>.
- [37] S.V. Tewari, et al., Computational model of discharge across a gas/solid interface at high pressure, in: 2012 International Conference on Emerging Trends in Science, Engineering and Technology (INCOSSET), Dec. 2012, pp. 532–535, <https://doi.org/10.1109/INCOSSET.2012.6513960>.
- [38] J. Morren, S.W.H. de Haan, W.L. Kling, J.A. Ferreira, Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control, *IEEE Trans. Power Syst.* 21 (1) (Feb. 2006) 433–434, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.861956>.
- [39] J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, J. Matas, L.G. de Vicuña, M. Castilla, Hierarchical control of droop- controlled AC and DC microgrids - a general approach toward standardization, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 58 (1) (2011) 158–172, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>.
- [40] J.M. Guerrero, P.C. Loh, T.-L. Lee, M. Chandorkar, Advanced control architectures for intelligent microgrids—part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 60 (4) (Apr. 2013) 1263–1270, <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2196889>.
- [41] Y.G. Rebours, D.S. Kirschen, M. Trotignon, S. Rossignol, A survey of frequency and voltage control ancillary services—part I: technical features, *IEEE Trans. Power Syst.* 22 (1) (Feb. 2007) 350–357, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888963>.
- [42] H. Bevrani, A. Ghosh, G. Ledwich, Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives, *IET Renew. Power Gener.* 4 (5) (2010) 438–457, <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0049>.
- [43] K. Worthmann, C.M. Kellett, P. Braun, L. Grune, S.R. Weller, Distributed and decentralized control of residential energy systems incorporating battery storage, *IEEE Trans. Smart Grid* 6 (4) (Jul. 2015) 1914–1923, <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2392081>.
- [44] M. Jayachandran, G. Ravi, MPC based secondary control strategy for an islanded AC microgrid under linear loads, in: 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Feb. 2018, pp. 644–651, <https://doi.org/10.1109/ICEES.2018.8443273>.
- [45] M. Zeraati, M.E. Hamedani Golshan, J.M. Guerrero, A consensus-based cooperative control of PEV battery and PV active power curtailment for voltage regulation in distribution networks, *IEEE Trans. Smart Grid* 10 (1) (Jan. 2019) 670–680, <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2749623>.
- [46] M. Zeraati, M.E.H. Golshan, J.M. Guerrero, Voltage quality improvement in low voltage distribution networks using reactive power capability of single-phase PV inverters, *IEEE Trans. Smart Grid* 10 (5) (Sep. 2019) 5057–5065, <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2874381>.
- [47] O. Unigwe, D. Okekunle, A. Kiprakis, Economical distributed voltage control in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic, *CIREN - Open Access Proc. J.* 2017 (1) (Oct. 2017) 1722–1725, <https://doi.org/10.1049/oapcired.2017.1227>.
- [48] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, R. Villafañila-Robles, A review of energy storage technologies for wind power applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (4) (May 2012) 2154–2171, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>.
- [49] M.M. Rana, M.F. Romlie, M.F. Abdullah, Peak load shaving in isolated microgrid by using hybrid PV- BESS system, *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.* 8 (1.1) (Sep.2020) 7–14, <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/0281.12020>.

- [50] Muhammad Usman Usama, D. Kelle, T. Baldwin, Utilizing spinning reserves as energy storage for renewable energy integration, in: 2014 Clemson University Power Systems Conference, Mar. 2014, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/PSC.2014.6808136>.
- [51] T. Masuta, J.G. da Silva Fonseca, H. Ootake, A. Murata, Study on demand and supply operation using forecasting in power systems with extremely large integrations of photovoltaic generation, in: 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), Nov. 2016, pp. 66–71, <https://doi.org/10.1109/ICSET.2016.7811758>.
- [52] W. Liang, B. Ge, Y. Liu, H. Abu-Rub, R.S. Balog, Y. Xue, Modeling, analysis, and impedance design of battery energy stored single-phase quasi-Z source photovoltaic inverter system, in: 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 2016, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855265>.
- [53] D. Lamsal, V. Sreeram, Y. Mishra, D. Kumar, Kalman filter approach for dispatching and attenuating the power fluctuation of wind and photovoltaic power generating systems, IET Gener. Transm. Distrib. 12 (7) (Apr. 2018) 1501–1508, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0663>.
- [54] P. Unahalekhaka, P. Sripakarach, Reduction of reverse power flow using the appropriate size and installation position of a BESS for a PV power plant, IEEE Access 8 (2020) 102897–102906, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997821>.
- [55] S. Aatif, X. Yang, H. Hu, S.K. Maharjan, Z. He, Integration of PV and battery storage for catenary voltage regulation and stray current mitigation in MVDC railways, J. Modern Power Syst. Clean Energy (2020) 1–11, <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000155>.
- [56] ENTSO-E, Electricity in Europe, in: European Network of Transmission System Operators for Electricity November, 2015, pp. 1–45.
- [57] A. Rahimi, M. Zarghami, M. Vaziri, S. Vadhva, A simple and effective approach for peak load shaving using Battery Storage Systems, in: 2013 North American Power Symposium (NAPS), Sep. 2013, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/NAPS.2013.6666824>.
- [58] M.R. Jannesar, A. Sedighi, M. Savaghebi, J.M. Guerrero, Optimal placement, sizing, and daily charge/discharge of battery energy storage in low voltage distribution network with high photovoltaic penetration, Appl. Energy 226 (March) (Sep. 2018) 957–966, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.036>.
- [59] E. Reihani, R. Ghorbani, Load commitment of distribution grid with high penetration of photovoltaics (PV) using hybrid series-parallel prediction algorithm and storage, Electr. Power Syst. Res. 131 (Feb. 2016) 224–230, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.09.004>.
- [60] M.J.E. Alam, K.M. Muttaqi, D. Sutanto, Distributed energy storage for mitigation of voltage-rise impact caused by rooftop solar PV, in: 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Jul. 2012, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345726>.
- [61] M.M. Rana, M.F. Romlie, M.F. Abdullah, M. Uddin, M.R. Sarkar, A novel peak load shaving algorithm for isolated microgrid using hybrid PV-BESS system, Energy 234 (Nov. 2021) 121157, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121157>.
- [62] N.T. Mbungu, R.C. Bansal, R.M. Naidoo, M.W. Siti, Analysis of a grid-connected battery energy storage based energy management system, in: 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Jan. 2020, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071437>.
- [63] K. Kusakana, Optimal energy management of a retrofitted rubber tyred gantry crane with energy recovery capabilities, J. Energy Storage 42 (2021) (Oct. 2021) 103050, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103050>.
- [64] N.T. Mbungu, A.A. Ismail, R.C. Bansal, A.K. Hamid, R.M. Naidoo, An optimal energy management scheme of a vehicle to home, in: 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Jun. 2022, pp. 1056–1060, <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9843114>

- [65] C. A. Sima, M. O. Popescu, C. L. Popescu, and G. Lazaroiu, “Integrating energy storage systems and transmission expansion planning in renewable energy sources power systems,” In 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), IEEE, Sep. 2019, pp. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2019.8893486>.
- [66] T. Coronel, E. Buzarquis, G.A. Blanco, Analyzing energy storage system for energy arbitrage, in: 2017 IEEE URUCON 2017-Decem, Oct. 2017, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/URUCON.2017.8171883>.
- [67] A. Chen, P.K. Sen, Deployment of battery energy storage system for energy arbitrage applications, in: 2016 North American Power Symposium (NAPS), Sep. 2016, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1109/NAPS.2016.7747920>.
- [68] A.K. Rohit, S. Rangnekar, An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: part II – energy storage applications, benefits and market potential, *J. Energy Storage* 13 (Oct. 2017) 447–456, <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.07.012>.
- [69] A.S. Subburaj, B.N. Pushpakaran, S.B. Bayne, Overview of grid connected renewable energy based battery projects in USA, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (May 2015) 219–234, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.052>.
- [70] C. Hanley, et al., Technology development needs for integrated grid-connected PV systems and electric energy storage, in: 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Jun. 2009, pp. 001832–001837, <https://doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411515>.
- [71] F. Zhang, A. Fu, L. Ding, Q. Wu, MPC based control strategy for battery energy storage station in a grid with high photovoltaic power penetration, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 115 (June 2019) (Feb. 2020) 105448, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105448>.
- [72] D. Xu, G. Wang, W. Yan, X. Yan, A novel adaptive command-filtered backstepping sliding mode control for PV grid-connected system with energy storage, *Solar Energy* 178 (June 2018) (2019) 222–230, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.033>.
- [73] Y. Qingyuan, M. Aoki, Suppression of voltage fluctuation by utilizing consumerside energy storage devices in PV connected distribution system, *IFAC PapersOnLine* 51 (28) (2018) 432–437, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.741>.
- [74] X. Li, D. Hui, X. Lai, Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 4 (2) (Apr. 2013) 464–473, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2247428>.
- [75] X. Li, L. Yao, D. Hui, Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations, *J. Modern Power Syst. Clean Energy* 4 (4) (Oct. 2016) 593–603, <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0247-y>.
- [76] M. Al-Saffar, P. Musilek, Reinforcement learning-based distributed BESS management for mitigating overvoltage issues in systems with high PV penetration, *IEEE Trans. Smart Grid* 11 (4) (Jul. 2020) 2980–2994, <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2972208>.
- [77] W. Leighty, Running the world on renewables: hydrogen transmission pipelines and firming geologic storage, *Int. J. Energy Res.* 32 (5) (Apr. 2008) 408–426, <https://doi.org/10.1002/er.1373>.
- [78] C. Quann and T. H. Bradley, “Renewables firming using grid scale battery storage in a real-time pricing market,” In 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), IEEE, Apr. 2017, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8086033>.
- [79] S.A. Abdelrazek, S. Kamalasan, Integrated PV capacity firming and energy time shift battery energy storage management using energy-oriented optimization, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 52 (3) (May 2016) 2607–2617, <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2531639>.

- [80] C.A. Hill, M.C. Such, D. Chen, J. Gonzalez, W.M. Grady, Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation, *IEEE Trans. Smart Grid* 3 (2) (Jun. 2012) 850–857, <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2190113>.
- [81] J.P. Barton, D.G. Infield, Energy storage and its use with intermittent renewable energy, *IEEE Trans. Energy Convers.* 19 (2) (Jun. 2004) 441–448, <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.822305>.
- [82] J.C. Neely, et al., Damping of inter-area oscillations using energy storage, in: 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting July, 2013, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672775>.
- [83] X. Sui, Y. Tang, H. He, J. Wen, Energy-storage-based low-frequency oscillation damping control using particle swarm optimization and heuristic dynamic programming, *IEEE Trans. Power Syst.* 29 (5) (Sep. 2014) 2539–2548, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2305977>.
- [84] A. H. Fathima and K. Palanisamy, “Optimization in microgrids with hybrid energy systems – a review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.059>.
- [85] Y. Tian, A. Bera, M. Benidris, J. Mitra, Stacked revenue and technical benefits of a grid-connected energy storage system, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 54 (4) (Jul. 2018) 3034–3043, <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2825303>.
- [86] W. L. Jing, C. H. Lai, W. S. H. Wong, and D. M. L. Wong, “Smart hybrid energy storage for stand-alone PV microgrid: optimization of battery lifespan through dynamic power allocation,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 833, pp. 19–26, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.833.19>.
- [87] G. Angenendt, S. Zurmühlen, C. Chen, D. Magnor, D.U. Sauer, Reducing cut-off energie of PV home storage systems by using forecast-based operation strategies, in: *IRES 2017 March 2017*, 2017, pp. 1–11.
- [88] P.B.L. Neto, O.R. Saavedra, L.A. de Souza Ribeiro, A dual-battery storage bank configuration for isolated microgrids based on renewable sources, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 9 (4) (Oct. 2018) 1618–1626, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2800689>.
- [89] K. Uddin, T. Jackson, W.D. Widanage, G. Chouchelamane, P.A. Jennings, J. Marco, On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system, *Energy* 133 (Aug. 2017) 710–722, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.116>.
- [90] T.R. Ashwin, A. Barai, K. Uddin, L. Somerville, A. McGordon, J. Marco, Prediction of battery storage ageing and solid electrolyte interphase property estimation using an electrochemical model, *J. Power Sources* 385 (March) (May 2018) 141–147, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.010>.
- [91] P. K. Singha Roy, H. B. Karayaka, Y. Yan, and Y. Alqudah, “Evaluation of reference generation algorithms for dispatching solar PV power,” *Southeast Con.2018*, vol. 2018-April, pp. 1–7, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/SECON.2018.8479257>.
- [92] T. Dragicevic, H. Pandzic, D. Skrlec, I. Kuzle, J.M. Guerrero, D.S. Kirschen, Capacity optimization of renewable energy sources and battery storage in an autonomous telecommunication facility, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 5 (4) (Oct. 2014) 1367–1378, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2316480>.
- [93] H. Bakhtiari, R.A. Naghizadeh, Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen storage with ϵ -constraint method, *IET Renew. Power Gener.* 12 (8) (Jun. 2018) 883–892, <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0706>.
- [94] S.B. Sani, et al., Energy storage system policies: way forward and opportunities for emerging economies, *J. Energy Storage* 32, no. July (Dec. 2020), 101902,

<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101902>.

[95] I. Lammers and L. Diestelmeier, “Experimenting with law and governance for decentralized electricity systems: adjusting regulation to reality,” *Sustainability*, vol. 9, no. 2, p. 212, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/su9020212>.

[96] G. Thomas, C. Demski, N. Pidgeon, Deliberating the social acceptability of energy storage in the UK, *Energy Policy* 133 (August) (Oct. 2019) 110908, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110908>.

[97] G. Thomas, C. Groves, K. Henwood, N. Pidgeon, Texturing waste: attachment and identity in every-day consumption and waste practices, *Environ. Values* 26 (6) (Dec. 2017) 733–755, <https://doi.org/10.3197/096327117X15046905490362>.



0145: MASTERPIECE Projesinden Edinilen Bilgilerle Dijitalleştirme Yoluyla Güneş Enerjisi Entegre Edilmiş Enerji Topluluklarını Güçlendirmek

Samed Pekdemir, Mehmet Koç, Çağatay Koçak, Barış G. Aslanlar
Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş./R&D Department, Bursa, Turkey

ÖZET

Sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle fotovoltaik (PV) sistemlerin topluluk bağlamında entegrasyonunu gerektiren yenilikçi yaklaşımlar talep etmektedir. Bu çalışma, enerji topluluklarını dijitalleştirme yoluyla güçlendirmeyi amaçlayan MASTERPIECE projesinden elde edilen bilgileri sunmaktadır. Sosyal bilimlerden pazarlama teknolojisine kadar geniş bir disiplinler arası çerçeveden yararlanan MASTERPIECE, paydaşlara enerji topluluklarının oluşturulması ve işletilmesinde rehberlik edecek yeni kavramlar, modeller ve metodolojiler sunmaktadır. Özel olarak PV entegrasyonunu kolaylaştırmaya vurgu yapılarak, dijital bir BİT platform ekosistemi, karar verme araçları ve enerji topluluklarında PV sistemlerinin benimsenmesini ve işletilmesini artırmaya yönelik proaktif katılım stratejileri gibi kilit unsurlar içermektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji uygulamalarının sosyoekonomik yönleri, yakıt yoksulluğunun ele alınması ve topluluklarda kapsayıcılığın teşvik edilmesi gibi konulara da vurgu yapılmaktadır. Türkiye dahil olmak üzere çeşitli coğrafi yapıya ve mevzuat sistemine sahip bölgelerde gerçekleştirilen gerçek pilot alanları aracılığıyla, projenin çözümlerinin uygulanabilirliği, ölçeklenebilirliği ve tekrarlanabilirliği gösterilmektedir. Bu çalışma, enerji toplulukları ve PV entegrasyonu bağlamında topluluk temelli yenilenebilir enerji girişimlerini ilerletmek isteyen politika yapımcılar, uygulayıcılar ve araştırmacılar için değerli bilgiler sunabilir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Topluluğu, Fotovoltaik, Yenilenebilir Enerji, Dijitalleştirme

ABSTRACT

Transitioning to sustainable energy systems necessitates the adoption of innovative strategies, particularly those that incorporate renewable energy sources like photovoltaic (PV) systems within community settings. This paper offers an examination of the MASTERPIECE project, which focuses on empowering energy communities through the application of digital tools. By employing an interdisciplinary framework that spans from social sciences to marketing technology, MASTERPIECE introduces innovative concepts, models, and methodologies to support stakeholders in the establishment and management of energy communities. Central to the project is the facilitation of PV integration, supported by a digital ICT platform ecosystem, decision-making toolkits, and proactive engagement strategies designed to increase the adoption and operational efficiency of PV systems within these communities.

Additionally, the study explores the socio-economic impacts of renewable energy applications, including efforts to combat fuel poverty and promote inclusivity within energy communities. Through pilot projects conducted in regions with varying geographical and regulatory conditions, including Turkey, the project demonstrates the feasibility, scalability, and replicability of its solutions. This study offers valuable insights for policymakers, practitioners, and researchers aiming to advance community-driven renewable energy initiatives, with a particular focus on the integration of PV systems.

Keywords: Energy Community, Photovoltaics, Renewable Energy, Digitalization

GİRİŞ

Enerji sektörü yenilenebilir ve hidrokarbon temelli kaynaklara bağımlılığı azaltma zorunluluğu ve savaşlar gibi jeopolitik değişimlerle yönlendirilen hızlı bir dönüşüm geçirmektedir. Doğal gazın tarihsel olarak hakim olduğu bölgelerde, elektriğin birincil enerji taşıyıcısı olarak önem kazandığı görülmektedir. Bu geçiş, sifıra yakın enerji binalarının yaygınlaşması ve ısıtma amaçlı yüksek verimli ısı pompalarının benimsenmesiyle teşvik edilmektedir. Ancak, daha verimli binalarla bile, enerji talebi devam etmekte ve ulaşımın elektrifikasyonu ile artmaktadır.

Sürdürülebilir enerji geçişlerinin sağlanmasında, topluluk bağlamında yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu kilit bir strateji olarak ortaya çıkmıştır [1]. Bu kaynaklar arasında fotovoltaik (PV) sistemler, enerji üretimini merkezsizleştirmek ve yerel dayanıklılığı artırmak için özel bir potansiyele sahiptir. Ancak, PV entegrasyonunun tam potansiyelini gerçekleştirmek, sadece teknik yönleri değil, aynı zamanda sosyoekonomik değerlendirmeleri ve topluluk katılımını da kapsayan kapsamlı çerçeveler gerektirmektedir.

Yenilenebilir Enerji Kaynakları özellikle fotovoltaik (PV) sistemlerinin fiyatı düşmeye devam ettikçe, mikro-üretim enerji sistemlerinde bir artış görülmektedir. Ancak, bu sistemler için gereken ilk yatırım bazı bireyler için engelleyici olabilir [1]. Bu zorlukları ele almak ve güneş enerjisinin demokratik doğasından yararlanmak için Yenilenebilir Enerji Kooperatifleri (YEK) uygun bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. YEK'ler üyelerine temiz enerjiye erişim imkanı sunarken, ulusal veya uluslararası enerji piyasalarına bağımlılıklarını azaltma fırsatı sunmaktadır [2]. Dağıtık yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin koordinasyonu ve vatandaşların enerji sistemindeki gelişen rolleri, gelişmiş yönetim çözümleri gerektirir. Akıllı teknolojiler, dağıtık üretim, depolama ve aktif tüketici katılımını entegre etmeyi mümkün kılarak enerji sistem operasyonlarını optimize etmede kritik bir rol oynamaktadır [3,4,5,6]. Bu dağıtık temiz enerji üretim yaklaşımı ve Enerji Topluluklarının (ET) oluşturulması, sıfır karbon salımı hedeflerine ulaşma yolunda umut verici bir yol sunarken, güvenli ve uygun fiyatlı enerji erişimini sağlamak açısından gelecek vaat eden bir yapıya sahiptir.

Bu yayında MASTERPIECE projesinden yararlanarak dijitalleşme yoluyla PV entegrasyonlu enerji topluluklarının güçlendirilmesine yönelik içgörüler sunmayı amaçlamaktadır. PV entegrasyonunun, topluluk katılımının ve kapsamlı yönetim çerçevelerinin önemini vurgulayarak, bu yayın sürdürülebilir enerji geçişleri ve topluluk tabanlı yenilenebilir enerji girişimleri üzerine devam eden tartışmalara katkıda bulunmaktadır.

YÖNTEM

MASTERPIECE projesi, dijitalleşme yoluyla enerji topluluklarını güçlendirmeye yönelik bütüncül bir yaklaşımı benimser ve özellikle PV (fotovoltaik) entegrasyonuna vurgu yapar. MASTERPIECE, "Multidisciplinary Approaches and Software Technologies for Engagement Recruitment and Participation in Innovative Energy Communities in Europe" (Avrupa'da Yenilikçi Enerji Topluluklarına Katılım, İstihdam ve Katılım için Multidisipliner Yaklaşımlar ve Yazılım Teknolojileri) kısaltmasıdır ve enerji sektörünü sosyal bilimler, beşeri bilimler ve pazarlama teknolojisi gibi çeşitli disiplinleri entegre ederek dönüştürmeyi amaçlamaktadır [7]. Proje, enerji topluluklarının kurulmasını ve işleyişini kolaylaştıran fikirler, çerçeveler ve stratejiler sunar ve PV sistemlerinin entegrasyonuna vurgu yapmaktadır. Proje pilotlarında gerçekleştirilen pratik denemeler ve gösterimler, topluluk merkezli yenilenebilir enerji girişimlerinin ilerletilmesine yönelik değerli içgörüler sunar ve çözümlerinin uygulanabilirliğini, ölçeklenebilirliğini ve uyarlanabilirliğini gösterir.

MASTERPIECE, enerji topluluklarının güçlendirilmesini teşvik etmek için çeşitli temel unsurları entegre eder. Gerçek dünya örneklerinden ilham alarak ("Şampiyonlar") talep yanıt stratejilerini benimsemeye yönelik bir Coaching/Örneklerle Öğrenme metodolojisi uygular. Ayrıca proje, etkileşimli BİT araçları ve platformları aracılığıyla kolaylaştırılan sosyal yenilikler ve katılımcı süreçlere vurgu yapar.

Projenin merkezi bir özelliği, tüm enerji topluluğu paydaşlarını destekleyen dijital bir BİT platform ekosisteminin geliştirilmesidir. Bu platform, organizasyonel, yasal ve operasyonel faaliyetleri kolaylaştırır. Belirli hedeflere, davranışlara ve düzenleyici ortamlarına uygun karar verme araçları, paydaşların enerji sistemi operasyonlarını optimize etmelerine yardımcı olur. MASTERPIECE ayrıca, topluluk üyelerinin aktif katılımını teşvik eden teşvikler, eğitim ve farkındalık girişimleri aracılığıyla pasif tüketicilerden proaktif tüketicilere(prosumer) dönüşümü teşvik eder.

Proje, enerji topluluklarını desteklemek için SIT enerji sistemi optimizasyonu aracı, ECOOP yapay zeka destekli enerji topluluğu oluşturma aracı, RECOMME kişiselleştirilmiş öneriler aracı, MEET App topluluk katılım uygulaması ve DR-FLEX esnek piyasa katılım yönetimi aracı gibi çeşitli ileri dijital araçları içermektedir.

SIT aracı, öncelikle kendi kendine tüketim yapılandırılmalarına yönelik karmaşık simülasyon ve optimizasyon için gelişmiş bir araçtır. Enerji sistemi bileşenlerini, eylemlerini ve uygulamalarını içeren özelleştirilmiş sürdürülebilir planlar oluşturur. ECOOP, yöneticileri, üreticileri ve tüketicileri çeşitli dijital araçlar aracılığıyla bir araya getirerek enerji topluluklarını oluşturmak ve ölçeklendirmek için yeni yapay zeka hizmetleri sunan açık bir ekosistemdir. ECOOP, yüksek güvenilirlikli, güvenilir ve kişisel verilerin korunumuna uyumlu çözümler sağlar. Bu web platformu, enerji kooperatiflerinin kurulması ve paylaşılan varlıkların geliştirilmesi için bir temel teşkil eder ve benzersiz enerji toplulukları oluşturmak için iş birliğini teşvik eder. Mevcut durumda çevrimiçi ve aktiftir ve potansiyel iyileştirmeler devam etmektedir.

RECOMME, enerji toplulukları için özel olarak tasarlanmış bir araçtır ve potansiyel topluluk katılımcılarının, mevcut üyelerin ve enerji topluluğu yöneticilerinin ihtiyaçlarına göre kişiselleştirilmiş öneriler ve rehberlik teknikleri sunar. MEET App, enerji topluluklarını anlamak, araştırmak ve keşfetmek için oluşturulmuş bilgilendirici bir mobil uygulamadır. Kullanıcılar bu uygulama aracılığıyla enerji toplulukları hakkında bilgi edinebilir, diğerleriyle tartışmalar başlatabilir. DR-FLEX, esnek piyasada yer almak isteyen enerji topluluklarının yönetimini kolaylaştıran bir uygulamadır.

Proje, farklı düzenleyici ortamlar ve yerel zorluklar nedeniyle dört ülkede pilot girişimler tasarlamıştır. Türkiye'deki dikkat çekici bir pilot proje, Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından kurulan çatı güneş enerjisi santralleri ile bir orman köyünü hedeflemektedir. Bu pilot, kooperatif modeli aracılığıyla vatandaşları enerji geçişine aktif katılımcılar olmaya teşvik eden topluluk tabanlı bir güç santrali oluşturur. Bu pilot, yeni araç ve yaklaşımları test ederek, çeşitli bağlamlarda topluluk liderliğindeki yenilenebilir enerji girişimlerinin uygulanabilirliğini, ölçeklenebilirliğini ve uyarlanabilirliğini gösterir.

İtalya, Fransa ve İsveç'teki pilot projeler de yerel ortaklıklar, teknolojik yenilikler ve düzenleyici çerçeveleri kullanarak sürdürülebilir enerji geçişlerini yönlendirmek için çeşitli yaklaşımlar sergilemektedir [8,9]. Bu pilotlar, topluluk tabanlı yenilenebilir enerji girişimlerinin uygulanabilirliğini, ölçeklenebilirliğini ve uyarlanabilirliğini gösteren yaşayan laboratuvarlar olarak hizmet eder ve Avrupa genelinde ve ötesinde daha geniş kabul görme potansiyeline sahiptir.

MASTERPIECE, yakıt yoksulluğunu ele alarak enerji topluluklarında kapsayıcılığı teşvik etmektedir. Engelleri otomasyon, katılım teşvikleri ve federatif hizmetler sunarak azaltmak istemektedir. Enerji verimliliğini artırmayı ve iş birliğini teşvik etmeyi hedeflemektedir. Yapay zeka (YZ) kullanarak veri analizini ve optimizasyonunu sağlayacaktır. Farklı iletişim teknolojilerini entegre ederek kesintisiz veri alışverişi ve paydaş şeffaflığı sağlanması planlanmaktadır [10]. MASTERPIECE, maliyetleri en aza indirmek ve yeni enerji piyasası rollerini keşfetmek için YZ kullanmaktadır. Değerlendirme, topluluk katılımını ve hizmet kullanımını artırmak gibi sonuçları ölçmek için nicel metrikler ve nitel değerlendirmeler geliştirilen araçlar ile yapılabilecektir. Pilot gösterimlerden alınan geri bildirimler, sürekli iyileştirmeler ve paydaş iş birliği için bilgi sağlamaktadır. Ayrıca, çeşitli teknolojilerin ve paydaşların entegrasyonu ve veri gizliliği ve güvenliğinin sağlanması gibi zorluklarla karşılaşmıştır. Bu zorlukları hafifletmek için iş birliğini teşvik eden stratejiler, güven inşa etme ve veri gizliliği endişelerini ele alma stratejileri geliştirilmiştir.

Gelecekteki girişimler, MASTERPIECE'den öğrenilen dersler ve en iyi uygulamalardan yararlanarak enerji geçişi çabalarının etkinliğini ve sürdürülebilirliğini artırabilir. Gelişen teknolojileri ve yenilikçi çözümleri kullanarak, gelecekteki projeler temiz ve dirençli enerji sistemlerine geçişi daha da hızlandırabilir.

BULGULAR ve YORUMLAR

Süregelen MASTERPIECE projesinin bulguları, enerji toplulukları içinde enerji üretim verimliliği ve topluluk katılımı hedeflerini ilerletmede fotovoltaik (PV) sistemlerin kritik rolünü vurgulamaktadır. PV teknolojisinin entegrasyonu, yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir artışa yol açmış, enerji verimliliğini ve topluluk güçlenmesini artırmıştır.

PV kurulumlarının stratejik dağıtımı ve optimizasyonu öncelikli olmuştur. MASTERPIECE, gelişmiş izleme ve optimizasyon teknolojilerinden yararlanarak PV sistemlerinin performansını maksimize etmiş,

böylece enerji verimi ve kaynak kullanımını artırmıştır. Bu durum, yenilenebilir enerji çözümlerinin verimliliğini ve etkinliğini artırmada veri odaklı yaklaşımların önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, topluluklar içinde PV kurulumlarının görünürlüğü, yenilenebilir enerji konusunda farkındalık ve katılımı teşvik etmiştir. Katılımcı yaklaşımlar ve paydaş katılımı girişimleri ile MASTERPIECE, topluluk üyelerini enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik çabalarına aktif olarak katılmaya teşvik ederek yerel mahallelerde bir sürdürülebilirlik kültürü oluşturmaktadır.

Ancak, proje süresince bazı zorluklar ve iyileştirme fırsatları da belirlenmiştir. Bu zorluklar arasında finansman, düzenleyici engeller ve teknik sınırlamalar yer almakta olup, belirli bağlamlarda PV teknolojisinin yaygın benimsenmesini engelleyebilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek, PV sistemlerinin tam potansiyelini açığa çıkarmak ve yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmak için kritik olacaktır.

SONUÇLAR

MASTERPIECE projesi, PV teknolojisinin enerji üretim verimliliği ve topluluk katılımını artırmadaki dönüştürücü potansiyelini zaten göstermiştir. PV kurulumlarının performansını maksimize ederek ve topluluk katılımını teşvik ederek, proje daha sürdürülebilir ve dirençli bir enerji geleceği için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Finansman, düzenleme ve teknik sınırlamalar gibi zorlukların üstesinden gelme çabaları, PV sistemlerinin benimsenmesini daha da ilerletmek ve daha geniş enerji geçişi hedeflerine ulaşmak için önemli olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Carlisle, N., Elling, J. & Penney, T., Renewable Energy Community: Key Elements Technical Report No. NREL/TP-540-42774, 2008.
- [2] Council of European Energy Regulators. Regulatory Aspects of Self-consumption and Energy Communities Technical Report ,2019.
- [3] Kabalci, Y, A survey on smart metering and smart grid communication, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 57, 302-318, 2016.
- [4] Morstyn, T., Farrell, N., Darby, S. J., & McCulloch, M. D., Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. Nature energy, 3(2), 94-101, 2018.
- [5] Darby, S. J. & McKenna, E. Social implications of residential demand response in cool temperate climates. Energy Policy 49, 759–769 (2012).
- [6] Hahnel, U. J., Herberz, M., Pena-Bello, A., Parra, D. & Brosch, T. Becoming prosumer: revealing trading preferences and decision-making strategies in peer-to-peer energy communities. Energy Policy 137, 111098, 2020.
- [7] <https://masterpiece-horizon.eu/>,2024
- [8] Parreño-Rodríguez, A., Ramallo-González, A. P., Chinchilla-Sánchez, M., & Molina-García, A., Community energy solutions for addressing energy poverty: A local case study in Spain. Energy and Buildings, 296, 113418, 2023.
- [9] Piserà, D., Ferrucci, T., Fioriti, D., Poli, D., & Silvestro, F., Freeware Digital Platform for Designing Renewable Energy Communities in Italy: An Overview. In 2023 AEIT International Annual Conference (AEIT) (pp. 1-6). IEEE, 2023.
- [10] Sánchez-Valverde, J., Ramallo-González, A. P., Martínez-Sánchez, R., Molina-García, Á., & Skarmeta, A. F., An open ICT solution to integrate multi-modular battery systems on buildings. Results in Engineering, 18, 101217, 2023.

146 - DC Yüksek Hızlı Şarj İstasyonlarının Gerilim Harmonik Bozulması Bakımından İncelenmesi

Sait Taşkeser, Sezai Taşkın, Macit Tozak

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Ertuğrul Partal

BND Grup Teknoloji A.Ş.

İbrahim Şengör

Munster Technological University, Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Cork, Ireland

ÖZET

Elektrikli araç, kullanımının hızla artması, şarj istasyonlarına olan talebi de beraberinde getirmiştir. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu verilerine göre, Türkiye'deki elektrikli araç şarj istasyonları ve soket sayıları son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu artışla birlikte, şarj istasyonları ve şebeke altyapısı, enerji talep ve tedariği, batarya enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu, enerjide dijitalleşme ve talep tarafı yönetimi gibi konular, çalışılması gereken kritik başlıklar haline gelmiştir. Bu çalışmada, bir organize sanayi bölgesinde yer alan otel otoparkındaki DC yüksek hızlı şarj istasyonunun gerilim harmonik bozulması açısından analizi yapılmıştır. Şarj istasyonunun bağlı olduğu güç, sisteminin modellenmesi ve analizi için DIGSILENT PowerFactory yazılımı kullanılmış ve bir güç, kalitesi analizörü ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Çalışma, DC yüksek hızlı şarj istasyonlarının elektrik şebekeleri üzerindeki olası güç kalitesi etkilerini anlamaya ve bu etkilerin neden olabileceği olumsuz durumlar için proaktif önlemler geliştirmeye yönelik bir katkı sunmaktadır.

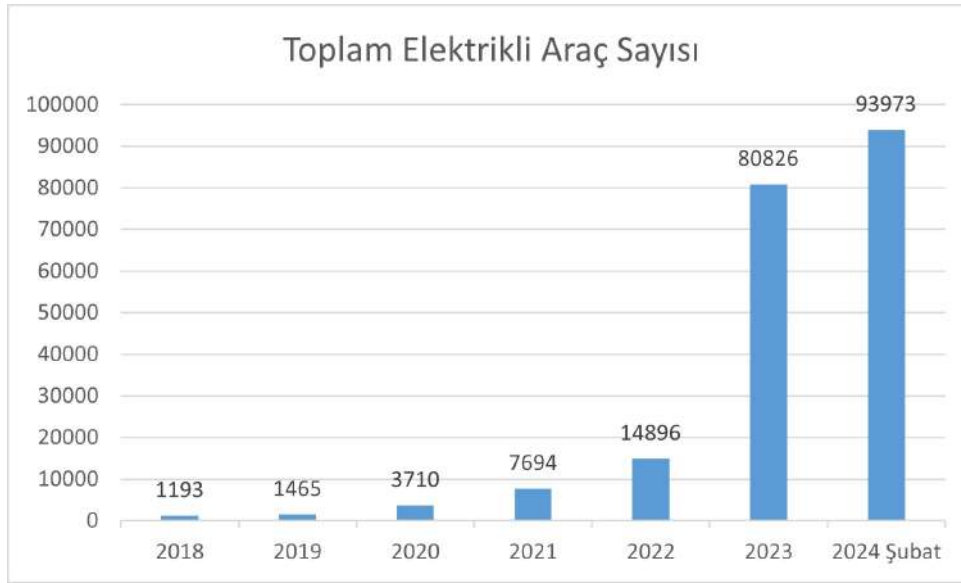
Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, DC Yüksek Hızlı Şarj İstasyonu, Güç Kalitesi, EN 50160

GİRİŞ

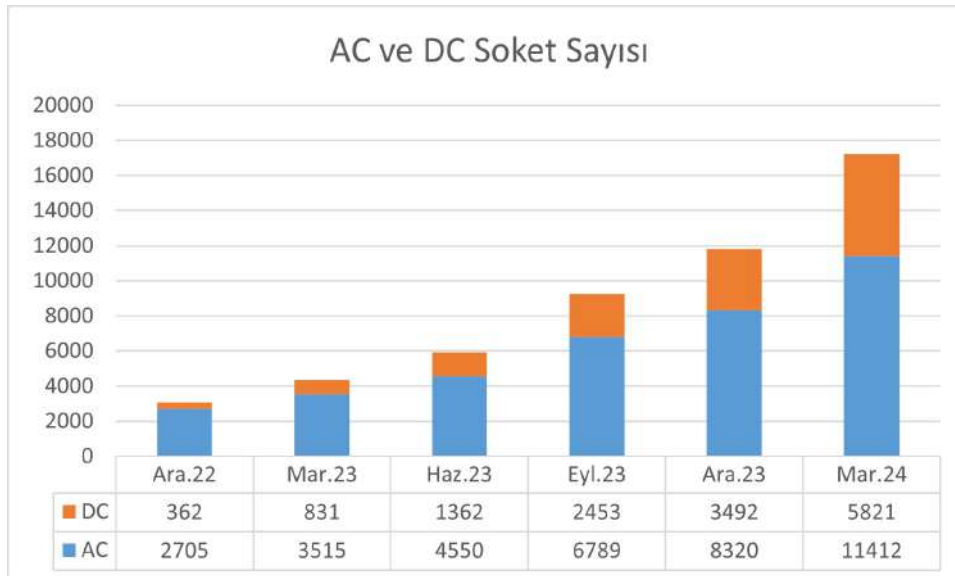
Otomotiv endüstrisi, sürekli olarak yeni elektrikli araçları piyasaya sunmaktadır [1]. Bu nedenle, ulaştırma sektöründe elektrifikasyona geçiş süreci oldukça hızlı ilerlemektedir. EA'ların yaygınlaşması enerji dönüşümünde küresel net sıfır karbon hedefleri doğrultusunda önemli bir rol oynamaktadır [2]. Dünyada 2022 yılı sonu itibarıyla yaklaşık 30 milyon EA bulunmaktayken, bu sayının 2030 yılına kadar yaklaşık 240 ila 250 milyona ulaşması beklenmektedir [3]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2022 yılında 14.552 adet olarak gerçekleşen tam elektrikli araç trafik kaydı sayısı, 2023 yılında 80.043 olarak gerçekleşmiştir. Temmuz 2024 itibarıyla Türkiye'de EA sayısı 130.000 adeti aşmış durumdadır. Yıllara göre ülkemizdeki EA sayısı Şekil 1'de, EAŞ İ sayısı ise Şekil 2'de verilmiştir. EA sayısındaki bu hızlı artış, Türkiye'nin e-mobilite alanındaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'nun lisans verdiği şarj ağı işletmecilerinin yaptığı yatırımlar sayesinde, 2023 yılı başında 3.081 olan toplam şarj noktası sayısı, 1 Nisan 2024 itibarıyla 17.233'e yükselmiştir. Bu şarj noktalarının 11.412'si AC (Yavaş), 5.821'i ise DC (Hızlı) şarj cihazlarıdır [4].

EA'ların sayısındaki artışla eş zamanlı olarak şarj altyapısının da gelişmesi, Türkiye'deki e-mobilite ekosisteminin güçlenmesine büyük katkı sağlamaktadır. Türkiye'de her bir şarj soketine düşen EA sayısı Mayıs 2024 itibari ile 5,4 iken bu oran Avrupa'da 13,75'tir. Bu gelişmeler, Türkiye'nin EA'lar ve şarj altyapısındaki büyüme potansiyelini artırmakta ve sektöre yönelik

Şekil 1: Yıllara göre ülkemizdeki elektrikli araç sayısı



Şekil 2: Yıllara göre ülkemizdeki elektrikli araç şarj istasyon sayısı



gelecekteki yatırımların önünü açmaktadır. Ancak, bu büyümeyi sürdürülebilir kılmak için stratejik bir şarj altyapısı planlaması gereklidir [4].

EA'ların sayısının artışı, mevcut elektrik şebekelerinin zamanla aşırı yüklenmesine neden olacaktır [5]. EA'ların yüksek güçlü şarj talepleri, hızlı şarj (fast charging-FC) istasyonlarının kullanılmasını gerektirmektedir [6]. EAŞ İ, enerji sistemleri ve dağıtım şebekelerinin "önemli bileşenleri haline gelmektedir. Ancak, EAŞ İ'lerinin şebekeye entegrasyon oranı arttıkça güç kalitesi üzerinde olumsuz etkiler getirme potansiyeli de bulunmaktadır [7]. Bu nedenle, bağlantı anlaşması yapılmadan önce harmonik analiz çalışmalarının yapılması önem arz etmektedir [8].

Bir şarj döngüsü tipik olarak iki aşamada gerçekleşir. Bunlar sabit akım (constant current-CC) ve sabit gerilim (constant voltage-CV) aşamalarıdır. CC aşaması, şarj süresinin yaklaşık ilk %80'ini kapsar ve ardından CV aşaması gelir. EA şarj istasyonları, bu aşamalar sırasında farklı harmonik karakteristiği sergiler. CC aşamasında akım dalga formunda düşük harmonik distorsiyon gözlenirken, CV aşamasında akım dalga formunda daha fazla distorsiyon gözlenir [9]. Yavaş şarj cihazlarının kurulumu sırasında, farklı EA'ların çeşitliliği ve batarya şarj durumu (SOC) etkileşim etkileri dikkate alınmalıdır [10]. Bu çeşitlilik, EAŞ İ'lerinin yönetimini karmaşıktırabilir ve belirsizliklere yol açabilir. Diğer yandan, hızlı şarj cihazlarının tutarlı şarj profili, yönetim ve kontrolünü daha kolay hale getirir. Ancak, hızlı şarj cihazları da farklı EA türleri ve batarya özellikleri nedeniyle harmonik çalışmalarında belirsizliklere neden olabilir. Bu nedenle, şarj altyapısının planlanması ve yönetimi aşamalarında, çeşitlilikten kaynaklanan etkileşim etkilerini dikkate almalıdır.

Bu çalışma, endüstriyel tüketiciler tarafından işletilen AG ve OG şebekelerinde DC hızlı EAŞ İ'lerinin gerilim harmonik distorsiyonları perspektifinden etkisini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Analiz için bir organize sanayi bölgesinde yer alan DC yüksek hızlı EAS, harmonik akım spektrumu verileri dikkate alınmıştır. Harmonik akımlar için maksimum değer seçilerek en kötü senaryo ele alınmıştır. Modelleme ve simülasyonlar için DigSILENT Power-Factory programı kullanılmıştır. Sonuçlar, EN 50160 standardına [11] göre yorumlanmıştır.

YÖNTEM

2.1 Genel Şebeke Modeli

DC hızlı şarj istasyonu içeren organize sanayi bölgesine ait şebekenin tek hat seması Şekil 3'te verilmiştir. Ortak bağlantı noktası (PCC) transformatörün OG tarafında, bağlantı noktası (POC) ise transformatörün AG tarafında bulunmaktadır. Güç kalitesi ölçümleri, analiz için hem PCC hem de POC noktalarında yapılmıştır.

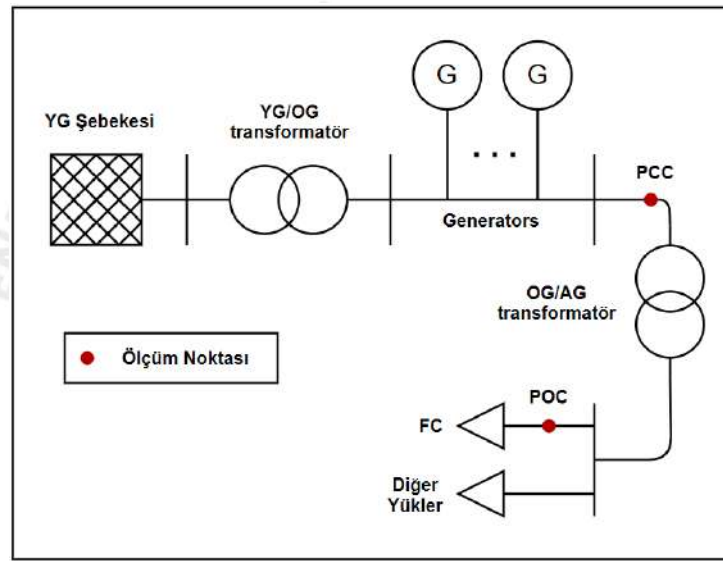
2.2 Analiz Edilen Şebeke Modeli

Analizin yapıldığı Manisa Organize Sanayi Bölgesinde (MOSB) bulunan Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ,) trafo merkezinden alınan 154 kV gerilim seviyesindeki enerji MOSB'un 5 bölgesine dağıtılmaktadır. Bu çalışmada, MOSB'un 1. Kısım elektrik şebekesi modellenmiştir. Modellenen güç, sisteminin tek hat şeması Şekil 4'de verilmiştir.

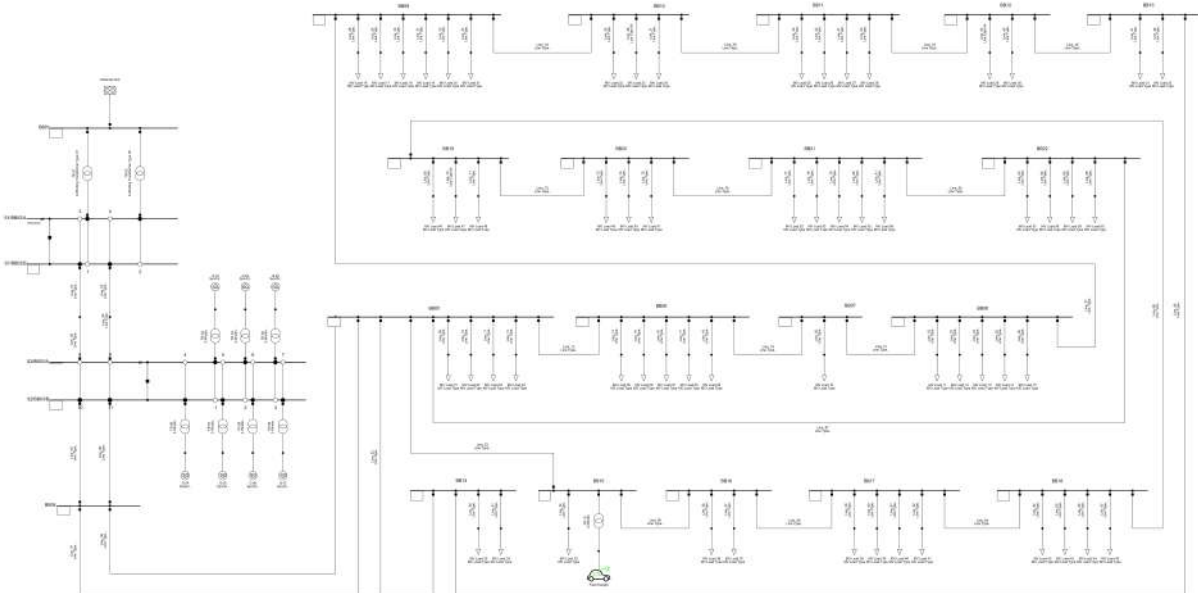
2.3 Şebeke Parametreleri ve Harmonik Ölçümleri

Elektrik şebekesi simülasyonunda parametrelerin doğru belirlenmesi, sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Doğru bir model oluşturmak için şebeke topolojisi, bileşenlerin teknik özellikleri, yük profilleri ve kullanılan kontrol stratejileri gibi faktörler

Şekil 3: DC yüksek hızlı şarj istasyonu içeren şebekenin tek hat şeması



Şekil 4: MOSB 1. kısım elektrik şebekesi tek hat şeması



Tablo 1: Şebeke parametreleri

| Eleman | Parametre | Birim | Değer |
|---------------------|-----------------|------------------------------|---------------------|
| YG/OG transformatör | S | MVA u% | 100 12.2 |
| OG/AG transformatör | S | MVA u% | 1 5.62 |
| AG/OG transformatör | S | MVA u. % | 23 8 |
| Generator | S | MVA | 22.6 |
| Yeraltı Kablo | l R x | km Ω/km mH / km | 2 0.047 0.493 |
| OG yük | S $\cos\phi$ | MVA | 25.85 0.994 |
| Hızlı şarj gücü | P | kW | 180 |

dikkatlice değerlendirilmelidir. Bu parametrelerin doğru belirlenmesi, şebeke performansının gerçek dünya koşullarına daha yakın simülasyonunu mümkün kılacaktır. Şebekeye ait tüm parametreler Tablo 1’de verilmiştir. Mevcut şebeke yapısında EAŞ İ bulunmadığından, dağıtım şebekesi üzerinde hiçbir etkisi olmadığı kabul edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, AG bara üzerinde bir gün boyunca, OG bara üzerinde ise üç hafta boyunca Fluke 435 marka 3 fazlı güç kalitesi ölçüm analizörü ile harmonik gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 5 ve 6’da gösterilmiştir. Modellemede kullanılan EAŞ İ harmonik akım bozulma karakteristiği Şekil 7’de verilmiştir.

Her bir fazdaki harmonik derecelerinde, gerilimin anlık maksimum değerleri belirlenmiştir. Ölçüm süresi boyunca seçilen bu değerler, küçükten büyüğe doğru sıralanmış ve bu sıralama içerisinde %95’lik yüzdebirlik değeri seçilmiştir. Bu değer, ölçülen harmonik derecesini temsil eden ölçüm olarak kabul edilmiştir. Her bir harmonik derecesi için bu işlem tekrarlanmıştır. Ölçülen harmonik gerilim değerleri, EN 50160 sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

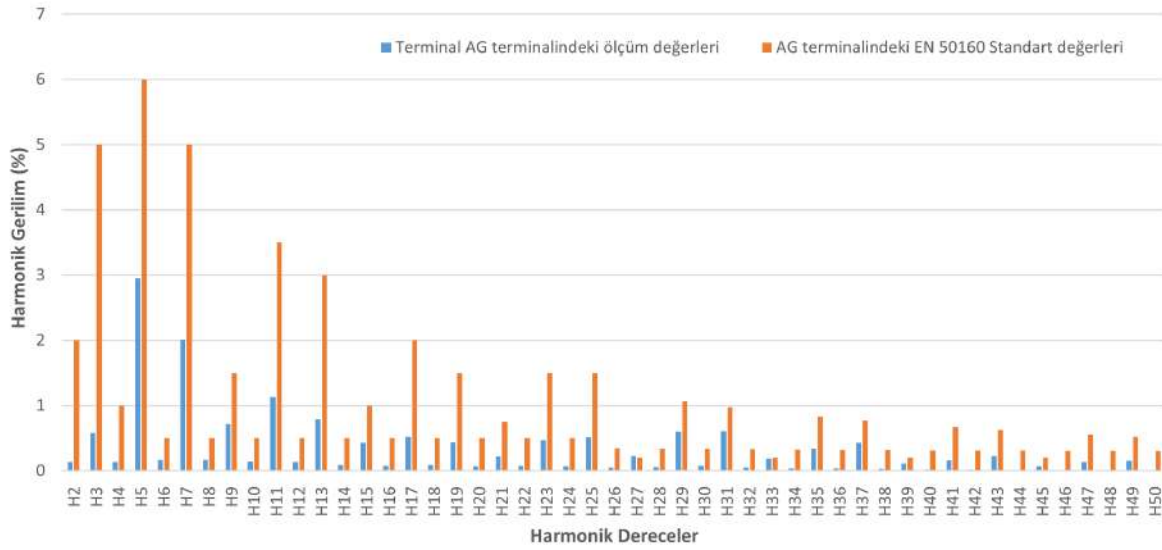
2.3.1 Harmonik Katkılama

Harmonik katkılama, elektrik sistemindeki cihazlar veya yükler tarafından güç şebekesine eklenen harmonik bileşenlerin toplam etkisini ifade eder. Öncelikle, mevcut sistem analizi için güç analizörü kullanılarak mevcut sistemdeki harmonik gerilim seviyeleri ölçülür. EAŞ İ eklenmesiyle oluşabilecek harmonik katkılar, güç sistem analiz programında simüle edilir. Şarj istasyonunun harmonik akım spektrumu, bu hesaplamalarda kullanılır. EAŞ İ için harmonik akım spektrumu üreticiden temin edilmelidir. Vektör metodu ile katkı analizi, şarj istasyonunun potansiyel harmonik etkilerini belirlemek için kullanılır. Şarj istasyonunun oluşturduğu harmonik gerilimler, mevcut sistemle birleştirilerek toplam harmonik gerilim hesaplanır.

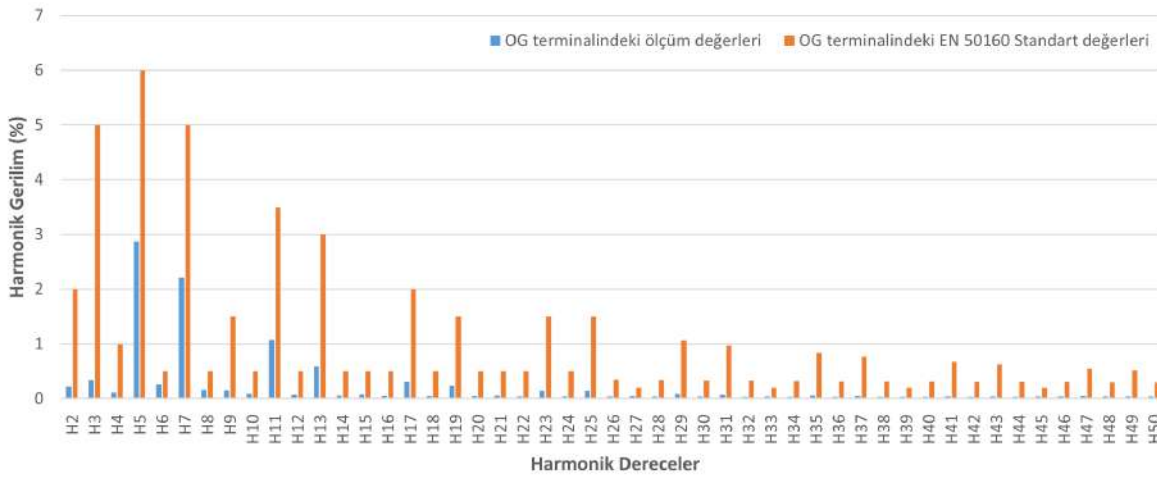
2.4 EN 50160

EN 50160 standardı, elektrik güç kalitesi için bir referans noktasıdır. Bu standart, şebeke içinde çeşitli elektriksel sorunları ele almakta, elektrik kalitesini belirlemek ve korumak için ge-

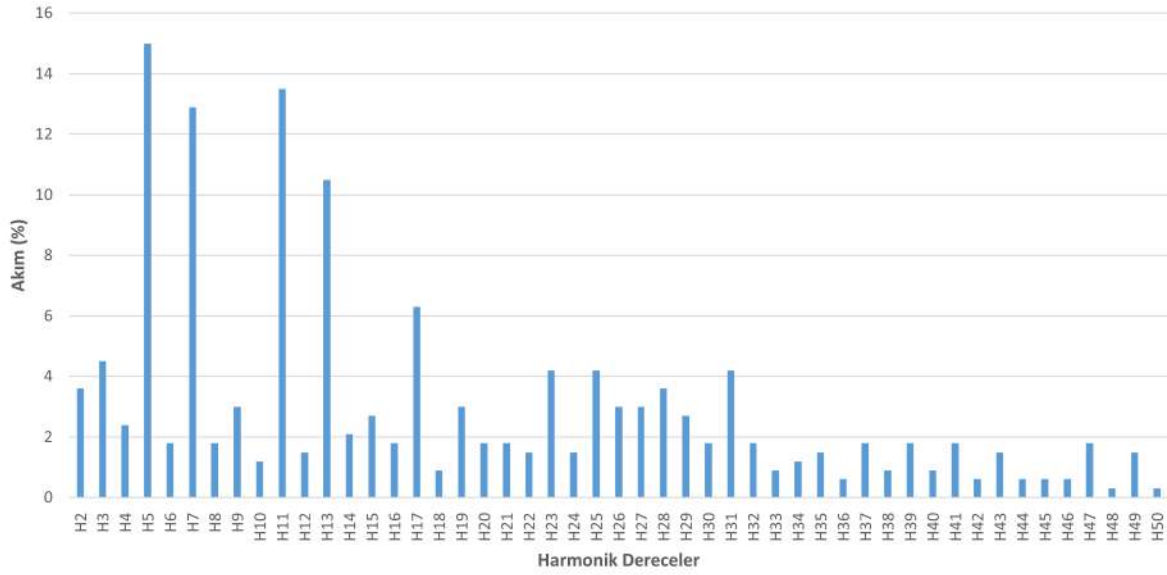
Şekil 5: Bara 15'e bağlı AG seviyede ölçülen harmonik gerilim bozunumu



Şekil 6: Bara 15'deki OG seviyede ölçülen harmonik gerilim bozunumu



Sekil 7: 180 kW gücündeki elektrikli araç şarj istasyonunun harmonik akım spektrumu



rekl limitleri ve tanımları içermektedir. Gerilim dalgalanmaları, harmonikler, gerilim düşmeleri ve yükselmeleri gibi sorunlar, standartta belirtilen kabul edilebilir sınırlar içinde tanımlanmıştır. AG için harmonik gerilim sınır değerleri Tablo 2’de, OG için sınır değerleri ise Tablo 3’te verilmiştir. AG ve OG için toplam harmonik bozulma için ilgili uyum seviyesi (%THD) %8’dir. Bu standardın birincil amacı, dağıtım şirketleri ve özel elektrik işletmecileri arasında elektrik güç kalitesinin sağlanması ve korunmasıdır. Dağıtım şirketleri, standartta belirtilen paramet-relere uymak ve şebekeyi buna göre düzenlemekle yükümlüdür. Özel elektrik işletmecileri de şebekeye bağlı olduklarından aynı standartlara uymak zorundadır.

Tablo 2: AG besleme terminallerindeki harmonik gerilim sınır değerleri [11, 12, 13].

| Tek Harmonikler (3’ün katı olmayan) | | Tek Harmonikler (3’ün katı olan) | | Çift Harmonikler | |
|--|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| Derece (h) | Harmonik Gerilim (%) | Derece (h) | Harmonik Gerilim (%) | Derece (h) | Harmonik Gerilim (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3.5 | 15 | 1 | 6 ... 24 | 0.5 |
| 13 | 3 | 21 | 0.75 | | |
| 17 | 2 | | | | |
| 19 | 1.5 | | | | |
| 23 | 1.5 | | | | |
| 25 | 1.5 | | | | |
| $25 \leq h \leq 49$ | $2.27(17/h) - 0.27$ | $21 \leq h \leq 45$ | 0.2 | $26 \leq h \leq 50$ | $0.25(10/h) \pm 0.25$ |

Tablo 3: OG besleme terminallerindeki harmonik gerilim sınır değerleri [11, 12, 13].

| Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan) | | Tek Harmonikler (3'ün katı olan) | | Çift Harmonikler | |
|--|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| Derece (h) | Harmonik Gerilim (%) | Derece (h) | Harmonik Gerilim (%) | Derece (h) | Harmonik Gerilim (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1.5 | 4 | 1 |
| 11 | 3.5 | 15 | 0.5 | 6...24 | 0.5 |
| 13 | 3 | 21 | 0.5 | | |
| 17 | 2 | | | | |
| 19 | 1.5 | | | | |
| 23 | 1.5 | | | | |
| 25 | 1.5 | | | | |
| $25 \leq h \leq 49$ | $2.27(17/h) - 0.27$ | $21 \leq h \leq 45$ | 0.2 | $26 \leq h \leq 50$ | $0.25(10/h) \pm 0.25$ |

BULGULAR

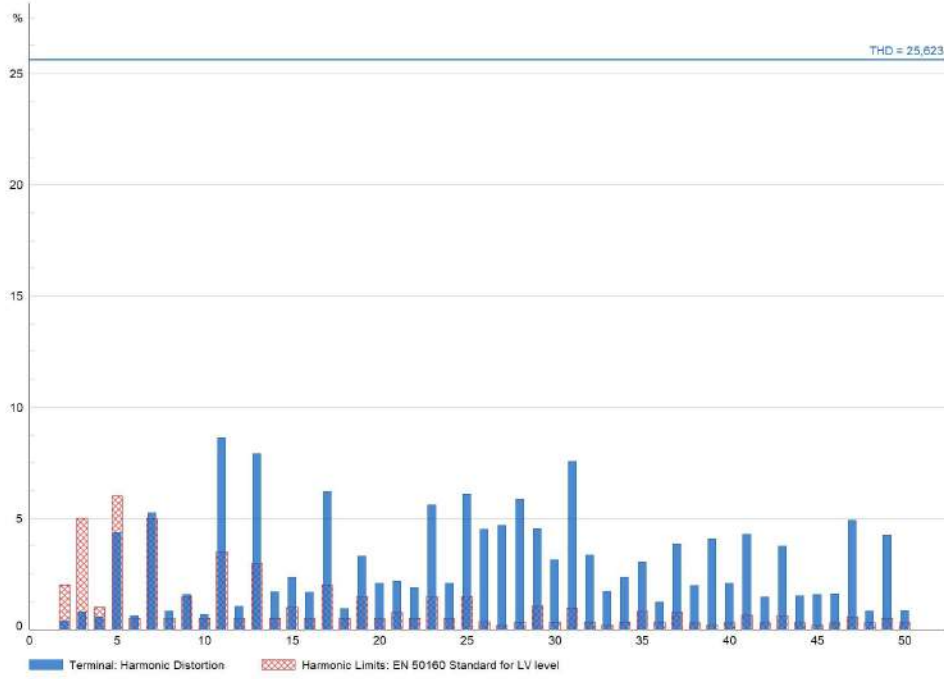
Başlangıç durumunu analiz etmek için, bir şarj istasyonu bara-15'e bağlanmıştır. Şekil 5'teki model, bir EA şarjının harmonik analizinde kullanılmıştır. 100 kWh bataryaya sahip bir EA, 180kW DC gücünde bir hızlı şarj istasyonuna bağlanmıştır. Şarj istasyonu, 1 MVA ve 33kV/0.4kV trafo aracılığıyla bara-15'e bağlanmıştır. Bu senaryo için bara-15'in AG terminalindeki harmonik bozulmaları gösteren simülasyon sonucu Şekil 8'de verilmiştir. Bu senaryo için birçok harmonik sınır değerlerinin aşıldığı görülmüştür. Trafo AG tarafındaki bağlantı noktasında toplam harmonik bozulma (THD) %25.623 olarak hesaplanmıştır. %8 THD sınırı ve birçok harmonik sınırı, özellikle yüksek dereceli harmonik sınırları aşılmıştır. EA olmadan AG terminalinde ölçülen harmonik bozulmalar Şekil 5'te gösterilmiştir. Yani, sadece bir EA bağlantısı AG tarafında ciddi harmonik problemlerine yol açmaktadır. Şekil 9, bara-15'deki OG terminalinde bir EAŞİ kaynaklı harmonik bozulmalarının benzetim sonuçlarını göstermektedir. OG terminalinde harmonik seviyelerin standart sınırları aşıldığı görülmektedir. Şekil 6'da verilen OG terminalindeki ölçüm sonuçları da, elektrikli araç bağlantısı olmadan harmonik seviyelerinin sınırları aşıldığını göstermektedir.

TARTIŞMA

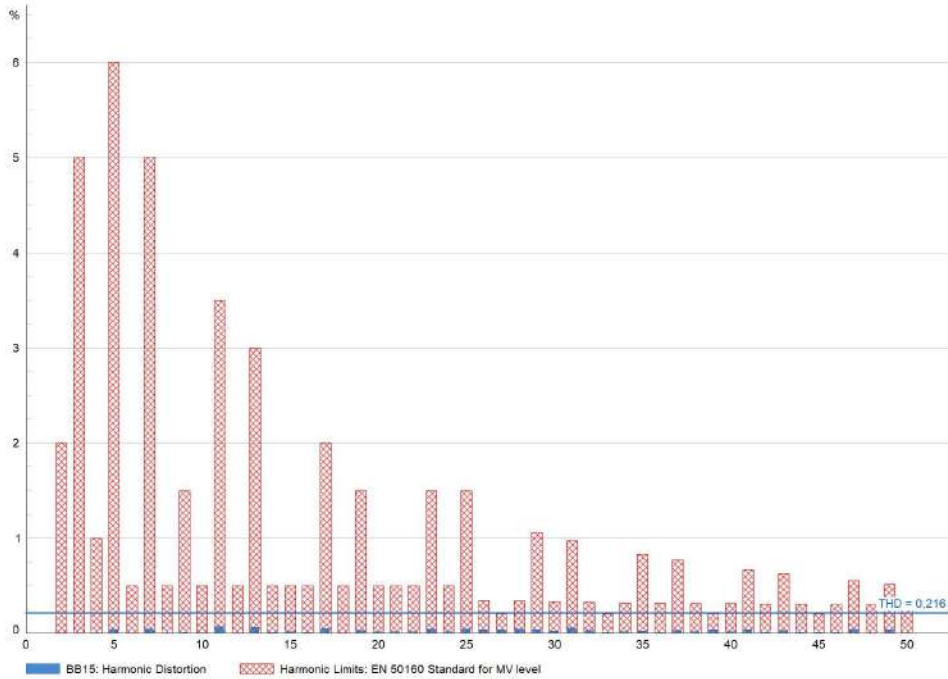
Gerçek verilere dayalı simülasyon ile yapılan analizlerde, EAŞİ eklenmeden önce harmonik gerilim seviyelerinin EN 50160 standartlarına uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, simülasyon sonuçlarına göre, şarj istasyonu sadece kendi başına çalıştığında dahi AG barasında harmonik gerilim seviyelerinin belirlenen sınırları aştığı görülmüştür. Bu bulgular, EAŞİ'nin sayısının ve kapasitesinin artmasıyla birlikte güç kalitesi üzerinde oluşturabileceği olumsuz etkilerin önemi vurgulamıştır. Özellikle, Türkiye'de EA sayısı ve şarj altyapısındaki hızlı büyüme göz önüne alındığında, bu durum büyük bir risk teşkil etmektedir.

Dünya geneli incelendiğinde, İngiltere'de Nisan 2024'te revize edilerek yayımlanan DSO UKPN'nin "Elektrikli Araç Bağlantıları" standardı [14], dağıtım şebekesi sahipleri ve işletmecilerine harmonik analizleri yapma zorunluluğu getirmiştir. Bu dokümanda harmonik seviyelerin ölçümü 5 kHz'e (100. harmonik) kadar çıkmaktadır. Bu kapsamda, şebekeye potan-

Şekil 8: AG terminali simülasyon sonucu harmonik gerilim bozunumu



Şekil 9: OG terminali simülasyon sonucu harmonik gerilim bozunumu



siyel olarak bozucu ekipmanların bağlantısı uygun olarak değerlendirilmelidir. Elektrikli araç şarj cihazlarının büyük bir kısmı bu kategoriye girmekte olup, şarj cihazı bağlantısı için UK Power Networks'e başvuru yaparken bir veri toplama formunun sunulması zorunluluğu bulunmaktadır. Bu tür uluslararası uygulamalar, Türkiye'de de benzer düzenlemelerin getirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, DigSILENT PowerFactory programı kullanılarak OG dağıtım merkezi ve organize sanayi tesisine eklenen yüksek hızlı DC şarj istasyonunun elektrik şebekesindeki harmonik etkileri analiz edilmiştir. Analizler, EA'ların şarj istasyonlarının mevcut sisteme entegrasyonunun THD'yi önemli ölçüde artırdığını ve %25.623 gibi bir değere ulaştığını göstermiştir. Bu değer, %8 olarak belirlenen standart limitleri aşmakta olup, yüksek harmonik değerlerinde de benzer sınır aşmaları gözlemlenmiştir.

DC hızlı şarj istasyonlarının yüksek akım seviyelerinde enerji sağlaması, sistemde dengelessizlikler oluşturmakta ve sistemin arz-talep dengesine uygun yanıt verememesine yol açabilmektedir. Bu durum, trafo yüklerini artırarak, sistemin genel güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Türkiye'de EAŞİ sayısının hızla artmasıyla birlikte, bu altyapıların güç kalitesi üzerindeki etkilerinin dikkatle izlenmesi ve yönetilmesi gerekmektedir. Elektrikli araçların şarj işlemlerinin merkezi bir kontrol sistemiyle koordine edilmesi, sistem üzerinde olumsuz etkilerin minimize edilmesi açısından önemlidir. Gelecekteki yatırımların, enerji verimliliğini artıracak ve güç kalitesi sorunlarını en aza indirecek şekilde planlanması, Türkiye'nin e-mobilite hedeflerine ulaşmasında kilit rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] F. Mohammadi and M. Saif, "A comprehensive overview of electric vehicle batteries market," *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 3, p. 100127, Mar. 2023.
- [2] SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, "Ulaştırma Sektörü Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekelerine Entegrasyonu", Temmuz 2024.
- [3] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2024," IEA, Paris, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [4] Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), "Elektrikli Araç ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu," EPDK, Nisan 2024.
- [5] Richardson, P., Flynn, D., & Keane, A. (2012). Local versus centralized charging strategies for electric vehicles in low voltage distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 1020-1028.
- [6] T. S. Bryden, G. Hilton, A. Cruden, and T. Holton, "Electric vehicle fast charging station usage and power requirements," *Energy*, vol. 152, pp. 322–332, Jun. 2018.
- [7] H. S. Das, M. M. Rahman, S. Li, and C. W. Tan, "Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 120, p. 109618, Mar. 2020.
- [8] R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez, and M. T. Kahn, "A Proposed Harmonic Monitoring System for Large Power Users Considering Harmonic Limits," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4507, vol. 13, no. 17, p. 4507, Sep. 2020.
- [9] A. Lucas, F. Bonavitacola, E. Kotsakis, and G. Fulli, "Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 13–21, Oct. 2015.
- [10] H. Shareef, M. M. Islam, and A. Mohamed, "A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 403–420, Oct. 2016.
- [11] "EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks," European Standards. [Online]. Available: <https://www.en-standard.eu/une-en-50160-2023-voltage-characteristics-of-electricity-supplied-by-public-electricity-networks/>
- [12] "IEC 61000-2-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment –Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.," International Electrotechnical Commission (IEC), 2018. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/63116>.
- [13] "IEC 61000-2-12: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-12: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems.," International Electrotechnical Commission, 2003. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/4130>.
- [14] "Electric Vehicle Connections Engineering Design Standard," EDS 08-5050, ver. 5.0, UK Power Networks, Apr. 23, 2024.

154: Bir Avrupa Ağından Çıkarılan Sonuçlar ile Sürdürülebilir Hidroelektrik Enerjinin Dijitalleşme ve İnovasyon Yoluyla Geliştirilmesi

Doğan Gezer, Erkan Koç

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Ankara, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, küresel temiz enerji dönüşümüne odaklanarak, özellikle hidroelektrik enerji alanındaki yenilik ve dijitalleşme süreçlerini ele almaktadır. Çalışma, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Dijital On Yıl Politika Programı 2030 gibi büyük stratejiler çerçevesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan rolünü vurgulamaktadır. Türkiye’de ve dünyada yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılmasına yönelik projeksiyonlar incelenmekte, özellikle hidroelektrik enerjinin önemine değinilmektedir. Ayrıca, hidroelektrik enerji sektöründeki teknolojik evrim ve dijitalleşme süreçlerini irdeleyen Pen@Hydropower COST aksiyonu kapsamında yapılan ve sorumluluğu TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi’nde olan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar analiz edilmektedir. Çalışma içerisinde dijitalleşme, içme suyu sistemlerindeki fazla basınç kullanımı ve değişken hızla çalışmaya yönelik güncel uygulamalar incelenmektedir. Bu bağlamda, hidroelektrik enerjinin sürdürülebilir, esnek ve dijitalleştirilmiş çözümler sunarak temiz enerji dönüşümünde kritik bir rol oynayacağı sonucuna varılmaktadır.

Anahtar kelimeler: hidroelektrik, dijitalleşme, inovasyon

GİRİŞ

Temiz enerjiye geçiş, tüm dünyada öncelik kazanmış bir konudur. Yenilenebilir ve sıfır karbon emisyonlu enerjiye geçişin önceliklendirilmesi için, bu konu dünyada ve Türkiye’de birçok kanun, yönerge ve strateji belgesine girmiştir. Örneğin, Avrupa Birliği'nin (AB) temiz enerjiye geçişe yönelik hedefleri, 'Fit for 55' yasa paketinde yer almaktadır ve sera gazı emisyonlarının 2030 yılına kadar 1990 seviyelerine göre en az %55 oranında azaltılmasını gerektirmektedir. Benzer şekilde AB 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) tüm enerji kaynakları içindeki oranının %40'ın üzerine

çıkarılmasında mutabakata varmıştır [1]. Türkiye’de ise 2024-2028 yıllarını kapsayan 12. Kalkınma Planı’ndaki projeksiyonlara göre şebekenin toplam kurulu gücünün 2028 yılında 136.000 MW’a çıkması, bu gücün 48.000 MW’ının da güneş (GES) ve rüzgar enerji santrallerinden (RES) oluşması beklenmektedir. Yine bu planda 2028 yılında YEK’lerin elektrik üretimindeki payının yıllık %50’ye ulaşacağı öngörülmektedir [2].

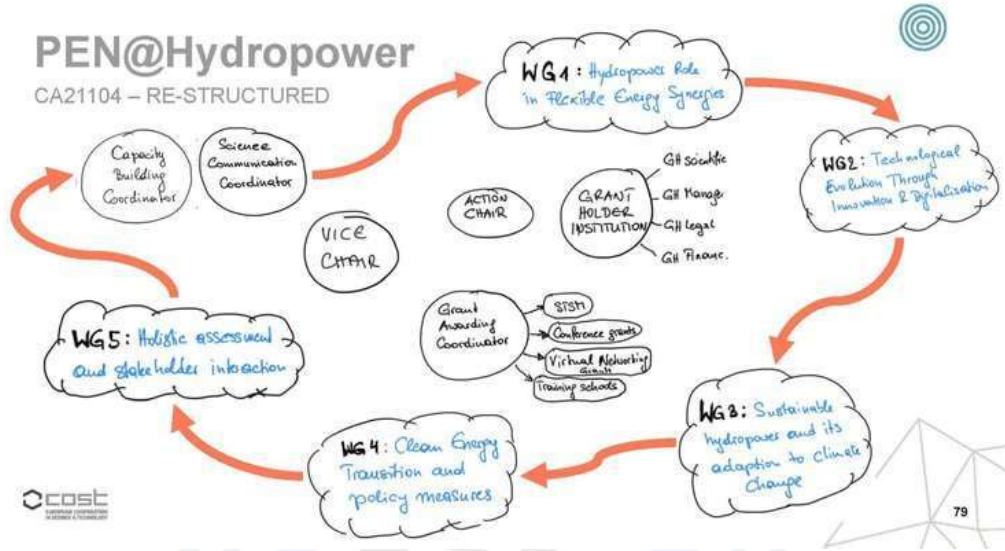
GES ve RES’lerin elektrik şebekesindeki varlığının artması, temel olarak güç sistemlerinin işletme dinamiklerini değiştirmektedir. Daha karmaşık, daha az kesintili ve daha çok verimli işletme yapabilmek, artan kullanıcı sayısına ve gelişen elektrik arz dinamiklerine uyum sağlamak güç sisteminde esneklik gerektirmektedir. Kesintili YEK’lerin (örneğin GES ve RES) şebekedeki varlığının artması ve değişen elektrik tüketim alışkanlıkları nedeniyle bu esnekliğin sisteme kazandırılmasının elzem olduğu öngörülmektedir. Bu esneklik, şebekelerin modernizasyonu ve dijitalleşmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu dönüşümü kolaylaştırmak için ortaya atılan Avrupa Yeşil Mutabakatı [3] ve Dijital On Yıl Politika Programı 2030 [4] enerji sektörünün dijitalleşmesi için politika belirleme çalışmalarının odak noktası olmuştur.

Yenilenebilir enerji teknolojileri ile dijitalleşme, yeşil geçişin temel taşı teşkil etmektedir ve enerji verimliliğinin artırılmasından yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasına kadar birçok alanda enerji sektörünü dönüştürmektedir. Bu dönüşümde, hidroelektrik, biyoenerji ve jeotermal gibi tevzi edilebilir ve düşük emisyonlu teknolojilerin önemi daha da artmaktadır. Dünyada bu tevzi edilebilir YEK kapasite ilavelerinin 2030 yılına kadar mevcut durumun üç katına çıkarak yıllık 125 GW’ı aşması beklenmektedir [5]. Ülkemizde ise hidroelektrik toplam kurulu gücün yaklaşık %30’unu karşılayarak en yüksek kurulu güce sahip enerji kaynağıdır[6]. Ayrıca, önemli bir depolama çözümü olması ve yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmaları dengeleme ve dolayısıyla elektrik şebekesini istikrara kavuşturma konusundaki güvenilirliği nedeniyle hidroelektrik enerjinin, dünyamızın 2050 yılına kadar karbondan arındırılma hedefine ulaşmanın ayrılmaz bir parçası olduğu görülmektedir.

Yeşil, sürdürülebilir, esnek, dengeleyici ve depolanabilir olma avantajları sebebiyle önemi sürekli artan hidroelektrik alanında yeniliklerin paylaşılacağı bir ağ oluşturulması için Pen@Hydropower adında bir COST aksiyonu oluşturulmuştur. Pen@Hydropower COST aksiyonunun temel amacı [7], temiz enerji dönüşümüne ve iklim değişikliğinin azaltılmasına katkıda bulunmak sürdürülebilir, dijitalleştirilmiş ve esnek hidroelektrik çözümlerine odaklanan Avrupa sathında bir ağ kurmaktır. Pen@Hydropower, mühendislik, sosyal bilimler, ekonomi, hukuk ve çevre bilimleri gibi çeşitli alanlardan araştırmacılar, bilim insanları ve paydaşlardan oluşan disiplinlerarası bir konsorsiyum oluşturmayı amaçlayarak gönüllü katılım yoluyla faaliyet göstermektedir. Bu paydaşlar, yukarıda belirtilen hedeflere ulaşmak

için çeşitli faaliyetlerde işbirliği yapmaktadır. Yine bu aksiyonun önemli bir yönü, nesiller arası bilgi aktarımını kolaylaştırmak ve geleceğin hidroelektrik uzmanlarını hazırlamak için genç araştırmacıların kapasitelerini çalışmalara dahil etmek ve geliştirmektir [8].

Şekil 1 Pen@Hydropower Çalışma Grubu Yapısı [7]



Şekil 1’de görüldüğü üzere Pen@Hydropower adlı COST aksiyonunda 5 adet çalışma grubu yer almaktadır. Bu çalışma gruplarından "Yenilik ve dijitalleşme yoluyla teknolojik evrim" adlı çalışma grubu, özellikle hidroelektrik sektöründeki teknolojik gelişmelere ve dijitalleşmeye odaklanmaktadır. Bu grup, dijitalleşme ve yenilikçi teknolojiler konusundaki farkındalığı artırmayı, operatörler, üreticiler ve akademik kurumlar arasında bilgi alışverişini kolaylaştırmayı ve yeni nesil hidroelektrik santralleri öngörmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma grubunun sorumluluğu TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi’ndedir. 36 ülkeden 160 üyeden oluşan çalışma grubu, elektrik, mekanik, çevre, bilgisayar bilimleri ve inşaat mühendisliği gibi çeşitli disiplinleri kapsamaktadır. İki ayda bir düzenlenen toplantılarda, hidroelektrik teknolojisindeki çığır açan gelişmeler ve son gelişmeler etrafında sunumlar ve tartışmalar yapılmaktadır. İncelenen konular arasında yenilikçi türbin tasarımı, dijitalleşmenin hidroelektrik operasyonları üzerindeki etkileri, anormallik tespiti için makine öğrenimi, dönen makinelerin durumunun izlenmesi, hidroelektrik faaliyetlerinin kısa vadeli programlanması, hidroelektrik gücünün su-enerji yönetim sistemlerine entegrasyonu ve değişken yöntemlerin uygulanması yer almaktadır.

Bu yayında Pen@Hydropower adlı COST aksiyonunun ilgili çalışma grubunda incelenen konular anlatılacak ve yapılan toplantı ve değerlendirmeler çıkarılan sonuçlar ışığında irdelenecektir. Bölüm 2’de Dijitalleşme kapsamında son dönemde ortaya çıkan gelişmeler yer almaktadır. Bölüm 3’te içme

suju sistemlerindeki fazla basıncın kullanılması için güncel uygulamalar anlatılacaktır. Bölüm 4’te değişken hızla çalışma konusu sunulacaktır. Yayın Bölüm 5 ile sonlanmaktadır.

DİJİTALLEŞME

Dijitalleşme hidroelektrik alanına birçok açıdan katkı sağlamaktadır. Özellikle hidroelektrik santrallerin vazgeçilmez ekipmanı olan su türbininin tasarımında dijitalleşmenin ciddi getirileri olmuştur. Bu getiriler optimizasyon ve verimlilik artışında kendisini göstermektedir. Dijitalleşme, gelişmiş simülasyon araçları ve yapay zeka algoritmaları kullanılarak türbin tasarımının optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu, türbinlerin daha verimli çalışmasına, enerji üretiminin artırılmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca dijital ikiz teknolojileri kullanılarak, türbin tasarımları sanal ortamda test ve analiz edilebilmektedir. Bu, fiziksel prototipler üretilmeden önce tasarım hatalarının tespit edilmesini ve düzeltilmesini mümkün kılmakta, geliştirme süreçlerini kısaltmaktadır. Ayrıca, dijital sistemler, türbinlerin farklı su akış hızlarına ve yük taleplerine göre dinamik olarak ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu esneklik, enerji üretiminde dalgalanmalarla başa çıkmayı ve enerji şebekesine daha kararlı bir güç sağlamayı kolaylaştırmaktadır.

Şekil 2 Türbin tasarımında gelişmiş esneklik sağlayan CFD optimizasyonu

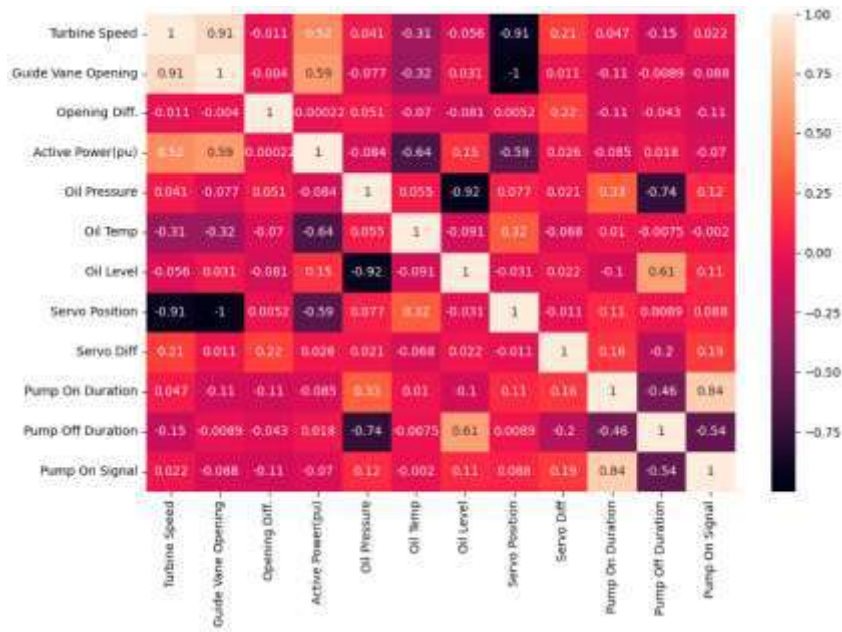


Su türbini tasarımına ek olarak dijitalleştirilmiş türbinlerin sürekli veri toplama ve analiz yollarıyla çalışma koşulları izlenebilmektedir. Bu, türbinlerdeki aşınma veya arızaları önceden tespit etmeyi ve proaktif bakım yapmayı sağlamakta, dolayısıyla arıza sürelerini ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır. Yine bu veri, tasarım iyileştirmeleri, performans değerlendirmeleri ve uzun vadeli planlamalar için kullanılabilir, böylece daha bilinçli ve etkili kararlar alınmaktadır.

Dijitalleşmenin analiz kısmı için makine öğrenimi teknikleri, çeşitli alt sistemlerde anormallik tespiti dahil olmak üzere, hidroelektrik santrali operasyonlarının çeşitli yönlerinde giderek daha fazla uygulanmaktadır. Anormallik tespiti, ekipman arızasını, optimum olmayan performansı veya dikkat gerektiren diğer sorunları gösterebilecek verilerdeki sapmaları veya anormallikleri belirlemeyi ifade etmektedir. Uyarlanabilir Eşikleme ve Alarm Ayar Noktası Ayarlaması gibi metodolojiler hidroelektrik santral sistemlerinde anormallik tespiti için makine öğreniminin uygulanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler, gerçek zamanlı verilere dayalı olarak eşikleri ve alarm tetik noktalarını

dinamik olarak ayarlamayı içermekte ve beklenen operasyonel normlardan sapmaların tespit edilmesini sağlamaktadır. Ek olarak, ısı haritalarını kullanarak yeni koşullardan yıpranmış koşullara kadar uzanan ekipman durumlarının modellenmesi yoluyla, makine öğrenimi algoritmaları ekipman arızasını veya bozulmasını gösteren anormallikleri doğru bir şekilde tespit edebilmektedir. Bu yetenek, olası sorunların erken tespitini kolaylaştırır ve böylece zamanında müdahaleye ve planlı bakım stratejilerinin uygulanmasına olanak tanımaktadır. Genel olarak, hidroelektrik sistemlerinde anomali tespitinde makine öğreniminin kullanımı, ekipman anomalilerinin zamanında belirlenmesini ve bu sorunların azaltılmasını sağlayarak operasyonel verimliliği artırmakta ve proaktif bakım planlamasını desteklemektedir [9].

Şekil 3 Yüksek basınçlı yağ sisteminde anormallik tespiti için eğitim veri setindeki parametreler arasındaki korelasyonu gösteren ısı haritası [10]



Hidroelektrik santrallerdeki dönen makinelerin durum izlemesi, ekipmanın sağlığını ve performansını değerlendirmek için çeşitli parametrelerin sistematik olarak izlenmesini içermektedir. Bu, genellikle sensör dağıtımı, veri toplama, simülasyonlar, sinyal işleme, arıza tespit algoritmaları, tanı analizi ve bakım planlaması yoluyla elde edilmektedir.

İÇME SUYU SİSTEMLERİNDE ENERJİ ÜRETİMİ

Çalışma grubu bünyesinde yapılan toplantılarda sıklıkla gündeme gelen diğer bir konu ise içme suyu sistemlerindeki fazla basıncı elektrik enerjisine çevirmek için yapılan hidroelektrik uygulamalarıdır. Yeni büyük rezervuarlı hidroelektrik santraller için yer kısıtları arttıkça, hidroelektrik sektöründe kullanılmayan potansiyelin kullanılması amacıyla düşük düşümlü türbin tasarımları ile birlikte içme suyu şebekesindeki fazla basıncı kullanma fikri gelişmiştir.

Hidroelektrik uygulamaları, su kaynakları yönetimi ve enerji üretimi arasındaki birbirine bağlı ilişkiyi ifade eden su-enerji bağlantısında önemli bir rol oynamaktadır. Bu uygulamalar, türbinler ve jeneratörleri kullanarak hidrolik enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi yoluyla elektrik üretmesi amacıyla nehirler, rezervuarlar ve barajlar gibi su kaynaklarından yararlanmaktadır. Enerji üretimine ek olarak, hidroelektrik uygulamaları su akışını düzenleyerek ve su depolama kapasitesini artırarak su kaynakları yönetiminin ayrılmaz bir parçası olmuştur. Oluşturulan rezervuarlar, taşkın kontrolü, sulama, su temini ve eğlence faaliyetleri dahil olmak üzere birden fazla amaca hizmet etmektedir. Ayrıca içme suyu sistemlerinde bir türbin vasıtasıyla enerji geri kazanımı sağlayan bu hidroelektrik uygulamaları, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak ve sera gazı emisyonlarını hafifleterek su-enerji yönetimini sürdürülebilir kılmaktadır.

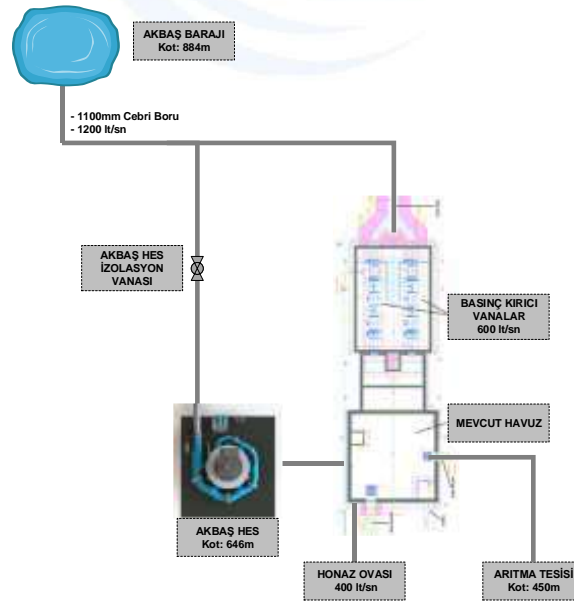
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi tarafından yürütülen iki farklı proje, içme suyu sistemlerinde elektrik enerjisi üretme prototipi geliştirme çalışmaları için güzel örnekler teşkil etmektedir.

Tablo 1 Akbaş HES Teknik Özellikleri

| | |
|-----------------|---------|
| Kurulu Güç (kW) | 2300 |
| Ünite Sayısı | 1 ünite |
| Türbin Tipi | Pelton |
| Düşü (m) | 235 |
| Debi (lt/s) | 1200 |

İlk proje Türkiye Enerji, Maden, Nükleer Araştırma Kurumu (TENMAK) desteğinde Denizli Su İdaresi (DESKİ) için geliştirilmekte olan Akbaş HES'tir. Tablo 1'de teknik özellikleri verilen projenin 2024 yılının son çeyreğinde tamamlanması hedeflenmektedir.

Şekil 4 AKBAŞ HES Hidrolik Şema



Denizli iline içme suyu ve Honaz Ovasına sulama suyu sağlanması amacıyla kullanılan Akbaş Baraj Gölü'nden alınan suyun basıncı, Şekil 4'te hidrolik şeması verilen basınç kırıcı vana marifeti ile sürtünme yoluyla düşürülmektedir. Bu basınç kırıcı vanaya paralel tesis edilen Akbaş HES ile hem basınç düşürme işlevi yerine getirilecek hem de şehirlerimizin yeşil geleceği için dağıtım sistemi gerilim seviyesinde elektrik enerjisi üretilecektir.

İkinci proje ise İzmir Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (İZSU) için kurulumu yapılmakta olan Karabağlar P11 HES projesidir. Tablo 2'de teknik özellikleri verilen projenin de 2024'ün son çeyreğinde tamamlanması hedeflenmektedir.

Tablo 2 P11 Karabağlar HES Teknik Özellikleri

| | |
|-----------------|----------------|
| Kurulu Güç (kW) | 535 |
| Ünite Sayısı | 1 |
| Türbin Tipi | PRV'li Francis |
| Düşü (m) | 70 |
| Debi (lt/s) | 800 |

Bu proje kapsamında geliştirilen ve İzmir şehir merkezinde kurulacak HES'in içme suyu şebekesinde hidrolik kaynaklı elektrik enerjisi üreterek yeşil enerji geçişine ve içme suyu şebekesine kurulu konteyner tipi HES fikrinin yaygınlaştırılmasına katkı sağlayarak elektrik üretimi için örnek oluşturması hedeflenmektedir. Şekil 5'te görülen standart boyutlu konteyner içine yerleştirilmiş mini HES ünitesi, inovatif tasarıma ve dijitalleşme konseptine uygun şekilde yüksek çözünürlükte bilgi sağlayacak sensör ve veri kapasitesine sahiptir. Bu sayede içme suyu şebekesinde dijitalleşmeyi artırarak yapay zekanın alt kümesi makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılacak anormallik algılama uygulamaları ile insansız olarak işletilecektir. Yine bu projenin en büyük meydan okumalarından biri olan şehir içinde HES kurulumu için gürültü ölçümü ve gürültü bastırıcı önlemler konusunda ciddi çalışmalar yapılmaktadır.

Şekil 5 Konteyner HES Genel Yapısı



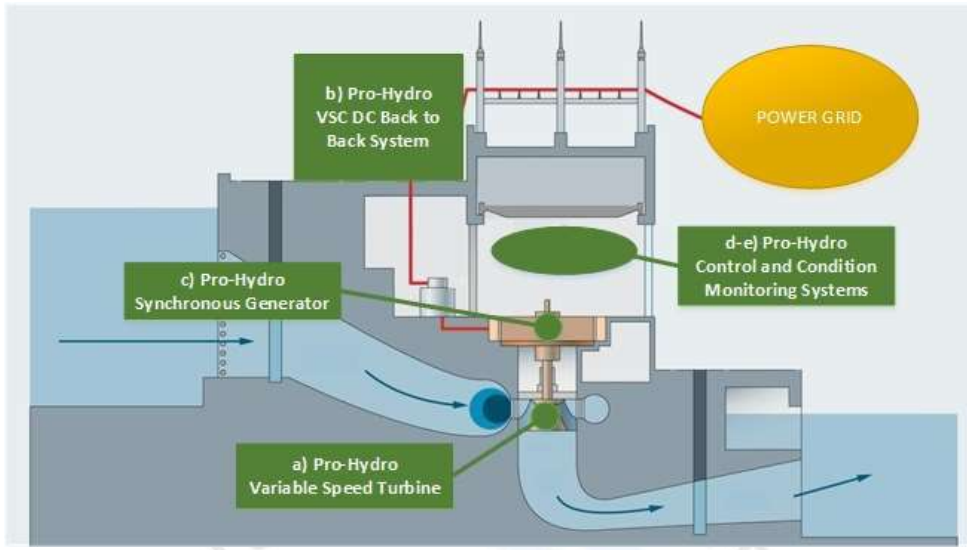
DEĞİŞKEN HIZ KONTROLLÜ ÇALIŞMA

"Yenilik ve dijitalleşme yoluyla teknolojik evrim" adlı çalışma grubunda kurulan görevlerden bir tanesi ise değişken hız kontrol sistemlerinin tasarımını, üretimini, doğrulamasını ve işletimini ele alan değişken hız kontrollü çalışmadır. Geleneksel hidroelektrik santrallerde senkron makine bir ana güç transformatörü üzerinden şalt ekipmanına, oradan ise elektrik şebekesine bağlıdır. Elektrik şebekesindeki frekans şebekeye bağlı her bir senkron generatörün mekanik hızını belirlemektedir. Özellikle son dönemdeki iklim değişikliklerine bağlı su rejimindeki düzensizlikler, akıllara su türbinlerinin tasarım dışı bölgelerde çalışma ihtiyacını getirmiştir. Değişken hız kontrollü işletme, Francis türbinlerin tasarım dışı operasyonlarını artırmakta ve enerji santrallerinin operasyonlarını ve bakımlarını optimize ederek daha verimli ve kullanılabilir HES'ler geliştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, aktif ve reaktif güç desteği sağlayan Gerilim Kaynağı Dönüştürücü (VSC) Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC) sistemi sayesinde daha hızlı tepkilerle en iyi verimlilik noktasının yanı sıra geniş bir çalışma aralığında güç üretebilme esnekliğini de sunmaktadır.

Bir Ufuk Avrupa çağrısı kapsamında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi koordinatörlüğünde başvurusu yapılan ve eşik üstü puan alan ProHydro proje teklifi değişken hız kontrollü işletme geliştirme çalışmaları için güzel bir örnektir.

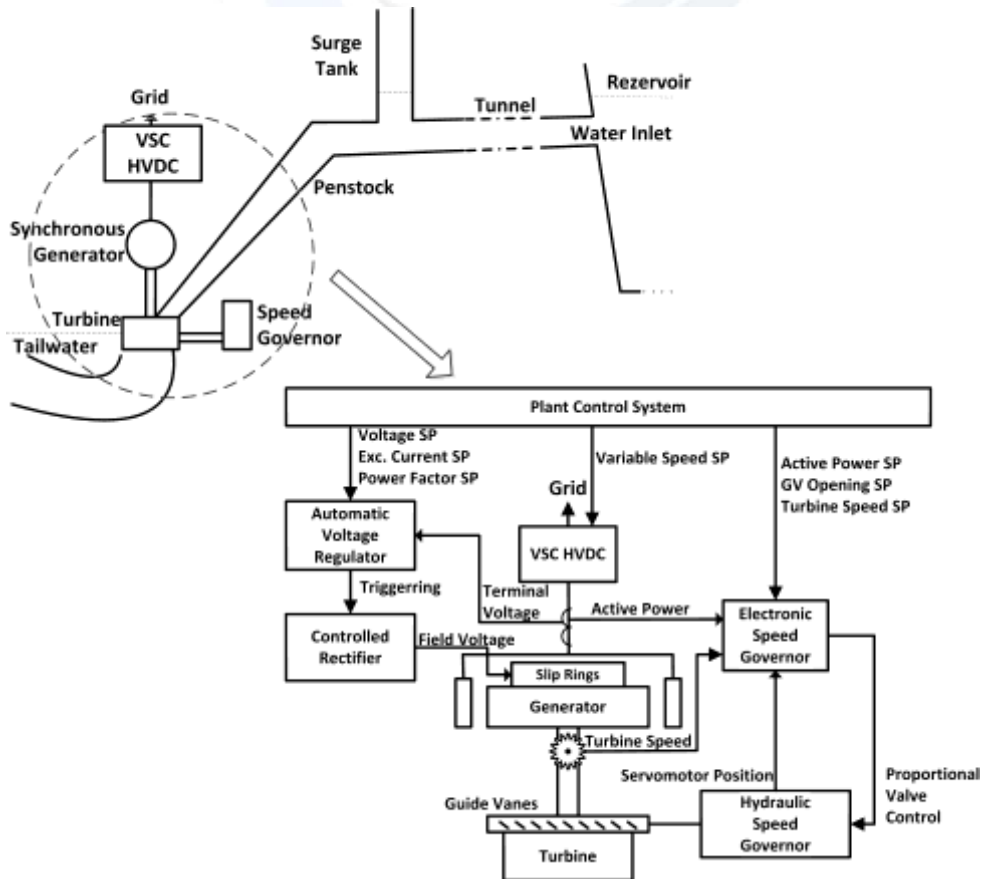
Şekil 6, hidroelektrik ünitesini değişken hız kontrollü bir ünite yapan tüm alt sistemleri göstermektedir. Değişken hız kontrollü ünite, esnekliği, verimliliği ve kullanılabilirliği artırmak için değişken hızlı türbin, VSC sırt sırta HVDC sistemi, senkron generatör, HES kontrol sistemi ve durum izleme sistemi dahil dijitalleştirme çalışmaları olmak üzere beş ana sistemden oluşmaktadır.

Şekil 6 Pro-Hydro Alt Sistemleri



Santral kontrol sisteminin işlevi, değişken hız kontrollü üniteadaki tüm sinyalleri ve süreçleri izlemek ve kontrol etmektir. Bu sistemin sinyal aldığı/gönderdiği alt sistemler hız regülatörü, uyarma sistemi, VSC HVDC, senkron jeneratör, jeneratör ve türbin yatakları, soğutma sistemi, şalt sahası, koruma ve senkronizasyon sistemleridir. Santral kontrol sisteminin etkileşim noktaları Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7 Pro-Hydro Kontrol Sistemleri Genel Şema



Bu projede senkron generatör ile elektrik şebekesi arasında kullanılmak üzere MMC (Modular Multilevel Converter) tabanlı sırt sırta HVDC sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Buradaki amaç, generatörün hız değişimleri için hidroelektrik santral ile şebeke arasında istikrarlı ve esnek bir bağlantı ve geleneksel hidroelektrik santrallere göre daha hızlı dengeleme tepkisi sağlamaktır. Pro-Hydro ünitesinin normal çalışması sırasında santral kontrol sistemi, VSC HVDC sistemine mevcut düşü ve akış koşulları için en verimli çalışma noktası olacak şekilde bir frekans hedef değeri göndermektedir. Senkron generatör de VSC HVDC sistemi tarafından kontrol edilen referans voltajına senkronize edilmektedir. Hız regülatörü, türbini referans frekansa karşılık gelen türbin hızına getirmektedir. Uyarma sistemi, generatör geriliminin VSC HVDC sisteminin generatör terminallerindeki voltajla aynı olacağı alan voltajı sağlamaktadır. Senkronizasyon sağlandıktan sonra hız regülatörü istenen aktif güç çıkışını elde etmek için ayar kanatlarını düzenlemektedir.

SONUÇ ve YAKIN GELECEK KONULARI

Bu çalışma, temiz enerji dönüşümünün ve dijitalleşmenin hidroelektrik enerji sektöründeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Pen@Hydropower COST aksiyonu çerçevesinde, yenilikçi türbin tasarımlarından dijitalleşmenin operasyonel süreçlere entegrasyonuna kadar geniş bir yelpazede ele alınan konular, hidroelektrik enerji sistemlerinin modernizasyonu ve verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda, hidroelektrik enerji sektöründe dijitalleşmenin sağlayacağı başlıca faydalar arasında; enerji üretiminde verimlilik artışı, arıza öncesi tahmin ve bakım faaliyetlerinin iyileştirilmesi, enerji üretim süreçlerinin daha esnek ve adaptif hale getirilmesi yer almaktadır. Ayrıca, dijitalleşme sayesinde hidroelektrik santrallerin operasyonlarının daha çevik ve etkili yönetilmesi, bu santrallerin enerji şebekesi üzerindeki dengeleme ve esneklik kapasitelerini artıracaktır.

Gelecek perspektifleri açısından, Pen@Hydropower aksiyonu kapsamında elde edilen bulgular ve geliştirilen teknolojiler, hidroelektrik enerji sistemlerinin gelecekteki sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunacak önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, genç araştırmacıların dahil edilmesi ve disiplinler arası işbirliklerinin artırılması, sektörün uzun vadeli başarısı için kritik olacaktır. Ayrıca, dijitalleşme süreçlerinin hızlandırılması, hidroelektrik enerji sistemlerinin sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve karbon azaltımı hedeflerine ulaşmada da kilit rol oynayacağını göstermektedir. Önümüzdeki dönemde aşağıda sıralanan konu başlıklarında aksiyon çerçevesinde çalışmalar yürütülecektir:

- Geleceğin elektrik sistemlerinin depolama ihtiyaçları ve hidroelektrik enerjisinin enerji sistemi dayanıklılığına katkı sağlamadaki rolü
- Hidroelektrik santrallerinin yenilenmesinde dijitalleşme engellerinin tanınması ve ele alınması
- Hidroelektrik enerjisinin su altı yaşamının devamlılığına etkisi
- Hidroelektrik enerjinin diğer enerji geçişleri ile bağlantısı

Sonuç olarak, bu çalışmada ele alınan dijitalleşme ve yenilikçi teknolojiler, hidroelektrik enerji sektörünün gelecekteki evrimini şekillendirecek ve enerji sektörünün genelinde temiz enerjiye geçiş sürecini hızlandıracaktır. Bu bağlamda, Pen@Hydropower aksiyonu, sadece Avrupa sathında değil, küresel ölçekte de temiz enerji dönüşümüne katkı sağlayacak önemli bir inisiyatif olarak değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu bildiri, COST (Avrupa Bilim ve Teknoloji İşbirliği) tarafından desteklenen COST Action PEN@Hydropower (CA21104), TÜBİTAK tarafından yürütülen 5212803 nolu İçme Suyundan Elektrik Üretmek İçin İnsansız İşletilen Konteyner Tipi Hidroelektrik Santrallerinin Geliştirilmesi – DESKI Pilot Tesisi Projesi ve 523R402 kodlu P11 Konteyner Tipi Off-Grid Hidroelektrik Santralleri Geliştirme Projesi kapsamında yapılan çalışmalara dayanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] EU Climate Action: 2030 Climate & Energy Framework. (https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en)
- [2] TC Strateji Bütçe Başkanlığı, 12. Kalkınma Planı (2024-2028)
- [3] The European Green Deal. (https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [4] European Commission: Digital Decade Policy Programme 2030. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0552&qid=1666369684560>)
- [5] IEA: World Energy Outlook 2022. (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>)
- [6] Yük Tevzi Bilgi Sistemi (2024): (<https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi>)
- [7] Pen@Hydropower, Pan-European Network for Sustainable Hydropower – Available at: www.pen-hydropower.eu
- [8] Vagnoni, E., Gezer, D., Anagnostopoulos, I., Cavazzini, G., Doujak, E., Hocevar, M. and Rudolf, P., 2023, June. The new role of sustainable hydropower in flexible energy systems and its technical evolution through innovation and digitalization. In Proc of the 36th Int Conference

on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS) (pp. 1767-1776).

- [9] Butuner M.A., (2023). Sunum: “Machine Learning Based Anomaly Detection” in Regular Meeting of Pen@Hydropower WG2, 2023/4.
- [10] Bütüner, M.A.; Koşalay, İ.; Gezer, D. Machine-Learning-Based Modeling of a Hydraulic Speed Governor for Anomaly Detection in Hydropower Plants. *Energies* 2022, 15, 7974. <https://doi.org/10.3390/en15217974>



172 - Yenilenebilir Enerji Yatırımlarının Finansmanı

Av. Serhat Aydın, Av. Ash Başçoban
Aydın Çıkmın Gürvit Avukatlık Ortaklığı

ÖZET

Enerji sektörünün karşılaştığı en önemli zorluklardan biri, enerji talebindeki artış trendine karşılık, enerji sektörünü karbonsuzlaştırmak, diğer yandan da tüketicilerin ihtiyaç duyduğu miktarda enerjiye kesintisiz ve uygun maliyetle erişimini sağlamaktır. Dolayısıyla enerji arz güvenliğinin ve fiyat istikrarının korunarak enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu anlamda, Paris Antlaşması, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve 2053 net sıfır hedefleri başta olmak üzere enerji dönüşümü sürecinin etkisiyle birlikte, elektrik üretimine ilişkin gerçekleştirilen yatırımlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından yayımlanan veriler de 2024 yılı Mart ayı itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücünün 107.959 megavat (MW) seviyesine ulaştığını ve bu kurulu gücün kaynak dağılımı kerteriz alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir payı haiz olduğunu göstermektedir. Enerji dönüşümü sürecinde gerek enerji sektörünün dinamiği gerekse de iklim değişikliği ile mücadelede sürdürülebilirlik başta olmak üzere enerji verimliliğinde hedeflenen sonuçlar dikkate alındığında mevcut ve potansiyel yatırımcılar dahil olmak üzere sektör paydaşları tarafından uzun vadeli planlamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu planlanmaların oluşturulmasında, teknolojik gelişmeler, enerji politikaları, teşvikler, ilgili kamu otoritelerinin düzenlemeleri ve yasal mevzuat, finansman gibi kriterler esas teşkil etmektedir. Dolayısıyla bu anlamda yenilenebilir enerji yatırımlarının finansmanı konusunda özellikle son dönemde yenilenebilir enerjiyle ilgili olarak ülkemizdeki mevzuat değişiklikleri beraberinde mevcut YEKA, YEKDEM gibi mekanizmaların yanı sıra, doğrudan tüketiciye satış imkânı sunacak "Corporate PPA" ve gerekse tedarik şirketlerine satış anlamına gelecek "Merchant/Utility PPA" gibi sözleşmesel zeminlerin; yine ilgili mevzuat değişiklikleri akabinde enerjinin depolanmasına yönelik faaliyetlerin proje finansmanına olan etkilerinin değerlendirilmesi sektörel anlamda önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: enerji dönüşümü, enerji finansmanı, PPA, depolamalı enerji

GİRİŞ

Türkiye'nin enerji sektöründeki dönüşümü destekleyen mevzuat değişiklikleri, enerji depolama sistemlerinin önemini artırmış ve yenilenebilir enerji projeleri için yeni fırsatlar yaratmıştır. Özellikle 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ve Elektrik Piyasasında Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği gibi düzenlemeler, enerji depolama tesislerinin kurulmasına yönelik teşvikleri artırarak enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Öte yandan, yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında giderek önem kazanan Power Purchase Agreement (PPA) modelleri, enerji üreticileri ve tüketicileri arasında yapılan uzun vadeli anlaşmalar olarak, finansal sürdürülebilirlik sağlamada ve piyasa belirsizliklerini minimize etmede kilit rol oynamaktadır. Türkiye'de de bu modellerin daha yaygın bir şekilde benimsenmesi, enerji piyasasının liberalleşmesi ve daha fazla yatırım çekilmesi açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye'de yenilenebilir enerji projelerine yönelik finansman modelleri, ilgili mevzuat ve sektörde yapılan güncel araştırmalara dayalı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemler, enerji sektöründeki yasal düzenlemeler, finansman modelleri ve enerji depolama çözümleri üzerine yapılan araştırmalardan oluşmaktadır. Elektrik Piyasası Kanunu ve sair yasal mevzuat kapsamındaki son değişikliklerin proje finansmanı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında, çeşitli araçlar kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji projelerinin finansmanı, devlet teşvikleri, uluslararası işbirlikleri ve özel sektör yatırımları gibi faktörlerle çeşitlenmiştir ve enerji altyapısının dönüşümünü hızlandırmaya yönelik kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, kamu ve özel sektör yatırımlarını dengelemek ve projelerin sürdürülebilirliğini sağlamak için sermaye hibeleri, uzun vadeli özkaynak yatırımları, borç finansmanı, varlık destekli menkul kıymetler ve garantiler gibi araçlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu araçlar, yatırımcıların risklerini azaltmalarını, sermaye maliyetlerini düşürmelerini ve projelerin çevresel sürdürülebilirliğini desteklemelerini sağlar. Ayrıca, karbon finansmanı ve sonuç odaklı finansman gibi yenilikçi yaklaşımlar da, yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini ve rekabetçiliğini artırmaktadır. Hızla gelişen teknoloji ve buna bağlı olarak sektör dinamiklerinin de değişmesiyle birlikte yenilenebilir enerji yatırımlarının finansmanında hem geleneksel hem de yenilikçi yöntemlerin var olduğunu söylemek mümkündür. Geleneksel yöntemler arasında devlet destekli mekanizmalar, kamu-özel işbirlikleri ve doğrudan yabancı yatırım gibi finansman kaynaklarını ifade etmek yanlış olmayacaktır. Örneğin, birçok Avrupa ülkesinde, sabit fiyat tarifeleri ve devlet destekli teşvikler, yenilenebilir enerji projelerinin gelişimini teşvik etmiştir. Bu mekanizmalar, yatırımcılar için uzun vadeli bir güvence sağlayarak, finansal risklerin minimize edilmesine yardımcı olmaktadır.

Nispeten yenilikçi bir bakış açısıyla esasında doğrudan, lafzi bir yorumla bir finansman yöntemi olarak görülmesi dahi yatırımcılar ve sektör paydaşları nezdinde finansman konusu edinilmesinin kaçınılmaz olacağı sözleşmesel anlamda PPA'ler, enerji depolama faaliyetleri, yeşil finansman gibi konuların bu bildiri aracılığıyla detaylarına değinilmesinde fayda görülmüştür.

3.1. Enerjinin Depolanması

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı, enerji depolama sistemlerinin önemini artırmıştır. Yenilenebilir enerji projelerinin başarılı bir şekilde entegre edilmesi, enerji üretiminde sürekliliğin sağlanması ve şebeke güvenliğinin korunması açısından enerji depolama çözümlerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Özellikle enerji piyasasında “Duck Curve” etkisi olarak anılan enerji üretimi ve enerji talebindeki zamansal dengesizliğinin yarattığı sorunların depolama faaliyetleri ile aşılabileceği öngörülmektedir. Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının aralıklı üretim kapasitesine karşı esneklik sağlarken, enerji arz güvenliğini ve sistem güvenilirliğini artırır.

Türkiye’de enerji depolama sistemlerinin yasal çerçevesi, 09.05.2021 tarihli Elektrik Piyasasında Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği ile çizilmiştir. Söz konusu yönetmelikte zaman içerisinde piyasa ihtiyacına göre değişiklikler gerçekleştirilmektedir. Örneğin 19 Kasım 2022 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan değişiklik ile depolama tesislerinin belirli şartları sağlaması halinde yan hizmetler ve dengeleme güç piyasasına katılımları mümkün kılınmıştır.

Enerji depolama projelerinin piyasada benimsenmesi, yatırımcılar için yeni iş modellerinin gelişmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, Peak Shaving (Yük Puantını Kırpma), Load Shifting (Yük Kaydırma) ve Arbitraj gibi stratejiler, enerji depolama sistemlerinin verimliliğini artırmakta ve piyasa fiyatlarındaki dalgalanmalardan yararlanarak gelir elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu tür iş modelleri, enerji piyasasında daha fazla rekabet avantajı sağlamaktadır.

3.2. PPA Modelleri

Hem enerji üreticileri hem de tüketiciler için uzun vadeli enerji tedarik anlaşmaları (PPA'lar) yenilikçi bir finansman çözümü olarak görülmektedir. Özellikle, Kurumsal PPA'lar, büyük şirketlerin enerji maliyetlerini sabitlemelerini ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarını sağlar. Ayrıca, enerji üreticileri için, enerji piyasalarındaki belirsizlikleri azaltarak, finansman güvenliğini ve yatırımın geri dönüşünü sağlamlaştıran önemli araçlardır. Bu tür modellerin yaygınlaşması, yenilenebilir enerji piyasasının büyümesini ve çeşitlenmesini desteklerken, yatırımcılar için de cazip fırsatlar yaratmaktadır. Merchant PPA'lar ise enerji üreticilerinin enerji piyasasında doğrudan satış yapmalarına olanak tanır. Bu model, enerji piyasasındaki dalgalanmalardan faydalanarak, daha yüksek kar marjları elde etmeyi hedefler. Türkiye’de bu tür anlaşmaların gelişmesi, enerji piyasasının liberalleşmesi ve yatırımcıların yeni projelere daha fazla ilgi göstermesi için önemli bir adımdır. Bu anlaşmaların yaygınlaştırılması, yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında yeni bir paradigma oluşturabilir.

Bu noktada, 5 Temmuz 2022 tarih ve 31887 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren 7417 Sayılı Kanun’un 56. Maddesi hükmünden bahsetmek elzemdir. YEKA modeline ve görece atıl durumdaki Önlisans Başvurularına İlişkin Yarışma Yönetmeliği’ne (“Yarışma Yönetmeliği”) endekli yenilenebilir enerji politikalarında çığır açıcı bir paradigma değişikliğine işaret eder mezkur Madde hükmüyle, global düzlemde “feed-in-tariff” uygulamalarını neredeyse tedavülden kaldıran “Green PPA” konsepti nihayet tartışmasız bir yasal zemine kavuşmaktadır.

Torba Kanun ile 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun (“**Kanun**”) 7. maddesine eklenen hükümler, elektrik depolama tesisi kurmayı taahhüt eden tüzel kişilere, Yarışma Yönetmeliği'ne tabi olmaksızın ve kapasite faktörü gölgesinde kalmaksızın, rüzgâr ve/veya güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesisi kurabilme imkânı tanımaktadır. İlâveten, hali hazırda işletmede bulunan rüzgâr ve/veya güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesislerinin, elektrik depolama tesisi kurmayı taahhüt etmek kaydıyla, kapasite artışına imkân tanınmış vaziyettedir.

Bir başka deyişle, kanun koyucu, enerji yatırımcılarının; elektrik depolama tesisinin bir tür “baz yük” (*baseload*) etkisi yaratması ve böylelikle arz güvenliğini, şebeke yönetim ve yük tevzini kolaylaştırması karşılığında, kapasite limitlerine tabi olmaksızın rüzgar ve/veya güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesisi projesi geliştirmesine kapı aralamaktadır. Bu şekilde elde edilecek bir lisansın, YEKA modelinin doğal uzantısı sayılabilecek sınırlamalardan arı şekilde, hamiline, gün öncesi piyasada satış, ikili anlaşma veyahut YEKDEM'e katılım imkânı bahşedeceği anlaşılmaktadır. Arz güvenliğini arttıracak ve fiyat istikrarını temin edecek piyasa temelli çözümlerin, orta ve uzun vadede Türkiye elektrik piyasalarının yeni normal haline gelmesi kaçınılmazdır. Dolayısıyla, mezkûr Kanun hükmüyle beraber, gerek doğrudan tüketiciye satış imkânı sunacak “Corporate PPA” ve gerekse tedarik şirketlerine satış anlamına gelecek “Merchant/Utility PPA” sayısının üstel artacağı öngörülebilir. Bu mecrada, yenilikçi ve kompleks sözleşme yapılarıyla hayata geçirilecek iş ve finansman modellerinin sisteme çeşitlilik ve derinlik kazandıracağı açıktır.

3.3. Yeşil Finansman

Yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında yeşil finansman araçlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yeşil tahviller, sürdürülebilir kalkınma amaçlarına uygun projeler için finansman sağlamak ve yatırımcıların çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) kriterlerine uygun yatırımlar yapmalarına olanak tanımaktadır. Bu tür finansman araçları, yenilenebilir enerji projelerinin finansal sürdürülebilirliğini artırırken, aynı zamanda sermaye maliyetlerini düşürmektedir.

Sürdürülebilir finansman, sadece yenilenebilir enerji projeleri için değil, aynı zamanda enerji verimliliği projeleri, karbon azaltma projeleri ve enerji depolama çözümleri için de kritik bir öneme sahiptir. Bu tür projeler, iklim değişikliği ile mücadeleye katkıda bulunurken, yatırımcılara da uzun vadeli getiri sağlayacak fırsatlar sunmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için, sürdürülebilir finansmanın teşvik edilmesi, hem yerli hem de yabancı yatırımcıların ilgisini çekmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca, yeşil finansmanın etkin bir şekilde kullanılması için, şeffaflık, raporlama ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, enerji projelerinin finansmanında yeşil tahviller ve diğer sürdürülebilir finansman araçlarının kullanımı, proje risklerini azaltmakta ve yatırımcı güvenini artırmaktadır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yenilenebilir enerji yatırımlarının finansmanı, enerji sektörünün geleceği ve sürdürülebilirliği açısından kritik bir konudur. Bu alandaki yatırımların başarılı olması için finansal araçların çeşitlendirilmesi, risk yönetimi ve uzun vadeli stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir. Enerji piyasasının liberalleşmesi, yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında daha fazla esneklik ve rekabet sağlayarak, enerji dönüşüm sürecini hızlandırabilir.

Enerji depolama çözümleri ile entegre edilen enerji projeleri, enerji arz güvenliğini artırmakta ve piyasada yeni fırsatlar yaratmaktadır. Yenilikçi finansman modelleri ve enerji depolama çözümleri, sadece enerji sektöründe değil, aynı zamanda ekonomik büyüme ve sürdürülebilir kalkınma için de önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu bağlamda, enerji sektörünün geleceği, yenilikçi finansman modellerinin benimsenmesi ve sürdürülebilir enerji projelerinin desteklenmesi ile şekillenecektir.

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında, özellikle enerji depolama teknolojileri ve karbon emisyonlarını azaltıcı projelerin önem kazanması beklenmektedir. Bu süreçte, kamu ve özel sektörün işbirliği yaparak, uygun finansman modelleri geliştirmesi ve enerji dönüşümünü desteklemesi, sektörün sürdürülebilir büyümesi için büyük bir fırsat sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] European Commission. (2020). The European Green Deal.
- [2] International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Investment Report 2023.
- [3] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2024). Türkiye Enerji İstatistikleri Raporu.
- [4] Global Wind Energy Council (GWEC). (2022). Global Wind Report 2022.
- [5] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). (2023). Renewables 2023 Global Status Report.
- [6] SHURA Energy Transition Center. (2023). Reports on Energy Storage and Renewable Integration.
- [7] Türkiye Cumhuriyeti Resmi Gazete. (2022).
- [8] 7417 Sayılı Kanun ve 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun Elektrik Piyasası Kanunu.