VIII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi



22-23-24 Ekim 2025

Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi

İzmir

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası
İzmir Şubesi
1954

https://izmir.emo.org.tr
https://etuk.org.tr
izmir@emo.org.tr
+90 232 489 34 35
EMO_Izmir
izmiremo
emoizmir
EMO_Izmir

ETUK Mobil

Available on the App Store

GET IT ON Google Play

BİLDİRİLER KİTABI

EMO Yayın No: EK/2026/784

1954

TMMOB
ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

VIII. ELEKTRİK TESİSLERİ ULUSAL KONGRE VE SERGİSİ

22-23-24 Ekim 2025
İzmir

BİLDİRİLER KİTABI*

*E-Kitap

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası
1954

VIII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi
Bildiriler Kitabı

ISBN: 978-605-01-1726-4
EMO Yayın No: EK/2026/784

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
Ihlamur Sokak No:10 Kat:2 06640 Kızılay Ankara
Tel: (312) 425 32 72 Faks: (312) 417 38 18
http://www.emo.org.tr E-Posta: emo@emo.org.tr

Dizgi
TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi

SUNUŞ

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi; elektrik, elektronik, enerji, aydınlatma, otomasyon ile elektrik mühendisliğinin diğer önemli sektörlerinin yer aldığı Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi'nin sekizincisini düzenliyor.

Meslek alanlarımıza ilişkin gelişmelerin izlenmesi, üniversiteler ile sanayi arasında işbirliğinin sağlanması, mühendislik uygulamalarının ve etkileşim içinde bulunan diğer alanlardaki bilimsel ve teknolojik gelişmelerin sunulması, değerlendirilmesi ve tartışılması amacıyla 2009 yılında 1024 kişinin katılımıyla başlayan etkinlik; son olarak VII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi başlığı altında 5893 kişinin katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Etkinliklerin yenisi VIII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi adı altında 22-24 Ekim 2025 tarihleri arasında İzmir Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi'nde düzenlenmiştir.

Kongre çerçevesinde; aydınlatma, yapı elektronik sistemleri, güç ve enerji sistemleri, bakım ve bakım teknolojileri, otomasyon, elektrik tesisatı, dijitalleşme ve yapay zeka konularında katılımcıların zengin içerikli etkinliklerle buluşması sağlanmıştır.

Kongre Yürütme Kurulu

Kongre Bilim Kurulu

Prof.Dr. Şükrü Özen	Akdeniz Üniversitesi
Prof.Dr.Bilal Gümüş	Dicle Üniversitesi
Prof.Dr. E. Yeşim Zoral	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof.Dr. Engin Karatepe	Ege Üniversitesi
Prof.Dr. Mutlu Boztepe	Ege Üniversitesi
Prof. Dr. Arif Nacaroğlu	Gaziantep Üniversitesi
Prof.Dr. Belgin Türkay	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Özcan Kalenderli	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Sermin Onaygil	İTÜ Enerji Enstitüsü
Prof.Dr. Mehmet Kemal Güllü	İzmir Bakırçay Üniversitesi
Prof.Dr. Kemal Avcı	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Prof.Dr. Aydın Akan	İzmir Ekonomi Üniversitesi
Prof.Dr. Levent Eren	İzmir Ekonomi Üniversitesi
Prof.Dr. Berna Özbek	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Prof.Dr. Mustafa A. Altınkaya	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Prof.Dr.İsmail Hakkı Çavdar	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Adnan Kaya	Katip Çelebi Üniversitesi
Prof.Dr.Engin Özdemir	Kocaeli Üniversitesi
Prof.Dr. Sezai Taşkın	Manisa Celal Bayar Üniv.
Prof. Dr. Alkan Alkaya	Mersin Üniversitesi
Prof.Dr. Engin Çetin	Pamukkale Üniversitesi
Prof.Dr. Mustafa Seçmen	Yaşar Üniversitesi
Doç.Dr. Yılmaz Kalkan	Adnan Menderes Üniversitesi
Doç.Dr. Ahmet Özkurt	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Özgür Tamer	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç.Dr. Mete Çubukçu	Ege Üniv. Güneş Enerjisi Enstitüsü
Doç.Dr. Erdal Özbek	Katip Çelebi Üniversitesi
Doç.Dr. Hasbi İsmailoğlu	Yalova Üniversitesi
Dr.Öğr.Üyesi Hacer Şekerci Öztura	Yaşar Üniversitesi

Kongre Düzenleme Kurulu

H.Avni Gündüz (Düzenleme Kurulu Başkanı)	EMO İzmir Şubesi
Mahir Ulutaş	EMO
Ali Eray Ergin	EMO İzmir Şubesi
Ali Fuat Aydın	EMO İzmir Şubesi
Aydın Tutumlu	EMO İzmir Şubesi
Barış Aydın	EMO İzmir Şubesi
Bülent Uzunkuyu	EMO İzmir Şubesi
Eren İpek	EMO İzmir Şubesi
Esma Uzer Kardaş	EMO İzmir Şubesi
Gülhan Gürler	EMO İzmir Şubesi
Hacer Öztura Şekerci	EMO İzmir Şubesi
Kadriye Avcü	EMO İzmir Şubesi
M. Orçun Öztürk	EMO İzmir Şubesi
M.Emin Özger	EMO İzmir Şubesi
M.Macit Mutaf	EMO İzmir Şubesi
Mete Çubukçu	EMO İzmir Şubesi
Muhammet Demir	EMO İzmir Şubesi
Mutlu Boztepe	EMO İzmir Şubesi
N.Sedat Gülşen	EMO İzmir Şubesi
Özcan Uğurlu	EMO İzmir Şubesi
Özgür Tamer	EMO İzmir Şubesi
Selim Telli	EMO İzmir Şubesi
Şahan Kılınç	EMO İzmir Şubesi
Zehni Yılmaz	EMO İzmir Şubesi
Mehmet Mak	EMO Adana Şubesi
Kenan Erpir	EMO Ankara Şubesi
Rüştü Bekdikhan	EMO Antalya Şubesi
Uğur Günal	EMO Bursa Şubesi
Bülent Pala	EMO Denizli Şubesi
Ruken Akbulut	EMO Diyarbakır Şubesi
Salih Eğerci	EMO Eskişehir Şubesi
İslim Arıkan	EMO Gaziantep Şubesi
Erhan Karaçay	EMO İstanbul Şubesi
Gökmen Hasançebi	EMO Kocaeli Şubesi
Hatice Özmüş	EMO Mersin Şubesi
Adnan Korkmaz	EMO Samsun Şubesi
Emre Akyüz	EMO Trabzon Şubesi

Kongre Yürütme Kurulu

H.Avni Gündüz (Başkan)	Eren İpek	M.Emin Özger	Özcan Uğurlu
Ali Eray Ergin	Esma Uzer Kardaş	M.Macit Mutaf	Özgür Tamer
Ali Fuat Aydın	Gülhan Gürler	Mete Çubukçu	Selim Telli
Aydın Tutumlu	Hacer Öztura Şekerci	Muhammet Demir	Şahan Kılınç
Barış Aydın	Kadriye Avcü	Mutlu Boztepe	Zehni Yılmaz
Bülent Uzunkuyu	M. Orçun Öztürk	N.Sedat Gülşen	

İÇİNDEKİLER

Fotovoltaik Sistemlerde DC Gerilim Seviyesinin Yükseltilmesinin Getirdiği Değişiklikler 7
Engin Çetin

Güneş Enerjisi Eviricilerinden Kaynaklanan Supraharmoniklerin Ölçümü, Etkileri ve Filtre Tasarımı 10
Didem Ergun Sezer

Antalya İli Elmalı İlçesinde Güneş Enerjili Dağıtık Üretimin Şebeke Stabilitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi 19
Ahmet Yaşar Yoldaş, Eren Alpaslan, Kayhan Ateş, Şükrü Özen

Petrokimya Tesislerinde MCC Panel Modernizasyonu 28
Fatih Abanoz

IoT Tabanlı Bina Otomasyon Sistemleri: Enerji Verimliliği, Kullanıcı Konforu ve Sürdürülebilirlik Üzerine Bir İnceleme 36
Özge Sağlıyan

PLC Otomasyon Sistemlerinin Önleyici Bakımı İçin Dijital İkizinin Oluşturulması 53
Mehmet Erdal Özbek, Kamil Çetin, Bilge Kartal Çetin, Çağdaş Karataş, Savaş Şahin, Cornelia I. Badoi

Elektriksel Proses Güvenliği Yönetimi 59
M.Ferit Pekeroğlu

Dağıtım Transformatörlerinde Metasezgisel Algoritmalarla Tasarım Optimizasyonu 67
Nehir Değer, Ulaş Kılıç

Yerli ve Milli Modüler Transformatör: Enerji Verimliliğinde Yeni Bir Yaklaşım ve Pilot Bölge Uygulama Sonuçları 77
Kardelen Kamişli, Turgay Özzeftci, Tuğbanur Taşdemir Özdemir,Nazlı Cürgül Can, Umut Barış Kılıçkan,
Mustafa Uğur Toruner, Bilal Bağcı, Metin Kerimoğlu

Rüzgâr Enerjisi Üretim Penetrasyonunun Elektrik Şebekesi Kararlılığı ve Duyarlılığı Üzerindeki Dinamik Etkileri 82
Dilay Naz Özkan, Engin Karatepe

Rüzgar Santrallerinde Aerodinamik Etkileşimlere Bağlı Azalan Verimlilik Dikey Eksenli Türbinler ile Geri Kazanılabilir mi? 94
B. Kıvanç Deneçli

Alanlar Arası Salınımlar Kapsamında Rüzgar Enerjisi Santrali Entegrasyonunun Analizi 105
İbrahim Nurettin Erdenk, Engin Karatepe

Yer Altı Varlıklarını Tespit Destek Sistemi Ar-Ge Projesi 117
Sümeyye İleri, Enis Bubik

Enerji Nakil Hatlarında İzolatör Arızalarının Kaçak Akım Analizi ve Makine Öğrenmesi ile Erken Tespiti 127
Turgay Özzeftçi, Tuğbanur Taşdemir Özdemir, Mustafa Uğur Toruner, Bilal Bağcı, Metin Kerimoğlu

Yeni Tip Yerli İzolatör Tasarım ve Üretim Ar-Ge Projesi 133
Adnan Canlı, Furkan Gültekin

Şebekeye Bağlı Aktif Kenetlemeli Yumuşak Anahtarlamalı Flyback Mikro Evirici Tasarımı 138
Mutlu Boztepe, Büşra Demir, Melih Aydemir

PLC Haberleşmesinde Uygun Filtre Seçimi ve Tasarımı 146
Hacer Öztura, Beril Yetiş, Sarp Namdar, S. Bora Günden, Berk Baykal

OG Şebekenin 5G ile İzlenmesi ve Kontrolü 154
Vedat Eliş, Büşra Töre

Süper Hücre Tabanlı Optimal Dağıtım Trafosu Konumlandırma Yaklaşımı ve Uygulama Senaryosu 163
Fatma Nur Vurgeç, Selen Kılıç Akgün, Vural Bayraklı

Şebeke Uyumluluk Analizleri İçin Tipik Bir Elektrik Depolama Tesisinin Statik ve Dinamik Modellemesi 171
Osman Bülent Tör, Erdi Doğan, Mahmut Erkut Cebeci, Muzaffer Dindar, Kasım Kaan Yılmaz

Acil Durumlarda Tahliyenin Önemi 182
Aytekin Durmuş

İÇİNDEKİLER

EN-50710 Standardı ve Yangın Güvenlik Sistemlerinde Güvenli Uzaktan Servis Uygulamaları 187
Adem Çakır

Solar Transformatörlerde Güç Seçim Kriterleri Üzerine Değerlendirme 200
Arda Demir

Yeşil Hidrojen Mikroşebekesinin Ada Modunda Çalışması ve MATLAB SİMULİNK Analizi 206
Gülşah Çolak, Hacer Öztura

Güneş Enerjisi Sistemlerinde Transformatör Kapasitesinin Optimizasyonu 216
İsmet Kaymaz, Semih Tursun, Mehmet Bayrak

Konutlarda Akıllı Termostat ile Isıl Konfor ve Enerji Verimliliği Çözümleri 226
Hacer Öztura, Kaan Özbahçeci, Cansu Doğan, Ömer Hısım, Engin Dursun

LCC-S Kompanzasyonlu Endüktif Kablosuz Güç Transfer Sistemi Tasarımı 232
Mutlu Boztepe, Asım Furkan Gök, Alperen Etelik

Topraklayıcı Formüllerinde Yönetmelik Kaynaklı Uyuşmazlıkların İncelenmesi 239
N.Cahit Gencer

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE DC GERİLİM SEVİYESİNİN YÜKSELTİLMESİNİN GETİRDİĞİ DEĞİŞİKLİKLER

Prof. Dr. Engin ÇETİN

Pamukkale Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Denizli

engincetin@pau.edu.tr

ÖZET: *Fotovoltaik santrallerin 1.5 kV olan DC izolasyon seviyesi, yakın zamanda 2 kV'a çıkartıldı. Bu çalışmada, ilgili değişikliğin sebepleri ve sektörde yaşanması muhtemel sorunlara değinilmiştir (Not: Bu bildiri, EMO Elektrik Mühendisliği dergisinin 476. sayısında aynı içerikle yayınlanmıştır).*

GİRİŞ

Bilindiği üzere, fotovoltaik santrallerde fotovoltaik modüller ile solar eviriciler arasında uygulanan maksimum DC sistem gerilimi seviyesi, 1.000 V'tan 1.500 V'a çıkartılmıştı. Uzunca bir süredir de fotovoltaik santral tasarımlarında, bu maksimum DC gerilim seviyesi göz önüne alınmaktaydı. Bu durum, sektörü belirleyen fotovoltaik modül üreticilerinin piyasaya sağladıkları fotovoltaik modüllerin maksimum DC sistem gerilim değerlerini (izolasyon gerilimi) 1.500 V'a yükseltmeleriyle başlamış, sonrasında solar evirici imalatçılarının da kendi cihazlarını bu yeni duruma göre revize etmeleriyle devam etmişti. Fotovoltaik santrallerin bu iki ana ekipmanının maksimum gerilim seviyelerindeki yükselme, elbette; solar kablo, parafudr, sigorta v.b. ekipmanın da bu yeni duruma uygun olarak üretilmesi ve tedarik edilmesi zorunluluğunu da beraberinde getirmişti.

Son dönemlerde sektörde, 1.500 V'luk DC maksimum gerilim seviyesi değerinin, 2.000 V'a çıkartılması gündemde. Sektörel bazda ciddi etikleri olacak bu geçişin de, 2030 yılına kadar tamamlanması öngörülüyor [1, 2].

DC GERİLİM SEVİYESİNDEKİ DEĞİŞİKLİĞİN ÖNEMİ

Bu değişikliğine neden olarak, pek çok sebep sıralanıyor [1]. Bunlardan ilki, sistem kayıplarını azaltıp sistem verimini arttırmak. Bilindiği üzere sistem geriliminin arttırılması; fotovoltaik modüller ile solar eviriciler arasında oluşan gerilim düşümünü ve hat kayıplarını azaltıcı yönde etki edecek. Bir diğer önemli etken, fotovoltaik dizi gerilimi arttırıldığından, dizilere daha fazla fotovoltaik modül tesisi mümkün olabilecek. Böylelikle, fotovoltaik santrallerdeki; solar evirici, dizi, konektör, sigorta, DC pano, parafudr sayıları ile DC kablo metrajları azalmış olacak. İşçilik maliyetleri ile işletme – bakım maliyetlerinin azalması da beklentiler arasında. Bununla birlikte, gerilim seviyesinin yükseltilmesi, solar evirici maliyetlerinde bir artışa da neden olacak.

Peki fotovoltaik santrallerde maksimum gerilim seviyesindeki (veya izolasyon gerilim seviyesi) bu değişim, tasarım yapan, sahada test yapan veya işletme –

bakım süreçlerinde görev alan teknik personel için neden önemli?

2 kV'luk DC gerilim seviyesine geçiş, sistemde kullanılan ekipmanın da bu gerilim seviyesine uygun olarak imal edilmesini gerektirmekte. Öyle ki bu durum; fotovoltaik modülden solar eviriciye, kablodan sigortaya kadar santralin tamamına yakınını teşkil eden donanımın yapılanmasını doğrudan etkileyecek. Gerilim seviyesinin yükseltilmesi, sistem bileşenlerinin yükselen gerilim seviyesine karşı izolasyonlarının daha dayanıklı hale getirilmesini zorunlu kılmakta. Bu da tasarımların yeni duruma adapte olmasını, ekipman üretimlerinde kullanılan malzemelerin de buna uygun şekilde üretilmesini zorunlu kılıyor.

Santral bileşenlerindeki bu değişim, bileşen testinde kullanılan solar tesisat test cihazlarının da yenilenmesi demek. Zira, fotovoltaik santraller için DC gerilim seviyesinin 1.000 V'tan 1.500'a çıkartılması, pek çok test/ölçü cihazının atıl kalmasına neden oldu. 1.000 V'luk açık devre gerilimi ölçüm değerine sahip test/ölçü cihazları, sadece bu gerilim seviyesine uygun olarak kurulan santrallerde test ve ölçüm faaliyetlerinde kullanılabiliyor. Benzer bir durum, 1.500 V'luk izolasyon seviyesine sahip solar tesisat test cihazları için de geçerli olacak. Öyle ki, 2.000 V açık devre gerilimine sahip fotovoltaik santraller için, bu gerilim seviyesinde test ve ölçüm yapabilen yeni tip solar tesisat test cihazları tasarlanıp üretilecek. Bu cihazları satın almak için de ilave bir pazar oluşması, doğal bir süreç olarak gözüküyor.

Fotovoltaik sistemler ile ilgili bu değişimin, bir de mevzuat ayağı var. Yapılacak olan DC gerilim seviyesi düzenlemesinin, Avrupa'da mevzuat bağlamında sorun yaratacağına dair endişeler var [3]. Çünkü ülkemizde de uygulanan IEC normları, 1.500 V'a kadar olan (1.500 V dahil) DC gerilim seviyesini alçak gerilim (AG) sınıfına tabi tutuyor [5]. Dolayısıyla fotovoltaik santrallerin DC tarafındaki gerilimin 2 kV'a yükseltilmesi, santraller için ilave mevzuat değişikliklerine neden olacak. Örneğin, santralin DC tarafındaki elektriksel güvenlik önlemleri, artık AG elektrik sistemlerine göre değil, yüksek gerilim (YG) elektrik sistemlerine göre tasarlanmak ve uygulanmak durumunda olacak [3]. Bu ve buna benzer pek çok değişikliğe yönelik mevzuat çalışmalarının, oldukça zaman alacağını ön görmek mümkün [3].

Yapılacak değişikliğin ülkemizi ilgilendiren bir başka unsuru da, YG işletme sorumluluğunun hangi şartlara göre yürütüleceği noktasındadır. Bilindiği üzere bugüne kadar, fotovoltaik santrallerin DC tarafındaki test ve ölçümler, gerilim seviyesinin 1,5 kV olması sebebiyle, YG İşletme Sorumluluğu Belgesi olmayan Elektronik / Elektrik - Elektronik Mühendisleri tarafından yapılabilmekteydi. 2 kV DC gerilim seviyesine sahip fotovoltaik santrallerin devreye girmesi ile birlikte, bu seviyede gerilime sahip santrallerin DC test ve ölçümlerinin yapılması ile ilgili olarak, önceden yetkili olan ilgili mühendislerin yetkileri, mevzuat gereği kendiliğinden ortadan kalmış olacak. Bu durum ve yukarıda bahsedilen diğer gelişmelerle ilgili olarak nasıl bir yol izlenmesi gerektiğine dair, Odamızın öncülük edeceği bir çalışmanın başlatılması, yerinde olacaktır.

SONUÇ

Çin'in son zamanlarda dünyadaki pek çok teknolojik gelişmenin odağı olması ve bu gelişmelere öncülük etmesi, fotovoltaik santrallerde oluşmaya başlayan bu değişimde de kendisini iyiden iyiye hissettiriyor. 2023 yılında Çin'de, 2 kV'luk izolasyon gerilim seviyesine sahip 182 MW gücünde bir santral devreye alınmıştı [3]. Bir diğer küresel oyuncu ABD'de ise, yeni başkanın yenilenebilir enerjiye karşı olumsuz tavrı [4], ABD açısından bu hususta belirsizlikler içeriyor. S&P Global'e göre, 2030 yılına kadar tüm dünyada üretilen fotovoltaik santral projelerinin %77'si, 2 kV'luk DC gerilim seviyesine sahip olacak [3]. Görünen o ki, gerek sektörel ticari oyuncuların, gerekse Odamızın, fotovoltaik santrallerdeki bu önemli değişime kendilerini hızlı bir şekilde hazırlamaları gerekiyor.

KAYNAKLAR

[1] https://www.pv-magazine.com/2024/12/16/shift-to-2-kv-voltage-in-solar-projects-tipped-to-gain-traction/

[2] https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/the-2-kv-transition/

[3] https://www.pv-magazine.com/2025/02/14/higher-voltage-faces-greater-resistance/

[4] https://www.pv-magazine.com/2025/03/22/is-trump-just-a-bump-in-the-road-for-us-solar/

[5] IEC Standart Voltages, IEC 60038 Edition 7.0 2021-12, IEC 60038:2009-06/AMD1:2021-12(en-fr).

Güneş Enerjisi Eviricilerinden Kaynaklanan Supraharmoniklerin Ölçümü, Etkileri ve Filtre Tasarımı

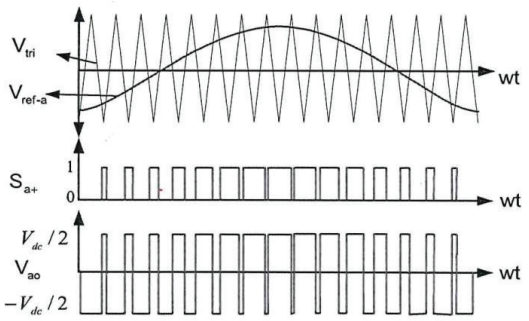
Didem Ergun Sezer
Ergun Elektrik A.Ş. İzmir
didem@ergunelektrik.com

Özet: Güneş enerjisi santrallerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının güç sistemleri üzerindeki etkileri daha da belirgin hale gelmektedir. PWM kontrollü fotovoltaik (PV) inverterlerin yüksek anahtarlama frekanslarında çalışması, 2 kHz ile 150 kHz arasında supraharmonik bileşenlerin oluşmasına neden olmakta; bu bileşenler şebeke empedansı ile etkileşime girerek iletim yoluyla çevre sistemlerde bozucu etkilere yol açabilmektedir. Özellikle zayıf şebeke koşullarında supraharmoniklerin yayılımı artmakta, bu durum sistem kararlılığı ve güç kalitesi açısından risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, PV inverterlerin neden olduğu supraharmoniklerin tespiti, karakterizasyonu ve yayılım mekanizmaları hem teorik hem deneysel olarak ele alınmıştır. Sahada yapılan ölçümlerle yaklaşık 20 kHz civarında yoğunlaşan supraharmonik bileşenlerin belirlenmesi sonrası, bu istenmeyen yüksek frekanslı bileşenler şebekeye yayılımını sınırlamak amacıyla pasif filtre temelli bir çözüm geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Filtreleme öncesi ve sonrası gerçekleştirilen spektral analizler, filtre yapısının supraharmonik genliklerini anlamlı ölçüde azalttığını göstermiştir. Çalışma sonucunda, inverter-şebeke etkileşiminde filtre tasarım parametrelerinin ve şebeke empedansının kritik rol oynadığı, pasif filtreleme uygulamalarının sahada uygulanabilir ve etkili bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda, artan PV sistem yaygınlığı altında güç kalitesinin korunmasına yönelik mühendislik çözümlerine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

1. GİRİŞ:

Günümüzde ülkemizde hem arazi tipi hem de çatı tipi güneş enerjisi santrallerinin sayısı hızla artmakta, bu durum dağıtık üretim yapısının güç sistemleri içerisindeki payını her geçen gün artırmaktadır. Bu dönüşümle birlikte, fotovoltaik (PV) sistemlerden elde edilen doğru akımın (DC), alternatif akıma (AC) çevrilerek şebekeye aktarılması amacıyla kullanılan DC-AC eviricilerin sayısı da her geçen gün önemli ölçüde katlanarak artmaktadır.

Modern PV eviricileri genellikle Pulse Width Modulation (PWM) kontrollü topolojilerle çalışmakta, çıkış sinyalini sinüzoidal forma yaklaştırmak için yüksek anahtarlama frekanslarında anahtarlama yapmaktadırlar. Ancak bu durum, özellikle 2 kHz ile 150 kHz aralığında oluşan ve yeni nesil güç kalitesi bozulmaları arasında yer alan supraharmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Supraharmonikler yalnızca sinüzoidal dalga şekillerini bozmakla kalmamakta, aynı zamanda iletim hatları boyunca yayılım göstererek çevrelerindeki diğer cihazlar üzerinde iletim yoluyla bozucu etkiler oluşturabilmektedir. Şekil-1'de darbe genişlik modülasyonu örneği gösterilmiştir.



Şekil-1: Darbe Genişlik Modülasyonu

Bu bozulmaların temel kaynağı, güç elektroniği alanında kullanılan MOSFET ve IGBT gibi yarı iletken elemanlardaki teknolojik gelişmelerle birlikte yükselen anahtarlama frekanslarıdır. Daha yüksek frekanslı çalışmanın mümkün hale gelmesi, daha geniş bir frekans spektrumuna yayılan enerji bileşenlerini de beraberinde getirmiştir. Özellikle birden fazla eviricinin aynı noktadan şebekeye bağlandığı sistemlerde, her bir eviricinin PWM frekansına yakın bileşenlerinin üst üste binmesi sonucu, güç kalitesi daha da bozulmakta ve şebeke ile olan etkileşim karmaşık bir hâl almaktadır.

Bu etkileşimin önemli bir boyutu da şebeke empedansıdır. Şebeke empedansı, zamanla ve yüke bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, bu empedans ile PWM kontrollü eviriciler

arasındaki etkileşim zamana bağlı bir karakter sergilemekte ve supraharmoniklerin yayılımını kolaylaştırabilmektedir. Bu durum özellikle zayıf şebeke koşullarında daha da belirgin hâle gelmektedir.

Supraharmonik bileşenlerin birikimli etkileri, PV eviricilerin kontrol yapıları ve filtreleme stratejilerinin yeterliliğini sorgulatmakta; bu bağlamda empedans tabanlı kararlılık analizleri, supraharmonik modelleme yaklaşımları ve pasif sönümleme tekniklerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, PWM kontrollü güneş enerjisi eviricilerinin şebeke üzerindeki etkileri; özellikle supraharmonik bileşenlerin oluşumu, yayılımı ve şebeke empedansı ile olan etkileşimleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca, evirici-topoloji uyumu, filtre tasarımındaki kritik parametreler ve sistem kararlılığını güvence altına alacak sönümleme stratejileri detaylı şekilde incelenmiştir. Deneysel ve benzetim tabanlı analizlerle desteklenen çalışmada, supraharmoniklerin tespiti, değerlendirilmesi ve modellenmesine yönelik yöntemler sunularak, gelecekte sayıları daha da artacak olan PV evirici tabanlı sistemlerde güç kalitesinin korunması hedeflenmiştir.

2. PULSE WIDTH MODULATION (PWM) VE SUPRAHARMONİKLERİN OLUŞUMU:

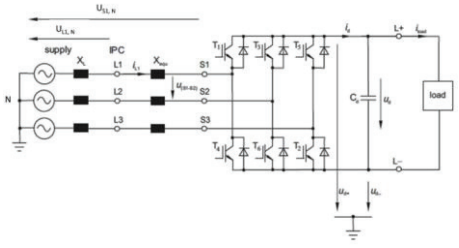
Günümüzde doğru akımı alternatif akıma dönüştürme amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biri Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) tabanlı eviricilerdir. Bu eviriciler fotovoltaik (PV) sistemlerde kullanılmaktadır, dalgaformu sinüzoidal dalgaformuna yaklaştırmakta ve kontrol esnekliği sağlamaktadır. Ancak, bu yararlarının yanında, özellikle yüksek frekanslı anahtarlama karakteristikleri nedeniyle supraharmoniklerin 2 kHz ile 150 kHz oluşmasına neden olmaktadırlar.

PWM eviriciler, PV sistemlerde sabit bir 16-20kHz anahtarlama frekansında çalışan yarı iletken anahtarlardan oluşur. Bu anahtarlar, sabit bir DC bara geriliminden beslenerek, belirli bir darbe desenine göre AC çıkış üretir. PWM yöntemi; taşıyıcı olarak kullanılan üçgen bir sinyalin, hedeflenen sinüzoidal modülasyon dalgasıyla karşılaştırılması yoluyla, çıkış geriliminin anlık genliğini kontrol eder. Bu şekilde, çıkış geriliminde temel frekansta sinüs bileşeni elde edilmek istenirken, aynı zamanda yüksek frekansta harmonik içeren yan bant bileşenler de üretilmektedir.

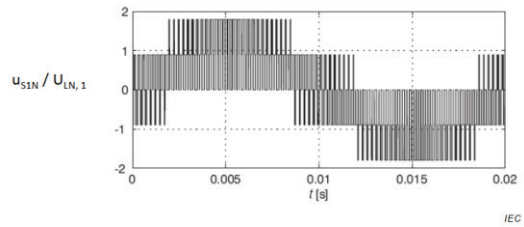
Bu yüksek frekanslı harmonikler, özellikle 2 kHz ile 150 kHz aralığında yoğunlaşmakta ve supraharmonik bileşenler olarak tanımlanmaktadır. IEC teknik standardı IEC TS 62578'e göre, bu bileşenler klasik harmonik analiz yöntemleriyle tespit edilemeyen, ancak sistem empedanslarıyla etkileşime girerek yayınım yapan ve güç kalitesini olumsuz etkileyen bileşenlerdir. Bu etkileşim, özellikle birden fazla eviricinin paralel bağlandığı sistemlerde daha da belirgin hale gelir. Çünkü her bir eviricinin PWM frekansına yakın bölgede yaydığı supraharmonik bileşenler, rezonansa girerek üst üste binme ve genlik artışı gibi sonuçlara yol açabilir. [1] [IEC TS 62578, 2015].

PWM tabanlı eviriciler, taşıyıcı sinyal (genellikle üçgen dalga) ile modülasyon sinyali (genellikle sinüs) arasındaki karşılaştırmaya dayalı olarak, çıkış geriliminde hızlı anahtarlamalar gerçekleştirir. Bu hızlı geçişler (anahtarlama olayları), sinyal spektrumunda yalnızca temel frekans bileşenini değil, aynı zamanda çok sayıda üst harmonik bileşeni de barındırır. Özellikle PWM anahtarlama frekansına (fs) ve bunun çok katlarına karşılık gelen frekanslarda enerji birikimi gözlemlenir.

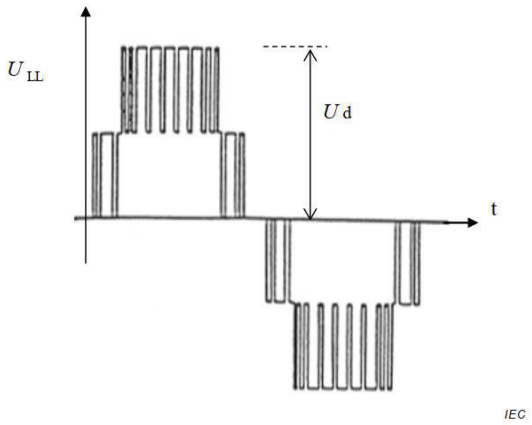
Bu bileşenlerin bir bölümü 2 kHz ile 150 kHz arasında yer almakta olup supraharmonik sınıfına girmektedir. Bu bileşenler, klasik harmonik filtreleme stratejileriyle bastırılamamakta ve genellikle sistemin iletim hatlarında yayılarak diğer cihazlara girişimsel etkilerde bulunmaktadır [IEC TS 62578, Madde 6.2].



Şekil-2: İki seviyeli PWM gerilim kaynaklı inverter topolojisinin temel gösterimi



Şekil-3: 4 kHz anahtarlama frekansındaki gerilimin tipik dalga formu



Şekil-4: Üç seviyeli PWM konvertörün fazlar arası voltajının tipik eğri şekli

3. SUPRAHARMONİKLERİN ŞEBEKEYE ETKİSİ VE PARALEL EVİRİCİ ETKİLEŞİMİ:

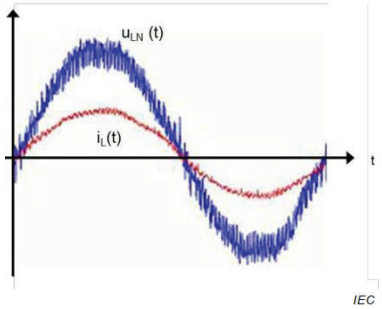
Birden fazla PV eviricinin aynı şebeke noktasına paralel bağlandığı sistemlerde, her bir eviricinin taşıyıcı frekansı birbirine çok yakın olabilir. Bu durumda, supraharmonik bileşenler üst üste biner ve rezonans koşullarında belirli frekans bileşenlerinin genliği tehlikeli seviyelere ulaşabilir. Bu durum şebeke empedansı ile etkileşim hâlindedir; çünkü şebeke empedansının frekansa bağlı olarak değişen karakteristiği bazı frekanslarda rezonansa yol açabilir.

IEC TS 62578'e göre, sistemin empedans karakteristiğinin frekans ekseninde modellenmesi, bu tür supraharmonik etkileşimlerin önceden tespit edilmesi açısından kritik öneme sahiptir [IEC TS 62578, Madde 7.1]. Bu yaklaşım, empedans tabanlı kararlılık analizlerinin yapılmasını ve filtre parametrelerinin optimize edilmesini mümkün kılar.

Tablo 1 ‘de İletim hatlarında görülen girişimin frekans tabanındaki sınıflandırılmaları ve ilgili frekans aralıkları verilmiştir.

Subharmonik	<50Hz
Harmonik	50Hz - 2kHz
Supraharmonik	2kHz - 150kHz
Elektromanyetik Girişim (İletim yoluyla)	150kHz - 30MHz

Tablo 1. İletim yoluyla girişimin frekans aralıkları



Şekil-5: Kapasitif düzgünleştirmeli ve ek filtre içermeyen bir PWM evirici ile gerçekleştirilmiş AIC'nin tipik besleme şebeke akımı iL(t) ve gerilimi uLN(t).[1]

Günümüzde elektrikli ve elektronik sistemlerin yaygın olarak PWM tabanlı güç elektroniği devreleriyle donatılması, klasik harmonik bozulmaların ötesinde, 2 kHz ile 150 kHz arasındaki frekans bandında yeni tür güç kalitesi problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu frekans aralığında oluşan bozulmalar “supraharmonikler” olarak adlandırılmakta ve hem alçak gerilim hem de orta gerilim seviyelerinde ciddi elektromanyetik girişim (EMI) etkileri oluşturmaktadır. Özellikle bu bileşenlerin yayılımı, hem yerel cihazlar üzerinde hem de daha geniş şebeke yapısı üzerinde dikkat çekici bozulmalara neden olmaktadır.

IEC TR 50627:2016 teknik raporu, bu frekans aralığında çalışan sistemler arasında meydana gelen elektromanyetik girişimlerin detaylı bir analizini sunmakta ve özellikle aynı elektriksel ortamı paylaşan farklı cihazlar arasında oluşabilecek karşılıklı etkileşimleri kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Raporda belirtildiği üzere, supraharmonik bileşenlerin şebekedeki etkileri çoğunlukla gerilim kalitesi bozulması şeklinde ortaya çıkar. Bu bileşenler genellikle PWM anahtarlama frekansları ve bunların harmonikleri etrafında yoğunlaşmakta, bu da iletim ve dağıtım sistemlerinde klasik THD (Total Harmonic Distortion) analizlerinin ötesinde yeni bozulma türlerini gündeme getirmektedir. Şebeke empedansının frekansa

bağlı olarak değişmesi, belirli supraharmonik frekanslarda rezonans koşullarının oluşmasına neden olmakta, bu durum bazı frekans bileşenlerinin genliklerinin ciddi biçimde artarak yayılımını kolaylaştırmaktadır. Supraharmoniklerin yalnızca lokal cihazlar üzerinde etkili olmadığı, aynı zamanda komşu trafolar, dağıtım panoları ve hatta orta gerilim sistemlerine kadar yayılabildiği vurgulanmaktadır. Özellikle zayıf şebeke koşullarında bu yayılım daha belirgin hale gelmektedir.

Fabrika gibi endüstriyel tesislerde ise supraharmonik bileşenler hassas elektronik sistemlerde doğrudan istenmeyen yüksek frekanslı bileşenlere yol açabilir. Bu frekanslardaki bileşenler; sensörler, haberleşme hatları ve PLC sistemleri gibi düşük güçlü hassas cihazlarda ölçüm hataları, veri kayıpları ve kontrol algoritmalarında kararsızlık gibi sonuçlara neden olabilir. IEC TR 50627:2016 raporunun Ek B bölümünde bu etkiler ayrıntılı şekilde ele alınmış olup, sistemlerin elektromanyetik uyumluluğunu tehdit eden önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, supraharmonik bileşenler topraklama sistemleri üzerinden de yayılabilir; bu durum ortak topraklı sistemlerde potansiyel farklara ve buna bağlı olarak sistemsel EMC problemlerine yol açabilir.

Enerji kalitesinin izlenmesi amacıyla kullanılan analizör cihazlarının çoğu ise bu yüksek frekanslı bileşenleri algılamada yeterli bant genişliğine sahip değildir. Bu da enerji kalite raporlamalarında eksik ya da yanıltıcı verilerin oluşmasına neden olmakta, tesis yönetimi ve bakım planlamasında zafiyetler yaratmaktadır. IEC TR 50627:2016'nın 5.4 numaralı bölümünde bu ölçüm zorluklarına özel olarak yer verilmiş ve uygun ölçüm altyapısının gerekliliği vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, supraharmoniklerin gerek şebeke seviyesinde gerekse iç tesisat özelinde çok yönlü ve çoğu zaman öngörülmesi güç etkiler doğurduğu açıkça ortadadır. Bu nedenle IEC standartları çerçevesinde hem tasarım hem de işletme aşamalarında bu bileşenlerin dikkate alınması; uygun filtreleme, doğru anahtarlama stratejileri ve kararlılık analizleri ile sistem düzeyinde yönetilmesi büyük önem arz etmektedir.[2]

Supraharmoniklerin yüksek seviyelere ulaşması, hem evsel hem de endüstriyel birçok cihaz üzerinde istenmeyen etkiler yaratabilir. Bu etkiler genellikle elektromanyetik girişim (EMI) kaynaklıdır ve aşağıdaki örnekler Tablo 2 deki örnekler verilebilinir.[2]

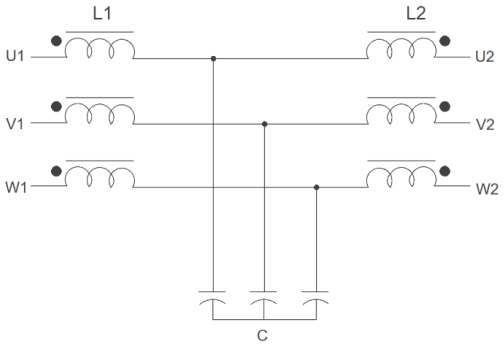
Etkilenen Cihaz/Sistem	**Etkisi**
Sokak Aydınlatmaları & Dokunmatik Dimmer Lambalar	İstenmeyen açılma/kapanma
Trafik Lambaları ve Kontrol Sistemleri	Yanlış sinyalizasyon
Elektrik Sayaçları (Katı Hal Tipi)	Yanlış tüketim değeri göstergesi
Demiryolu Kontrol Radyo Sistemleri	İletişim kesintileri
Ev Telefonları	Zilin hatalı çalması veya çalmaması
Isıtma Sistemleri	Sensör hataları nedeniyle yanlış alarm
Çamaşır Makineleri	Otomatik yeniden başlama
Elektronik Balastlı Aydınlatmalar	Duyulabilir istenmeyen ses oluşumu
Bilgisayarlar ve Lambalar	Duyulabilir istenmeyen ses oluşumu
TV ve Radyo Alıcıları	Ses ve görüntü kalitesinde bozulma
Anahtarsız Giriş Sistemleri	Hatalı çalışması
Doğrultucu DC Link Kapasitörleri	Ömür azalması
Zaman Sinyali Yayın Sistemleri (Saatler)	Yanlış zaman gösterimi
Amatör Radyo Sistemleri	Sinyal parazitleri

Tablo 2. EMI'nin 2 kHz - 150 kHz frekans aralığındaki ekipmana etkileri, Örnekler [2]

4. 37kW SERİ PASİF HARMONİK FİLTRE YAPISI:

3 fazlı 37kW, 400V, 50Hz Seri Pasif Filtre; 2 adet trifaze reaktörden ve 1 adet trifaze kondansatörden oluşur. Yüksek empedanslı L reaktörü seri, C kondansatörü paralel bağlanarak filtre devresi oluşturulur. Reaktör

ve kondansatör belirli bir frekans değerinde birbirlerine ayarlanırlar. Seri Pasif filtre ayar frekansındaki akımları soğurup, akım dalga formunu sinüzoidal akım dalga şekline yakınlaştırır. Seri Pasif filtrenin bağlantı şekli Şekil-6'da verilmiştir.



Şekil-6: Seri Pasif Harmonik Filtre Devre Şeması

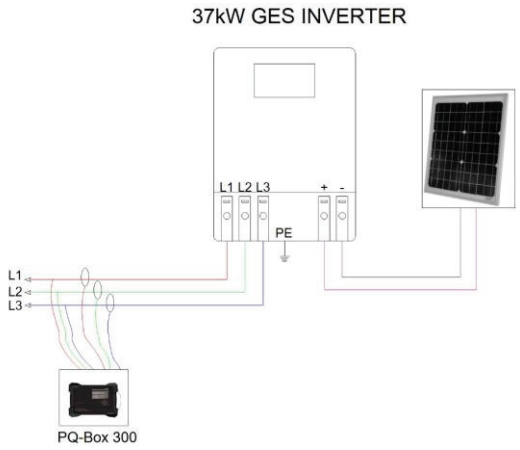


Şekil-7: Seri Pasif Harmonik Filtre [3]

5. TEST DÜZENEĞİ:

Çalışmada kullanılan test düzeneği, işletme bünyesinde kurulu bulunan 37 kW gücündeki çatı tipi güneş enerjisi santrali (GES) üzerine kurgulanmıştır. GES çıkışında gözlemlenen yüksek frekanslı gerilim bozulmalarının filtrelenmesi amacıyla, hedef frekansta çalışan seri pasif harmonik filtre uygulanmıştır. Ölçümler, A-class güç kalitesi ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Filtre uygulamasının etkisini değerlendirebilmek amacıyla ölçüm noktaları iki farklı senaryo için belirlenmiştir.

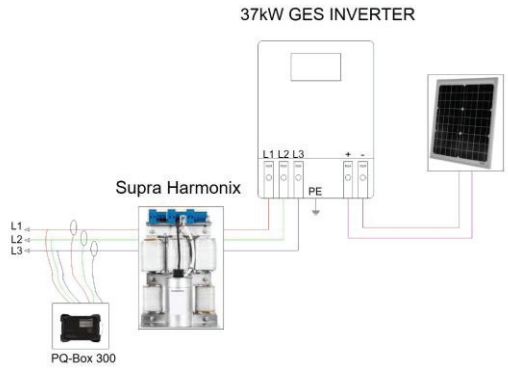
Şekil-8'de birinci test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil-8: Birinci Test Düzeneği

İlk durumda, sistem filtresiz çalışırken ölçüm GES çıkış noktasından alınmıştır. İkinci durumda ise filtre devreye alındıktan sonra, ölçüm noktası filtre çıkışı olarak seçilmiştir. Bu sayede filtreleme etkisi, aynı sistem koşullarında doğrudan karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil-9'da ikinci test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil-9: İkinci Test Düzeneği

6. BİRİNCİ TEST:

Birinci test senaryosunda sistem filtresiz durumda iken GES çıkış noktası üzerinden ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, A-class güç kalitesi ölçüm cihazı ile 1 tam gün boyunca kesintisiz olarak kaydedilmiştir. Ölçüm süresi boyunca özellikle 20 kHz civarında belirgin spektral içerik tespit edilmiş; bu frekans seviyesinde hem gerilim hem de akım bileşenlerinde, spektruma ters şekilde karakterize edilen harmonik bozulmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek frekanslı anahtarlamalardan kaynaklanan supraharmonik bileşenlerin sistemde etkin olduğunu ve sistem güç kalitesini olumsuz etkileyebilecek düzeyde

bulunduğunu göstermektedir. 20 kHz seviyesindeki spektruma ters olan akım ve gerilim harmoniklerine ait artış, Şekil-10'da yüksek frekanslı gerilim harmonikleri spektrumunda, Şekil-11'de yüksek frekanslı akım harmonikleri spektrumunda gösterilmiştir.

GES devredeyken, 20 kHz seviyesinde 1,5 V değerine kadar ulaşan gerilim harmonik bileşeni ile birlikte, 50 mA seviyelerine çıkan akım harmonik bileşeni tespit edilmiştir. Bu yüksek frekanslı bileşenlerin süreklilik göstermesi, yük karakteristiğinden bağımsız olarak GES kaynaklı bir supraharmonik yayılımın mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil-12'de 20kHz yüksek frekans seviyesinde gerilim harmoniği grafiği gösterilmiştir.

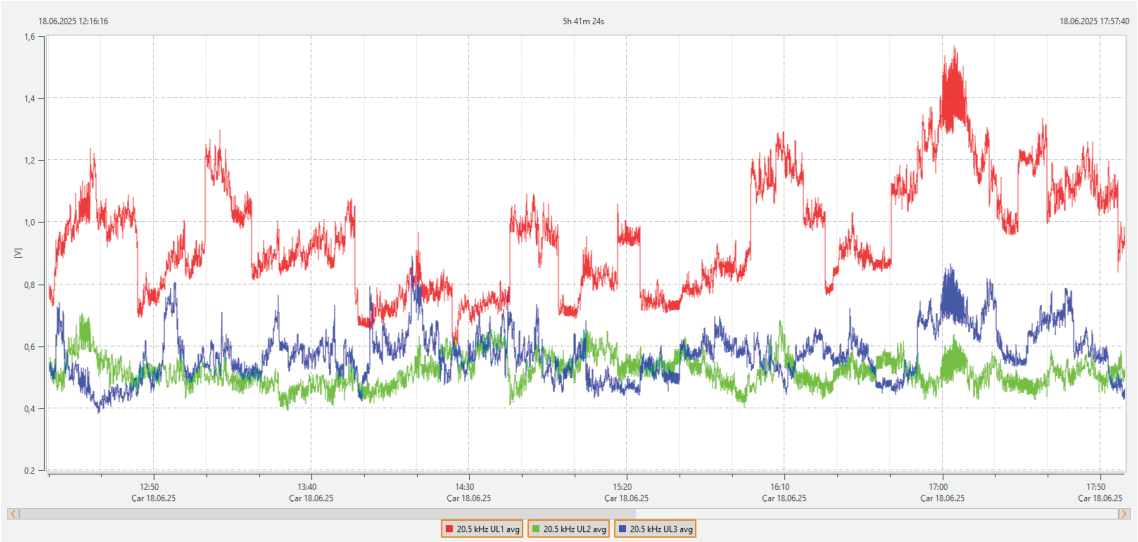
Şekil-13'te 20kHz yüksek frekans seviyesinde akım harmoniği grafiği gösterilmiştir.



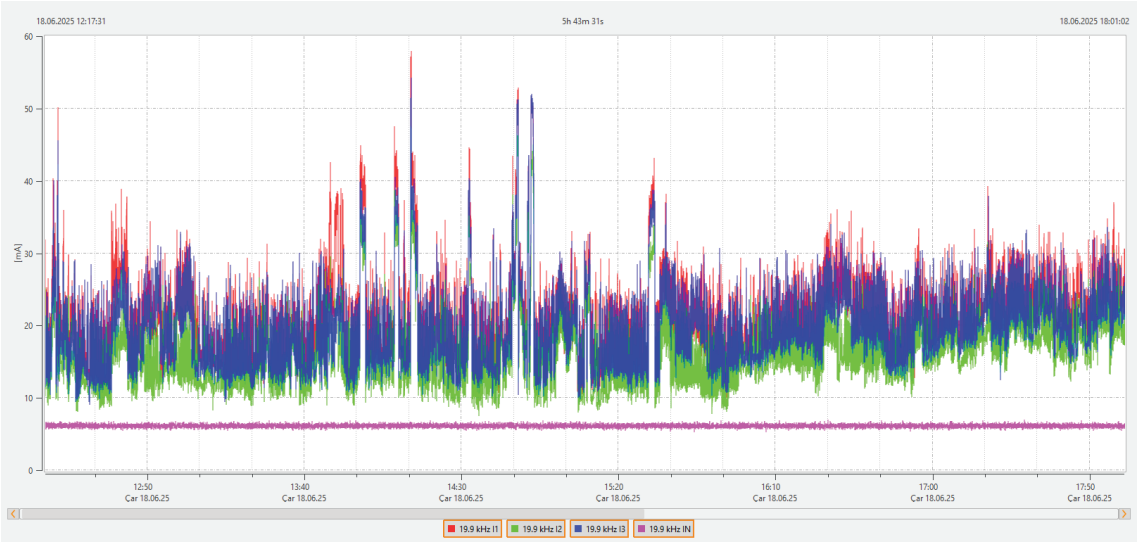
Şekil-10: Yüksek Frekanslı Gerilim Harmonikleri Spektrumu



Şekil-11: Yüksek Frekanslı Akım Harmonikleri Spektrumu



Şekil-12: 20kHz Seviyesi Gerilim Harmoniği Grafiği



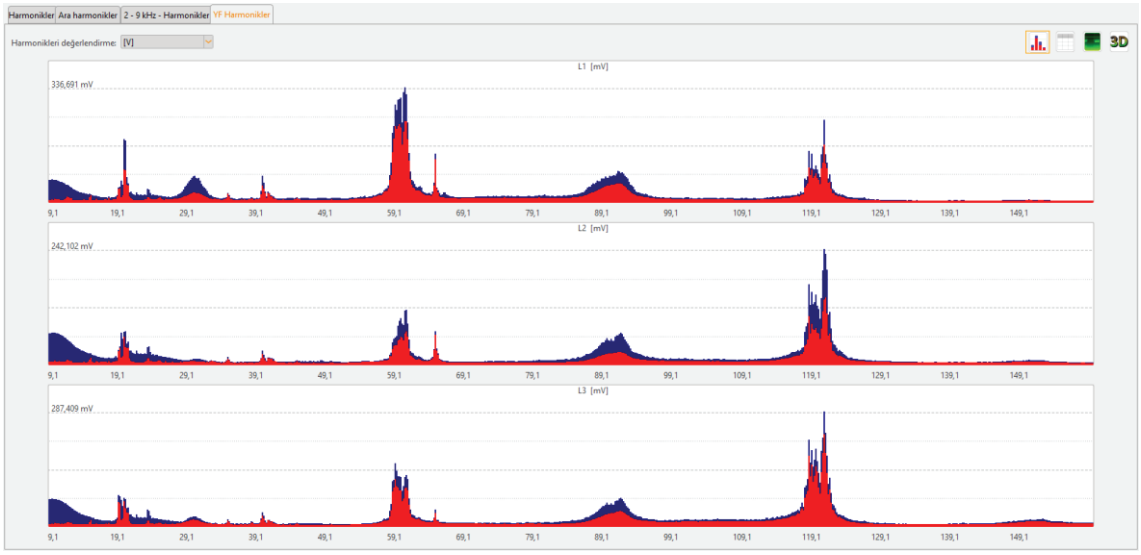
Şekil-13: 20kHz Seviyesi Akım Harmoniği Grafiği

7. İKİNCİ TEST:

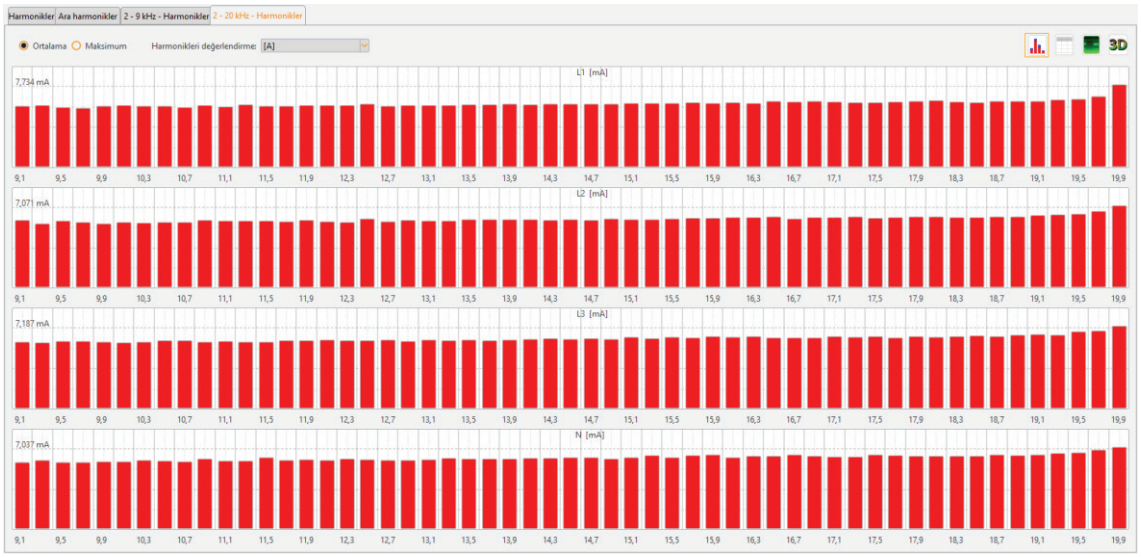
İkinci test senaryosunda sistem, seri pasif harmonik filtre devrede olacak şekilde çalıştırılmış ve ölçümler bu kez filtre çıkış noktasından alınmıştır. Ölçüm süresi, birinci testte olduğu gibi güç kalitesi ölçüm cihazı ile 24 saat boyunca kesintisiz olarak gerçekleştirilmiştir. Filtrenin devreye alınmasıyla birlikte 20 kHz bandındaki yüksek frekanslı bozulmaların önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Gerilim ve akım spektrumları, filtreleme etkisinin doğrudan görülebileceği şekilde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. 20 kHz seviyesindeki harmoniklerin filtrelenmesi sonucunda, özellikle bu frekansta oluşan bozulmaların filtre tarafından etkin biçimde süzüldüğü değerlendirilmiştir. İlgili spektral değişim aşağıda Şekil-14'te yüksek frekanslı gerilim harmonikleri spektrumunda, Şekil-15'te yüksek frekanslı akım harmonikleri spektrumunda sunulmuştur.

GES devredeyken, 20 kHz seviyesindeki gerilim harmonik bileşeni 100 mV seviyesine kadar düşmüş; akım harmonik bileşeni ise 6–7 mA aralığına inmiştir. Bu değerler, filtre uygulamasının hem gerilim hem de akım spektrumunda ciddi bir iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır. Filtreleme sonrasında sistemdeki supraharmonik seviyeler, sınır değerlerin altına çekilmiş ve dağıtım ağına yayılan yüksek frekanslı bozucu etkiler etkin bir şekilde filtrelenmiştir. Şekil-16'da 20kHz yüksek frekans seviyesinde gerilim harmoniği grafiği gösterilmiştir.

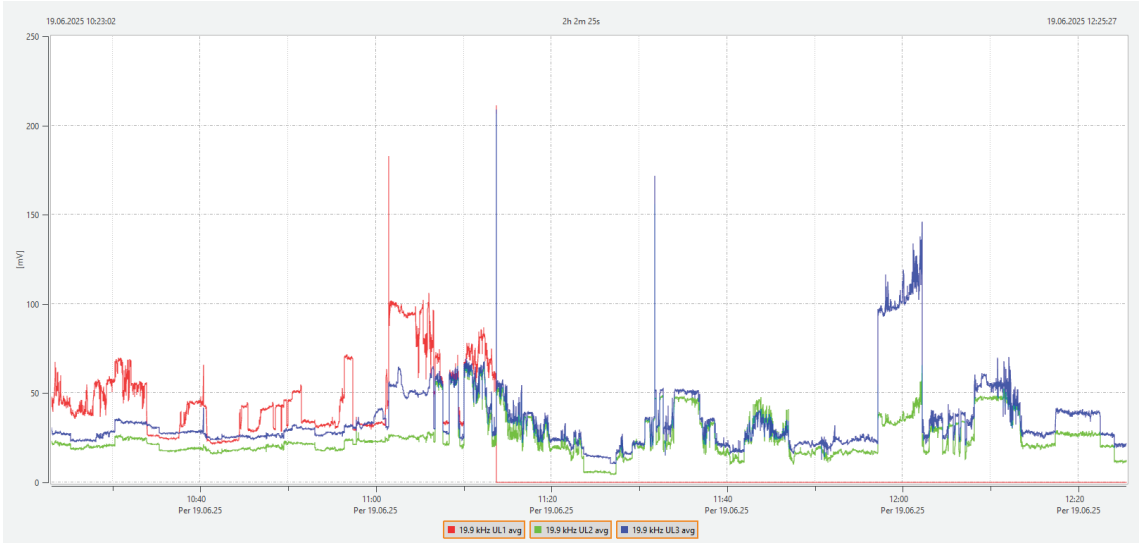
Şekil-17'de 20kHz yüksek frekans seviyesinde akım harmoniği grafiği gösterilmiştir.



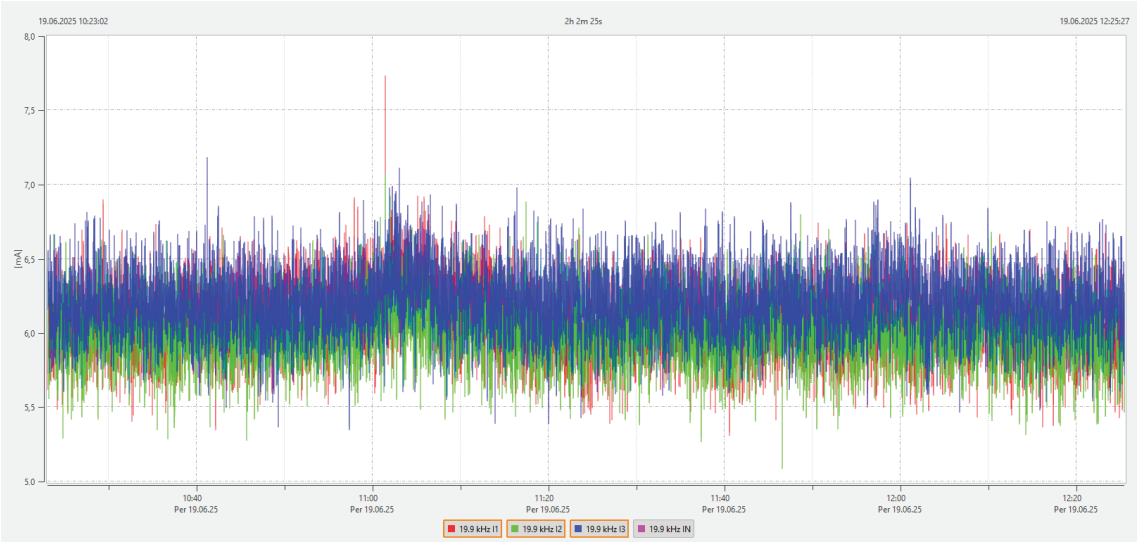
Şekil-14: Yüksek Frekanslı Gerilim Harmonikleri Spektrumu



Şekil-15: Yüksek Frekanslı Akım Harmonikleri Spektrumu



Şekil-16: 20kHz Seviyesi Gerilim Harmoniği Grafiği



Şekil-17: 20kHz Seviyesi Akım Harmoniği Grafiği

8. SONUÇ

Yapılan testler sonucunda, seri pasif harmonik filtrenin GES çıkışında oluşan supraharmoniklerin etkin şekilde filtrelendiği ve sistemde gözlemlenen yüksek frekanslı gerilim ile akım bozulmalarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Filtre uygulaması sayesinde, GES'in şebekeye yayılan supraharmonik etkileri minimize edilmiş, böylece güç kalitesi belirgin biçimde iyileştirilmiştir. Bu durum, hem ekipmanların korunması hem de şebeke kararlılığının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, seri pasif harmonik filtreler, GES kaynaklı supraharmoniklerin olumsuz etkilerinden korunmak ve güç kalitesini artırmak için etkili ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

KAYNAKLAR:

[1] IEC TS 62578:2015. Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz". International Electrotechnical Commission.

[2] IEC TR 50627:2016. Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150 kHz Ed. 2

[3] Ergun Elektrik, Ürün kataloğu, https://ergunelektrik.com/wp-content/uploads/2023/04/ergun-elektrik-katalog_TR_2023-min.pdf

Antalya İli Elmalı İlçesinde Güneş Enerjili Dağıtık Üretimin Şebeke Stabilitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Eren ALPASLAN[1], Ahmet Y. YOLDAŞ[1], Kayhan ATEŞ[1], Şükrü ÖZEN[1]

[1]Akdeniz Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Dumlupınar Bulvarı Konyaaltı, Antalya
[2] TEİAŞ Genel Müdürlüğü, 19. Bölge Müdürlüğü, Tesis ve Kontrol Müdürlüğü, Antalya, Türkiye

alpaslaneren1402@gmail.com, ahmetyoldas@gmail.com
kayhanates@akdeniz.edu.tr, sukruozen@akdeniz.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Antalya ili Elmalı ilçesindeki elektrik iletim sistemine ait 154 kV ve 31,5 kV baraları ile bu baralara bağlı fiderler, DIgSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modelde, özellikle 50 MW kurulu güce sahip Özaltın güneş enerji santralinin sisteme entegrasyonu ve şebeke dinamiklerine etkileri ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, sistemde meydana gelebilecek arıza veya planlı bakım gibi olağanüstü durumlarda yük akışı ve geçici kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Geçici kararlılık analizinde, özellikle kısa devre gibi ani olaylar sonucunda sistemdeki frekans değişimleri ve baralardaki gerilim profilleri zamana bağlı olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca, 154 kV'lik baranın tamamen devre dışı kalması durumu incelenmiştir. Bu durumda, 31,5 kV seviyesindeki fiderlerin kendi başlarına sistem yükünü karşılayıp karşılayamayacağı ve adalanma koşullarında şebeke istikrarı değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, sistemin farklı senaryolarda gösterdiği davranışları analiz etme imkânı sunmuş ve olası risklerin öngörülmesine katkı sağlamıştır. Bu kapsamda, elde edilen bulgular ile hem yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda hem de şebeke güvenilirliğinin sağlanmasında dikkat edilmesi gereken kritik noktalar vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda, Antalya ili Elmalı ilçesinde şebekede meydana gelebilecek bir arıza durumunda dahi kurulu güneş enerjisi santralinin maksimum %70'lik doluluk oranıyla bölgeye yetebileceğini göstermiş ve çalışma hedefini doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç ve enerji sistem modellemesi, Geçici kararlılık analizi, GES entegrasyonu, Dağıtım şebekesi, Yenilenebilir enerji

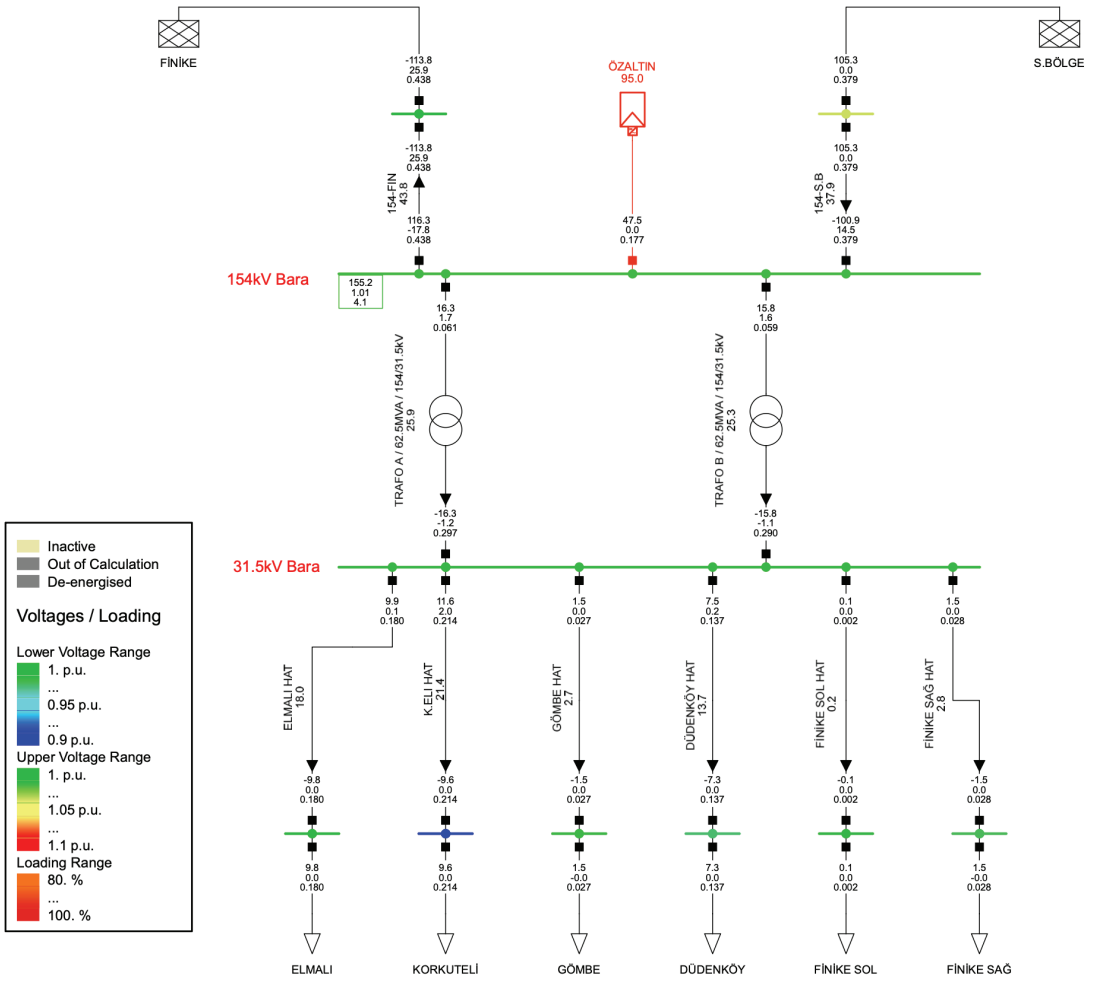
1. GİRİŞ

Günümüzde karmaşıklaşan modern enerji altyapıları karşısında, elektrik güç sistemlerinde sürdürülebilirlik, süreklilik ve şebeke istikrarının sağlanması temel bir zorunluluk haline gelmiştir. Artan enerji talebi, iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve merkezî şebekelerin dinamik zafiyetleri, iletim ve dağıtım sistemlerinde yeni risk alanları ve optimizasyon ihtiyaçlarını doğurmuştur [1]. Özellikle, güneş enerji santralleri (GES) gibi dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye entegrasyonu, yalnızca yük akışı dengesi açısından değil, aynı zamanda sistemin olağanüstü koşullara (geçici kararlılık durumları, ani arızalar, planlı bakım süreçleri gibi) tepkisinin bilimsel olarak analiz edilmesini de zorunlu kılmaktadır [2].

Son yıllarda meydana gelen geniş kapsamlı elektrik kesintileri, sistem stabilitesinin ve bölgesel üretim kaynaklarının kritik rolünü gözler önüne sermiştir. 28 Nisan 2025 tarihinde İspanya'da yaşanan ve Batı Avrupa'yı etkileyen elektrik kesintisi, merkezî şebekelerin ani ve beklenmedik arızalara karşı kırılgan olabileceğini göstermiştir [3]. Benzer şekilde, 31 Mart 2015'te Türkiye genelinde gerçekleşen büyük kesintide [4] iletim ve dağıtım altyapısında bölgesel üretim ve yeterli yedekleme stratejilerinin eksikliğini ortaya koymuştur. Bu tür olaylar, gelecekte şebeke güvenilirliğinin artırılması için yalnızca merkezî üretime değil, aynı zamanda bölgesel ve dağıtık enerji kaynaklarına dayalı yeni işletmelerin ve acil durum planlarının geliştirilmesi ihtiyacı doğurmaktadır.

Bu bağlamda Antalya ili Elmalı ilçesi, sahip olduğu 154 kV ve 31,5 kV baraları, bu baralara bağlı çeşitli fiderleri ve 50 MW kurulu güce sahip Özaltın Güneş Enerji Santrali ile, modern dağıtık üretim entegrasyonu ve bölgesel şebeke stabilitesi açısından özgün bir model sunmaktadır. Şekil 1'de de görüldüğü üzere, 154 kV bara, bölgenin ana enerji geçiş noktası olarak kritik bir işlev görürken 31,5 kV bara ve fiderler ise dağıtım şebekesinin esnekliğini ve yedekleme kapasitesini belirleyen kilit unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Söz konusu altyapının teknik analizinde, farklı yük akışı ve geçici kararlılık analiz senaryolarının modellenmesiyle, özellikle 154 kV baranın tamamen devre dışı kalması gibi olağanüstü durumlarda

31,5 kV seviyesindeki fiderlerin "adalanma



Şekil 1. Elmalı Mevcut Şebeke Modellemesi (154kV ve 31,5kV Baralar)

(islanding)" koşullarında bölgesel yükleri stabilitesi bozulmadan karşılayabilme kapasitesi ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. [5] Adalanma, şebekeye bağlı bir üretim kaynağının (Güneş santrali, rüzgar santrali vb.) şebekedeki bir kesinti veya ayrılma, kopma durumunda bulunduğu bölgeye enerji vermeye devam etmesi durumuna denir [6]. Bu çalışmada, DIgSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak Antalya ili Elmalı ilçesinin şebekesi dinamik olarak modellenmiş; normal işletmeden arıza ve planlı bakım durumlarına, adalanma senaryolarından GES'in aktif katkısına kadar geniş bir

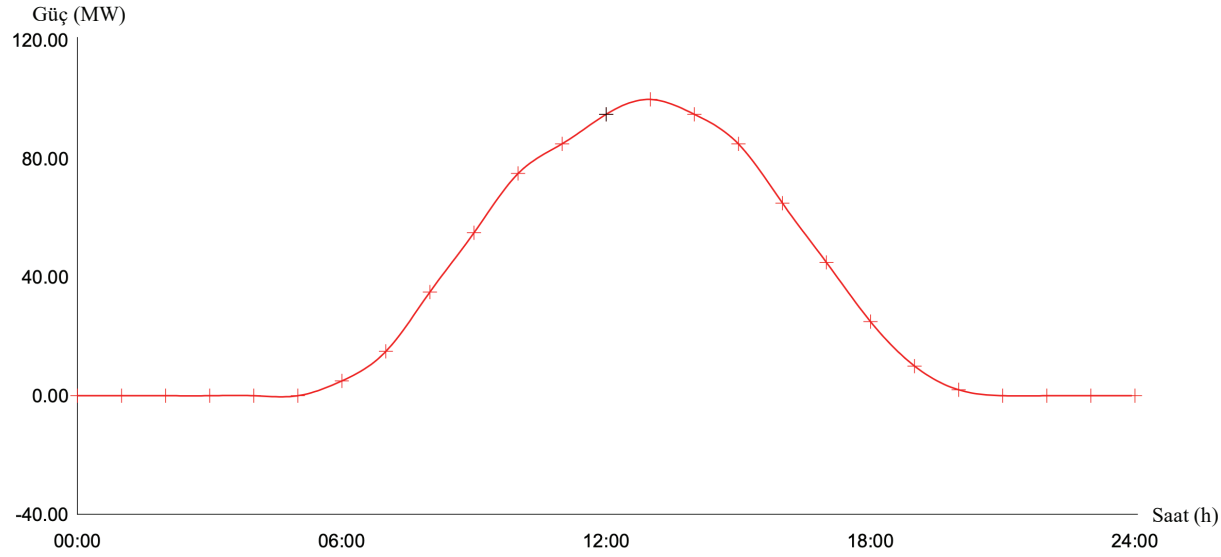
yelpazede yük akışı, geçici kararlılık analizi ve frekans kararlılığı ayrıntılı olarak incelenmiştir. [7] Elde edilen bulgular, ana şebekeden kopma durumunda dahi yeterli kapasitedeki GES ve bölgesel üretim altyapısı ile elektrik arzının sürdürülebilirliğinin sağlanabileceğini ve sistem stabilitesinin korunabileceğini göstermektedir. Böylelikle Elmalı bölgesi, yalnızca ulusal değil, uluslararası literatürde de yenilenebilir enerji entegrasyonuna dayalı dağıtık üretim modellerinin ve kriz yönetimi senaryolarının uygulanabilirliği açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Çalışmanın gidişatı şu şekilde planlanmıştır. Öncelikle gerçekçi değerlere göre simülasyon benzetim senaryosu oluşturulmuştur. Bu kapsamda, Elmalı'nın yük akış modelleri oluşturulmuştur. Ardından şebeke ve yük profilleri modellenerek durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu sonuçları ve durum analizleri, sonraki bölümde sunulmuştur ve tartışılmıştır. Son bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Antalya ili Elmalı ilçesindeki güneş enerjisi santrallerinin (GES) bölgesel şebeke stabilitesine katkısı, DIgSILENT PowerFactory 2024 yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmanın yöntemi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

2.1 Veri Toplama ve Hazırlama

Elmalı bölgesine ait saatlik güneş radyasyonu verileri PVGIS (Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi) [8] üzerinden elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, güneş panellerinin saatlik verim oranları hesaplanmıştır. Panel verimlilikleri hesaplanırken standart koşullarda %20 verim oranına sahip paneller baz alınmıştır. Şekil 2'de gösterilen grafikte bir güneş panelinin saatlere göre verimi grafikleştirilmiş ve DIgSILENT üzerinden modellenmiştir.



Şekil 2. PV Modül Verimlilik Grafiği (Saatlere göre (24h))

2.2 Elmalı GES Santrali Modelleme

PowerFactory yazılımında Elmalı ilçesinde mevcut olan ve toplam 50 MW kurulu güce sahip GES santrali gerçekçi bir şekilde modellenmiştir. Bu aşamada, GES üretim kapasiteleri saatlik güneş radyasyonu ve panel verimlilikleri kullanılarak belirlenmiştir. GES, trafo, fiderler ve diğer gerekli şebeke bağlantı elemanları ile birlikte oluşturulmuştur.

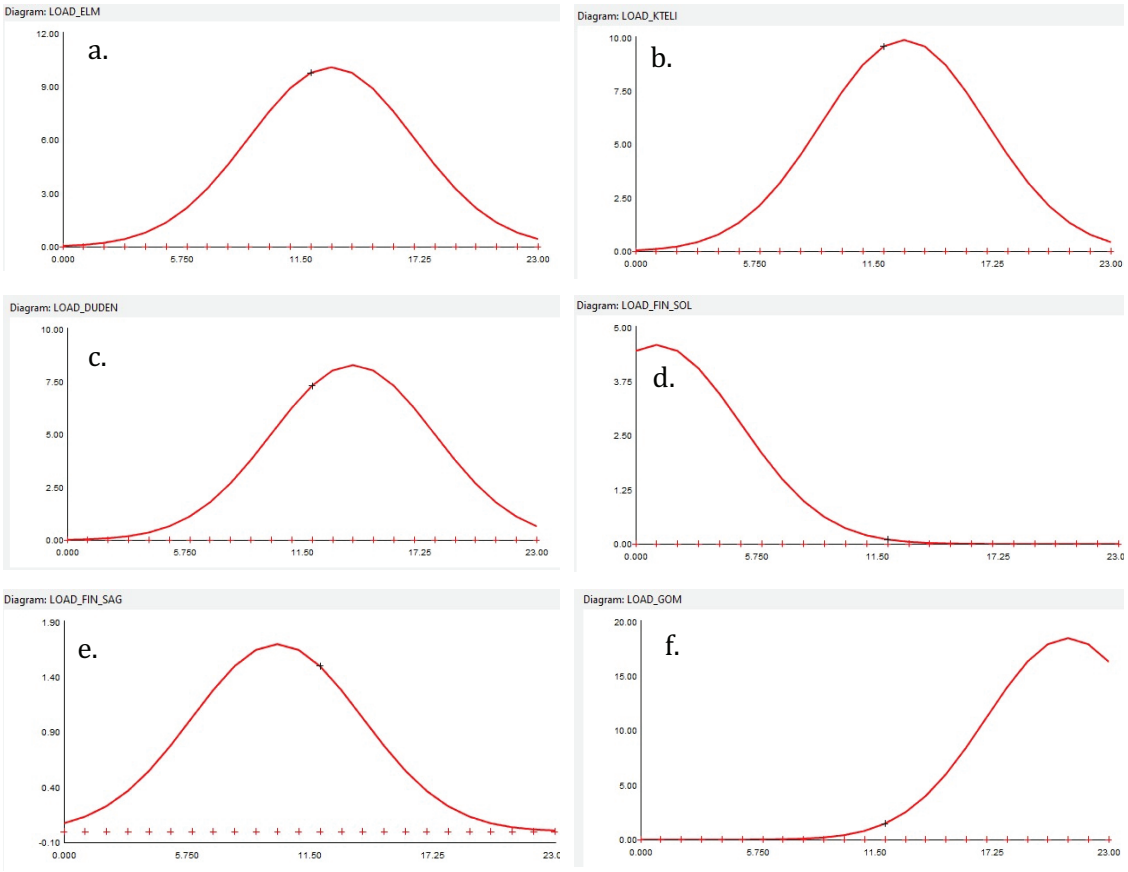
3. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Elmalı bölgesi için gerçekçi veriler kullanılarak şebeke yapısı oluşturulmuştur. Bu yapıda 154 kV gerilim seviyesindeki Serbest Bölge ve Finike fiderleri ile 31,5 kV seviyesindeki Elmalı, Korkuteli, Gömbe, Düdenköy, Finike Sol ve Finike Sağ fiderleri modellenmiştir. Saatlik tüketim profilleri oluşturularak, özellikle maksimum puant değerleri dikkate alınmıştır. Fiderler ve anlık yükleri aşağıdaki şekillerde belirtilmiştir.

3.1 Senaryo Analizleri

Çalışmada farklı işletme senaryoları oluşturulmuştur:

- **Normal İşletme Durumu:** Tüm 154 kV ve 31,5 kV fiderlerinin normal çalıştığı durumda, saatlik güç akışları modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu saatler tüketimin zirve (peak) yapılan genel saatler olan 12.00, 14.00 ve 16.00 saatlerinde incelenmiştir.



Şekil 3. a. Elmalı Fideri Günlük Ortalama Yük Grafiği (Sol Sütun P (MW), Sağ Sütun Saat (h)) b. Korkuteli Fideri Günlük Ortalama Yük Grafiği c. Düdenköy Fideri Günlük Ortalama Yük Grafiği d. Finike Sol Fideri Günlük Ortalama Yük Grafiği e. Finike Sağ Fideri Günlük Ortalama Yük Grafiği f. Gömbe Fideri Günlük Ortalama Yük Grafiği

- **154 kV Fiderleri Devre Dışı Senaryosu:** Özellikle Türkiye 2015 ve İspanya 2025 elektrik kesilmesi olayları referans alınarak, 154 kV Antalya Serbest Bölge ve Finike fiderlerinin devre dışı kaldığı durum incelenmiştir. Bu senaryoda, Elmalı ilçesindeki 50 MW kurulu güce sahip GES'in 31,5 kV seviyesindeki Elmalı ve çevresindeki diğer fiderlerin enerji talepleri değerlendirildi.
- **Yerel Arıza (Fault) Durumları:** Yıldırım düşmesi, bakım çalışmaları gibi yerel arızaların ve devre dışı eleman etkisi simüle edilmiş ve bu durumlarda şebeke stabilitesi üzerinde mevcut GES'in etkisi analiz edilmiştir.

Tablo 1. Elmalı Saat 08.00 Grid GES Yük ve Fider Gerilim Değerleri

Elmalı, Finike ve Serbest Bölge fiderleri aktif haldeyken			
Saat	**50MW GES Yüklenme (%)**	**154kV Ana Bara Gerilim (V)**	**31,5kV Ana Bara Gerilim (V)**
08.00	17,5 MW (%35)	155,2kV	31,7kV
10.00	37,5 MW (%70)	155,4kV	31,7kV
12.00	47,5 MW (%95)	155,2kV	31,7kV
14.00	47,5 MW (%95)	155,1kV	31,6kV
16.00	32,5 MW (%65)	154,9kV	31,6kV
18.00	12,5 MW (%25)	154,4kV	31,5kV
Elmalı, Finike ve Serbest Bölge fiderleri servis dışı			
08.00	14,9 MW (%29,8)	154kV	31,5kV
10.00	23,9 MW (%47,9)	154kV	31,5kV
12.00	32,2 MW (%64,7)	154kV	31,4kV
14.00	35,3 MW (%71)	154kV	31,4kV
16.00	33,6 MW (%67,5)	154kV	31,4kV
18.00	31,4 MW (%63,3)	154kV	31,4kV

4. SONUÇ

Bu çalışma, DIgSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak güncel yük ve üretim verileri ile oluşturulan detaylı model üzerinden yapılan dinamik simülasyon ve analizler, Antalya'nın Elmalı ilçesinde kurulu bulunan 50 MW kapasiteli GES'in bölgesel şebekede yaşanabilecek ciddi arıza ve kesinti durumlarında dahi sistemin kendi yük talebini tamamen karşılayabilecek kapasitede olduğunu göstermiştir. Senarya analizleri, sistem enterkonnekte durumda iken yük artışına bağlı olarak 154kV bara geriliminde ±%0,8, 31,5kV bara geriliminde ±%0,95 aralığında değişim gözlemlenmiş; ada modunda ise frekans sapmasının maksimum ±%0,12 (±0,06Hz) seviyesinde kaldığını göstermiştir. Ayrıca, ada modunda GES

katkısıyla frekans toparlanma süresinin %15 oranında kısaldığı belirlenmiştir. Bu durum, GES'in hem gerilim seviyesinin korunmasında, hem de frekans kararlılığına anlamlı bir katkı sunduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, yapılan senaryo çalışmaları ve duyarlılık analizleri, sistemin yerel enerji talebini karşılamanın yanı sıra üretim fazlası enerjiyi şebeke dışına aktarabilme potansiyeline sahip olduğunu da ortaya koymuştur. Günümüzde, güç sistemlerinde manyetik alanların [9] ve yıldırım kaynaklı dağıtım hattı arızalarının [10] da etkili olabileceği gibi aşırı yüklenme gibi durumlarda da sistemlerde meydana gelen arızalar karşımıza çıkmaktadır. Özellikle son yıllarda yaşanan geniş çaplı enerji kesintileri (örneğin Türkiye, 2015 ve İspanya, 2025) ve günümüzde devam eden çeşitli çatışma bölgelerinde enerji üretim tesislerinin hedef alınarak enerji arz güvenliğinin ciddi biçimde tehdit edilmesi, yerel olarak kendi kendine yetebilen ve bağımsız çalışabilme kabiliyeti olan dağıtık enerji sistemlerinin önemini daha da artırmıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında, Elmalı'daki dağıtık güneş enerjisi santralinin şebeke stabilitesi, enerji arz güvenliği ve sürdürülebilir enerji politikaları bağlamında kritik bir role sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elmalı örneğinde olduğu gibi, GES destekli dağıtık üretim altyapıları bölgesel enerji arz güvenliğini ve stabilitesini artırmaktadır. Bundan dolayı benzer modellemeler farklı bölgeler için, bölge şartlarına uygun yapılmalı ve Türkiye genelinde mikro şebeke odaklı dağıtık üretim stratejileri geliştirilmelidir. Ada tespiti, tasarımı, hızlı yeniden senkronizasyon, otomatik yük atma sistemleri ile desteklemek önemli bir rol oynayacaktır. Ayrıca, bu sistemler kritik noktalarda da önemli rol oynayacaktır. Bu doğrultuda Türkiye genelinde uygulanabilecek öneriler:

1. **Mikro Şebeke Odaklı Planlama:**

Bölgesel GES + depolama + hızlı senkronizasyon sistemleri ile kritik bölgelerde mikro şebekeler tasarlamak (Stratejik noktalar, sağlık merkezleri vb.).

2. **Ulusal Kriz Planına Entegrasyon:**

2015 Türkiye ve 2025 İspanya kesintilerinden elde edilen dersler doğrultusunda, dağıtık üretim

senaryolarının ulusal afet yönetim planlarına dahil edilmesi.

3. Yapay Zeka Destekli Tahmin

PVGIS ve meteorolojik veriler ile entegrasyonun sağlanması doğrultusunda iİlerleyen dönemlerde, yapay zeka tabanlı kısa vadeli GES üretim tahmin modelleri geliştirilerek DIgSILENT vb. yazılımlarla tümleşik olarak çalıştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Bollen, M. H. J., & Hassan, F. (2011). *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Wiley-IEEE Press.

[2] Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine, 5*(4), 78–94. https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583

[3] Reuters. (2025, April 28). Spain suffers major blackout as grid collapses: causes and consequences. *Reuters*. https://www.reuters.com/world/europe/spain-suffers-major-blackout-april-28-2025-2025-04-28/

[4] Müderrisoğlu, S., & Erdoğmuş, Ş. (2015). 31 Mart 2015 Türkiye elektrik kesintisinin değerlendirilmesi. *Journal of ETA Maritime Science, 3*(2), 131-140. https://doi.org/10.5505/jems.2015.46392

[5] Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.

[6] Aladağ, C., & Orhan, A. (2016). *Fotovoltaik panellerin senkron jeneratör ile kullanımı* [PDF]. Elektrik Mühendisleri Odası. https://www.emo.org.tr/ekler/bb191ddacf13f50_ek.pdf

[7] IEEE. (2018). *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces* (IEEE Standard 1547-2018). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112

[8] European Commission Joint Research Centre. (2025). PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System [Data set]. Retrieved from https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

[9] Bedeloğlu M., Ateş K., Özen Ş., Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components, *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 194, Issue 1, March 2021, Pages 57–64, https://doi.org/10.1093/rpd/ncab070

[10] Yoldaş, A.Y., Carlak, H.F., Özen, Ş., (2025). Yıldırım Kaynaklı Enerji İletim Hattı Arıza Sebeplerinin İzolatör Boyu ve Topraklama Direnci Açısından Sınır Değerlerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 286-305.

PETROKİMYA TESİSLERİNDE MCC PANEL MODERNİZASYONU

Fatih ABANOZ[1]
[1]Socar Türkiye Petkim Petrokimya Tesisleri, Aliağa, İzmir
[1]fatih.abanoz@socar.com.tr

ÖZET: Petrokimya ve rafineri komplekslerinde 30–40 yıllık alçak gerilim (A.G.) motor kontrol merkezleri (MCC) artan arıza sıklığı, selektivite ve koruma koordinasyonu yetersizlikleri, yedek parça bulunabilirliği, güncel ark-flaş (arc-flash) gerekliliklerine uyumsuzluk ve izleme/raporlama eksikliği nedeniyle işletme ve iş sağlığı–güvenliği açısından kritik riskler oluşturmaktadır. Bu çalışma, Petkim Petrokimya Tesisleri'nde Ex olmayan şalt odalarında bulunan ve sahadaki Ex ve Non-Ex bölgelerinde yer alan yükleri de besleyen MCC'lerin; IEC 61439 ve IEC/TR 61641'e uygun, Icw/Ipk değerleri kısa devre hesapları ile güncellenmiş, çekmeceli ve dijital yeni nesil MCC'lerle kademeli olarak yenilenmesi yaklaşımını sunar. Çözüm kapsamında akıllı kesiciler, motor koruma röleleri, enerji ölçüm ve güç analiz cihazları, sıcaklık sensörleri ve DCS/SCADA entegrasyonu devreye alınmış; LOTO/kilitleme(interlock) uygulamaları, uzaktan açma–kapama ve ark-flaş azaltma fonksiyonları ile güvenlik katsayısı güçlendirilmiştir. Turnaround dönemlerinde yürütülen projelerde 500'ün üzerinde çekmece ve 50'nin üzerinde pano değiştirilmiş; MTBF, MTTR, duruş saatleri, arıza sayısı, bakım maliyeti, THD ve IEEE 1584'e göre olay enerjisi gibi metriklerle önce/sonra kıyaslamaları yapılmıştır. Sonuçlar; planlanmamış duruş ve bakım maliyetlerinde belirgin azalma, güvenlik performansında artış ve enerji görünürlüğünde iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler— MCC, IEC 61439, IEC/TR 61641, IEEE 1584, çekmeceli pano, petrokimya, dijitalleşme, SCADA, selektivite, LOTO.

GİRİŞ

Alçak gerilim MCC'ler; pompalar, fanlar, kompresörler, karıştırıcılar ve çeşitli proses yardımcı ekipmanlarının devreye alma, koruma ve kontrolünü sağlayarak tesisin kesintisiz işletimini mümkün kılar. Petrokimya ve rafineri gibi sürekli üretim yapılan endüstrilerde MCC güvenilirliği, üretim sürekliliği ve İSG performansının belirleyici unsurlarındandır.

Petkim Petrokimya Tesisleri bünyesinde farklı yıllarda kurulan ünitelerdeki MCC'ler şalt odalarında (Ex olmayan) konumlanmaktadır ancak bu panoların bir bölümü Ex sınıfındaki motor ve saha dağıtım panolarını (normal-acil aydınlatma,kaynak/priz besleme ve proses kaynaklı besleme panoları) da beslemektedir. Bu nedenle MCC tasarımındaki her iyileştirme, yalnızca elektrik güvenilirliğini değil, tüm proses güvenliğini ve görünürlüğünü etkiler.

ARKA PLAN VE LİTERATÜR

IEC 61439-2, alçak gerilim panolarında tip test yaklaşımını netleştirerek ısınma, dielektrik dayanım, kısa devre dayanımı, IP derecesi ve mekanik dayanım gibi bütüncül gereklilikler getirmiştir. IEC/TR 61641, iç ark koşullarında panonun davranışını değerlendirmek üzere bir rehber sunar. IEEE 1584 ise ark flaş olay enerjisinin hesaplanması ve çalışan güvenliğinin planlanması için yöntembilim sağlar. NFPA 70E, pratik iş güvenliği uygulamaları ve kişisel koruyucu donanım malzemeleri seçimi için tamamlayıcı standarttır.

1980–1990'ların MCC tasarımlarında ölçüm ve olay kaydı sınırlıyken; güncel tasarımlar akıllı cihazlar, haberleşme ve uzaktan kumanda ile işletme-bakım

döngüsünü kökten değiştirmiştir. Literatürlerde adı geçen çekmeceli mimarinin ortalama bakım / onarım süresini düşürdüğü, selektivite—bölgesel seçiçilik kilitlemesi (ZSI:Zone Selectivity Interlocking) uygulamalarının yayılım arızalarını engellediği ve arc-flash bakım modlarının olay enerjisini anlamlı biçimde azalttığı gözlemlenmiştir.

MEVCUT DURUM VE RİSK ANALİZİ

Petkim içindeki tesislere genel olarak bakıldığında mevcut durum ve risk analizini ekipman bazlı donanımsal, buna karşılık operasyonel etkiler ve iş sağlığı ve güvenliği (ISG) gibi temel kapsamda değerlendirebilir.

Donanım: Mevcut durumdaki MCC'lerin önemli bir bölümü Petkim içindeki tesislerin kuruluşundan bu yana yaklaşık 30–40 yaşındadır; üniteler daha çok proses ağırlıklı olduğundan çoğunlukla çekmece bazlı yapıdadır ancak kısmen bazı ünitelerde ise sabit tip de bulunmaktadır. Toz ve suya karşılık koruma olarak kabul edilen (Ingress protection) mevcut durumlardaki çekmecelerde bir hayli yüksek olmasına rağmen zaman içerisinde panel kapağı fitillerindeki, kablo geçişlerinde kullanılan malzemelerinin kalite ve işlevsellik yönünden bozulmaları, çekmece sürgü toleranslarının kabul edilen şartlara göre daha çok kötüleşmesi, kilitleme mekanizmalarının zaman içerisinde hasar görmesi, zaman içerisinde tozlanma, korozyon ve bakım zamanlarında olası gevşek bağlantıların yaşanması gibi mekaniksel problemlerden ötürü IP seviyelerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bazı tesislerde trafo gücü, dağıtım topolojisindeki farklılıklar, tesise ait yüklerin karakteristiği, güç bazında sahip olmuş olduğu özellikler de düşünülerek tesisler genelinde kabul edilen kısa devre dayanımı tipik 50–60 kA şeklindedir. Zaman içinde yük ekleme/çıkarma nedeniyle selektivite ayarlarının güncelliği ve dokümantasyon güncelleme sürekliliği yer yer eksik kalmıştır. Bu durum sonucunda zayıf halka analizindeki en yüksek olay akımı noktaları ve en düşük açma süresinin hesaplamalarının gereksinimini de ortaya çıkarmaktadır.
Dokümantasyon olgunluğu adına ise tesislerin çok uzun süreli işletilmesi esnasında iptal edilen yerine yenisi eklenen yüklerin etkisiyle oluşturulan as-built çizimlerinin güncel olma oranı, etiketleme standardı ve kablo listelerinin doğruluğu konusunda da birtakım eksiklikler tespit edilmiştir.

Operasyonel etkiler: Arıza sıklığı ve onarım süresi artmış; tesis bazlı kritik yük olarak düşünülen pompa, kompresör, reaktör ısıtıcıları vs. devre dışı kaldığında zincir etkisi oluşturup tipik üretim kayıplarına yol açmaktadır. Bundan ötürü planlanmamış duruşlar ekonomik kayıplara yol açmıştır. Ayrıca mevcut durumda geçici by-pass etme sınırlılıklarının fazla olması, esnek olamaması ve beraberinde ise çeşitli riskleri oluşturmaktadır. DCS/SCADA entegrasyonu sınırlı olduğundan olay—kayıt—analiz döngüsü zayıf kalmış, yedek parça ve mekanik uyumsuzluklar bakım süreçlerini uzatmıştır.

İSG: IEEE 1584'e göre yapılan ön değerlendirmeler, özellikle ana baralar, kuplaj hücreleri ve yüksek kısa devre akımına maruz kalan besleyici kademelerinde olay enerjisi (incident energy) değerlerinin yer yer yüksek seviyelerde olabileceğini göstermektedir. Bu durum, normal işletme ve bakım faaliyetleri sırasında çalışanların ark-flaş tehlikesine maruziyet olasılığını artırır. Mevcut MCC'lerde uzaktan kumanda / kontrol/manevra olanaklarının sınırlı olması; açma–kapama, test veya devreye alma gibi işlemlerin ekipman önünde,

kapaklar kapalı olsa dahi yakın mesafeden yapılmasını gerektirmekte, böylece çalışma mesafesi kısaldığı için maruz kalınabilecek olay enerjisi büyümektedir. Buna paralel olarak, personelin uygun ark değerine göre kişisel koruyucu donanım seçimi ve kullanım disiplininin korunması daha kritik hâle gelirken, iş süresi uzadıkça maruziyet süresi de artmakta, insan hatası olasılığı yükselmektedir.

LOTO (Lock-Out/Tag-Out) uygulamalarında ise kilitleme noktalarının sayısının ve erişilebilirliğinin sınırlı olması, bazı hücrelerde fiziksel kilitleme düzeneklerinin bulunmaması veya standardize edilmemesi nedeniyle prosedürlerin birimden birime farklılaşmasına yol açmaktadır. Standardizasyon eksikliği; kişisel kilitleme, etiketleme, enerjinin sıfırlanması ve doğrulama (verification) adımlarında tutarsızlık yaratmakta, özellikle çok disiplinli ekiplerin birlikte çalıştığı tesis duruş (turn-around) dönemlerinde riskin katlanmasına neden olmaktadır. Ayrıca mevcut panolarda "gerilimsizlik doğrulaması" için erişilebilir ve güvenli test noktalarının olmaması; uygun kategoride test cihazı ile canlı–ölü–canlı (live–dead–live) doğrulamasının yapılmasını güçleştirmektedir. Bu da elektriksel olarak güvenli çalışma koşulu oluşturma sürecinde gecikme ve hata riskini artırır.

Operasyonel açıdan bakıldığında, ana MCC girişleri ve kuplaj hücrelerinde manevra kabiliyetinin sınırlı olması (ör. kuplaj kesicilerinin uzaktan senkron/otomatik aktarım desteklememesi, bakım modu/enerji azaltma modlarının bulunmaması, yedek hatların test edilmesinde kısıtlar) arıza anında enerjinin hızlı ve güvenli şekilde yeniden dağıtılmasını zorlaştırmaktadır. Bu kısıt; arızanın yalnızca hedeflenen bölgeyle sınırlanmasını engelleyebilir, daha geniş bir alanın enerjisiz kalmasına, dolayısıyla proses üzerindeki etkilerin büyümesine neden olabilir. Ayrıca selektivite yetersizlikleri gibi durumlarda arıza süresinin uzaması ve olay enerjisinin artması ile sonuçlanır.

Özetle, yüksek olay enerjisi potansiyeli, uzaktan işletim yeteneklerinin sınırlılığı, LOTO uygulamalarındaki standardizasyon eksikleri ve manevra kabiliyetindeki kısıtlar birleşerek İSG risk profilini olumsuz etkilemektedir.

YÖNTEM

Petkim tesislerinde MCC değişim öncesi aşağıda belirtilen mühendislik çalışmaları yapılmaktadır.

Saha arayüz çalışmaları: MCC değişim işleri öncesinde proje başında elektrik, enstrümantasyon, inşaat, işletme, bakım, proses güvenliği, DCS/Scada, yüklenici ve ekipman imalatçısıyla beraber proje paydaşları ile yapılacak iş hakkında detaylı fikir alışverişi, bilgilendirme, durum değerlendirmesi ve risk analiz çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar neticesinde MCC'nin beslendiği/enerji verdiği tüm arayüzler; saha kabloları, kablo tavaları, topraklama, yangın algılama, HVAC, drenaj, mekanik penetrasyonlar, DCS/SCADA sinyalleri, kilitlemeler hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Mevcut fiziksel envanter doğrulama adına çekmece bazında tüm saha kablolarının etiketleme, damar fonksiyonu, kesit, güzergâh, klemens numaraları tayin edilmektedir. Bunun dışında mevcut çizim/doküman taraması yapılarak mevcut tek hat, kablo listeleri, loop/IO listeleri, arayüz ve terminal panelleri, selektivite diyagramları, cihaz veri sayfaları da kontrol edilmektedir.

Mevcut MCC tarafında ise her çekmece için klemens planı, kontrol gerilimi, yardımcı kontak fonksiyonları, kilitleme/ara kilitleme mantığı, test/izolasyon konumları bakım ekibiyle beraber çalışılarak gerektiğinde kontrol edilmektedir. Bununla beraber saha tarafında ise motor etiketlerinin

karşılaştırılması, lokal kontrol panoları arasında sinyal kumada kontrol devreleri ve beslendiği saha lokal panellerin durumları da gözden geçirilmektedir.

Yenilecek olan MCC panellerinin ve tesis şalt trafo merkezlerindeki sınırlı alandan kaynaklı yerleşim planlarının oluşturulması da önem arz etmektedir. Bununla beraber ekipman demontaj ve montaj çizimlerinin ve gerektiğinde hangi ekipmanların öncesinde demontaj/montaj edileceğinin sıralaması ve gerekli işlem adımları da tespit edilmektedir.

Kısa devre analizi: Trafo güçleri, empedanslar ve kablo uzunlukları kullanılarak üç fazlı ve tek faz-toprak kısa devre akımları hesaplanmaktadır. Baralar ve şalter seçimleri için Icw/Ipk değerleri, kesici açtırma süreleriyle birlikte değerlendirilmektedir. Bu çalışma ETAP yazılımı üzerinden yapılmakta olup güncellenmektedir. Gerektiğinde raporlanıp proje çıktısı olarak dokümente edilmektedir.

Yük akış analizi: Petkim genelinde yıllar içerisinde zamanla tesis kapasite azalışı veya artışı nedeniyle birtakım yükler de azalıp artmıştır. Bununla beraber güncel şartname ve standartlar dahilinde gerilim düşüm hesapları yapılarak bara ve şalterlerin nominal akım taşıma kapasite hesapları da doğrulanmaktadır.

Selektivite analizi: IEC 60947 eğrileri üzerinden alt ve istasyon şalterleriyle beraber ana baradan beslenen çıkış şalterleri arasında zaman—akım koordinasyonu tabloları oluşturulmuştur. Bu sayede olası arızanın etkisi minimize edilmektedir. Gerektiğinde bölgesel seçicilik hatlar arasında fiber/patch ile kurularak alt kademede arıza olduğunda üst kesici gecikmeye alınırken bakım modunda açma süresi en aza indirildi.

Harmonik analizi: Petkim genelinde gelişen şartlar doğrultusunda enerji verimliliği üzerinde de ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Bu yatırımların bir parçası da proses açısından işletmelerin uygunluk vermesi sonucunda motorlar değişken hız sürücüyle beraber sürülmeye başlanmıştır. Değişken hız sürücülerinin tesis içerisinde sayıları artıkça özellikle MCC ana baraya olan harmonik etkisi değerlendirilerek güncel şartnamelerde belirtilen olması gereken minimum THD (total harmonic deviation) seviyesinin yakalanması adına çalışmalar da yapılmaktadır. Ayrıca bununla beraber yüksek güçlü kritik motor kalkışlarında gerilim düşümü de dikkate alınarak koruma rölelerinde koruma parametrelerinin yanı sıra kablo kesiti ve yol verme yöntemi doğrulama çalışmaları da yapılmaktadır.

Ark-flaş analizi: MCC değişim/yenileme projelerinde Ark-flaş çalışması (IEEE 1584/NFPA 70E temelli) hem tasarım kararlarını hem de devreye alma/işletme güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Petkim genelinde yenilen MCC panellerinde de ark-flaş çalışmaları gerektiğinde yapılmakta ve buna uygun kişisel koruyucu donanımlarının ne olması gerektiği hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Ark-flaş çalışmalarının yapılması adına Petkim genelindeki çalışmalar genel olarak mevcut durumun öncesinde iyice anlaşılması, etüdün yapılması, buna uygun veri toplanmasını gerektirir. Veriler toplandıktan sonra özellikle ana baralar, kuplaj ve kritik fiderlerde ark-flaş sınır, olay anında çıkacak enerji miktarı hesaplanır. Akabinde enerji azaltma stratejilerine bakılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanı selektivite eğrilerinin gözden geçirilerek koruma koordinasyon çalışmalarının yeni MCC entegrasyonuna uygun olacak şekilde mühendislik faaliyetlerinin sürdürülmesidir. Final tasarım verileriyle beraber model güncellemesi yapılarak kısa devre akımları, gerçek cihaz tipleri ve kesin ayar/süreleri ile tekrardan hesaplanır. Senaryo bazlı durumlarda ise gerektiğinde jeneratör işletmesi, bakım modu ve paralel

trafolar gibi alternatif çalışmalar da dikkate alınmaktadır.
İnşaat mühendislik çalışmaları: Güncel deprem yönetmeliği referans alınarak yenilecek MCC lerin boyut, yerleşim planları, ağırlıkları, kablo güzergahları, zemin iyileştirilmesi gibi durumlarda inşaat mühendislik çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bununla beraber öncelikle yeni MCC panolarının plan ve elevasyon yerleşimi, ön ve arka servis boşlukları, kapı açılımları ve nakliye rotası netleştirilmektedir. Bu sayede hem operasyon hem de bakım faaliyetleri için gerekli güvenli çalışma alanları sağlanır. Zemin tarafında, odanın taşıma kapasitesi kontrol edilerek pano kaidesi ve ankraj şablonları tasarlanmaktadır. Ayrıca tesviye işlemleri tamamlanmakta ve gerektiğinde kablo trenchleri de uygun çözümleriyle birlikte tasarlanmaktadır.

YENİ MCC TASARIMI VE DİJİTALLEŞME

Yeni nesil Motor Kontrol Merkezleri (MCC), yalnızca güç dağıtımı ve motor kumandasını değil; aynı zamanda olay kaydı, durum izleme, uzaktan işletim ve siber güvenlik gereksinimlerini bütüncül olarak karşılayan dijital platformlar hâline gelmiştir. Petkim genelinde bu kapsamda gerçekleştirilecek MCC yenileme projeleri; IEC 61439 uyumlu, iç ark davranışı IEC/TR 61641 ile değerlendirilen, çekmeceli mimariyi esas alan, koruma koordinasyonu–ark-flaş azaltma–DCS/SCADA entegrasyonu–siber güvenlik gibi alanlarda modern mühendislik ilkelerini içeren bir tasarım yaklaşımını gerektirir. Bu yaklaşımın detayları aşağıdaki gibi sıralanmıştır.
1) Mimari ve Mekanik Tasarım Esasları

Çekmeceli yapı ve bölmelendirme: Güç bölmesi, kontrol bölmesi ve bara bölmesinin ayrılması; kapı kapalı işletime uygun çekmece test/izolasyon konumları, mekanik/elektriksel kilitlemeler.

Tip test ve IP derecesi: IEC 61439-2 tip testli hücre yapısı; ortam şartlarına uygun IP derecesi, korozyona dayanım, yoğunlaşma kontrolü (rezistans ısıtıcı + higrostat).

İç ark performansı: IEC/TR 61641'e göre basınç tahliyesi (arc venting) ve tahliye yönünün güvenli bölgeye verilmesi; seçimli malzeme ve konstrüksiyon detayları.

Kaide ve montaj: Üretici montaj toleransları, ankraj/tesviye planı; çekmecelerin eksenel hizalamasını garanti edecek kaide rijitliği.
2) Elektriksel Tasarım ve Koruma Koordinasyonu

Kısa devre dayanımı: Baralar ve cihazlar için Icw/Ipk değerleri kısa devre hesap sonuçlarıyla doğrulanır; gerekli emniyet payları gözetilir.

Selektivite ve ZSI: Üst–alt kademeler arasında zaman-akım koordinasyonu; Zone-Selective Interlocking (ZSI) ile arıza anında üst kademede gecikmenin kaldırılarak arızaya en yakın kesicinin en hızlı açması sağlanır.

Toprak kaçağı ve diferansiyel koruma: Kritik fiderlerde toprak kaçak koruması (RCD/RCM) ve ana barada diferansiyel koruma seçenekleri değerlendirilir.

Harmonik ve gerilim kalitesi: VFD ağırlıklı yüklerde THD hedefleri, filtre/reaktör kullanımı; motor kalkışlarında gerilim düşümü limitleri.
3) Ölçüm, İzleme ve Olay Yönetimi (Dijitalleşme)

Ölçüm katmanı: Ana giriş, kuplaj ve kritik fiderlerde çoklu enerji analizörü (U, I, P, Q, S, PF, THD, harmonikler) ile sürekli izleme.

Akıllı kesiciler ve motor koruma röleleri: Olay/kayıt hafızası, zaman damgalı trip verisi, dalga formu yakalama; uzaktan konfigürasyon ve firmware yönetimi.

Sıcaklık ve çevresel sensörler: Bara/kablo başı RTD, kapı içi/oda sıcaklık ve nem sensörleri; sınır ihlallerinde alarm.
4) Standardizasyon ve Çekmece Tipolojisi

Değişik tipteki ve güçteki çekmeceler için tipikleştirme çalışmalarının hazırlanması. Örnek olarak direkt yol verme, VFD, düz fider tipiklerinin oluşturulması

Bakım kolaylığı: Hızlı çekmece değişimi, torklu klemens ve bakım tork tablolarının oluşturulması

PROGRAM YÖNETİMİ VE TURNAROUND YAKLAŞIMI

MCC yenileme projeleri, üretim sürekliliğinin kritik olduğu petrokimya ve rafineri tesislerinde, yalnızca bir ekipman değişimi değil; kapsam, zaman, maliyet, kalite, İSG ve siber güvenlik disiplinlerinin eşgüdümünü gerektiren çok paydaşlı bir program yönetimi konusudur. Başarının anahtarı olarak, turn-around (TA) sürecinde uyumlu planlama, risklerin proaktif yönetimi ve disiplinler arası arayüzlerin erken safhada çözülmesinden geçmektedir. Aşağıda bu süreçte izlenilmesi gereken Petkim'in esas aldığı adımlar yer almaktadır:
1) Proje yönetimi ve organizasyon

Paydaş haritası: Proje sponsorluğu (işletme/proses), proje yönetimi (PMO), elektrik mühendisliği, enstrümantasyon/OT, tedarik/lojistik, inşaat-mekanik, bakım, İSG, kalite güvence, yüklenici ve imalatçı.

Karar yapısı: Haftalık çekirdek ekip toplantıları, değişiklik kontrol kurulu (MOC), kritik kararlar için onay kapıları (gate) – tasarım dondurma, malzeme serbest bırakma, FAT, TA başlatma, SAT, devretme.
2) Kapsam yönetimi ve kapsam kırılımı

Kapsam kırılımı (WBS): Mühendislik (tek hat, kısa devre/selektivite, ark-flaş vb.), mekanik yerleşim/kaide, kablo tavaları-kablo kanalları, OT/SCADA entegrasyonu, LOTO altyapısı, FAT, ön-saha işleri, SAT/devreye alma, eğitim ve proje kapanışı.

Kapsam sınırları: Mevcut panoda kalacak ekipmanlar, üçüncü taraf sistemler (DCS/ESD, yangın, HVAC), geçici enerji ve bypass çözümleri.

Teslimatlar: Onaylı çizimler, teknik şartname, kablo listeleri ve klemens planları, koruma ayar dosyaları, FAT/SAT protokolleri, ark-flaş etiketleri, as-built seti.
3) Zamanlama ve Turn-around Entegrasyonu

Ana program: Kritik yol yöntemi (CPM) ile mühendislik–tedarik–imalat–FAT–ön hazırlık–TA–SAT zinciri oluşturulur.

Turnaround Yönetimi: Operasyonla birlikte, hat duruş matrisi ve üretim kaybı senaryoları değerlendirilerek en uygun zamanlama seçilir; sıcak iş izinleri, izolasyon planları ve eşzamanlı işler (SIMOPS) çatışmasız planlanır.

Mikro-plan: Özellikle saha çalışmalarında günü birlik detaylı programlar oluşturulur.
4) Risk yönetimi ve MOC

Risk matrisi: Olasılık x şiddet ile üst 10 risk – malzeme gecikmesi, as-built uyuşmazlık, kablo güzergahı çakışması, koruma ayar onayı gecikmesi, test ekipmanı yetersizliği, siber güvenlik erişim sorunları, hava koşulları, SIMOPS

çatışması, yetkinlik eksikliği, acil durum planı belirsizliği.

Önleyici tedbirler: Erken saha keşfi ve kablo doğrulama, kritik yedek parça listesi (çekmece, kesici, röle), alternatif tedarik planı

Değişiklik yönetimi (MOC): Her tasarım/ayar/saha değişikliği için etki analizi (İSG, proses), onay ve izlenebilirlik.
5) Tedarik ve kalite kontrol süreçleri

Tedarik stratejisi: Uzun teslim süreli kalemler (kesiciler, çekmeceler, iletişim modülleri) için erken sipariş; onaylı üretici listeleri, yedek çekmece stoku.

FAT (Fabrika Kabul Testi): Tipik çekmece fonksiyon testleri

Saha kalite: Klemens tork kontrol listeleri, kablo etiketi/ferül standardı, kablo kanal/yangın durdurucu görsel muayenesi; 3. parti bağımsız kalite denetimleri ve punch list yönetimi.
6) Saha kabul testleri ve Devreye Alma

Fonksiyon testleri: Enerjisiz (continuity/megger, IO point-to-point, interlock mantığı), enerjili (motor yönü, koruma açma süreleri doğrulama).

Etiketleme ve işaretleme: Cihaz, LOTO kilitleme noktaları, kablo/klemens etiketleri.

Kabul ve devretme: Operatör ve bakım eğitimleri, yedek parça listesi ve tork tabloları, devreye alma raporu ve geçici kabul ve garanti/servis süreçleri
7) İSG ve Eğitim

Prosedürler: NFPA 70E/NFPA 70B uyumlu saha prosedürleri

Eğitim: LOTO, ark-flaş PPE, yeni MCC lerde olan dijital rölelerini ve operasyonel anlamda verilen eğitimler

BULGULAR VE TARTIŞMA

Ark flaş riski adına IEEE 1584'e göre ana/kuplaj baralarında ve yüksek kısa devre akımı olası fiderlerde açığa çıkan enerji (incident energy) değerleri yer yer yüksek olan durumlarda uygun koruma koordinasyon mühendislik çalışmaları yürütülerek arıza temizleme süresi ciddi oranda kısaltılmış ve oluşan enerjide anlamlı düşüşler yaşanmıştır. LOTO yapılması açısından ise standart kilitleme noktaları ve panel kapısı kapalı işletim kabiliyetleri artmış ve bu sayede enerjili çalışma istisnai hale gelerek, maruziyet ve insan hatasından ciddi risk azalmıştır. Güvenilirlik ve işletme sürekliliği açısından çekmeceli mimari, akıllı koruma ve olay kaydıyla arıza teşhisi hızlanmış; çekmece değişim süresi kısalarak MTTR düşmüş, standardizasyon sayesinde MTBF artmıştır. Operasyonel görünürlük ve dijitalleşme yönünden bakıldığında ana/kuplaj/fider düzeyinde enerji analizi, trip kayıtları ve dalga formu yakalama sayesinde kök neden analizi (RCA) hızlanmış; historian/raporlama ile trend ve KPI takibi mümkün olmuştur. Ekipman ve alt yapı düşünüldüğünde ise kısa devre dayanımı: Icw/Ipk gereksinimleri güncel kısa devre hesaplarıyla doğrulanmış; zayıf halkalarda cihaz seçimleri ve ayarlar revize edilmiştir.

EKONOMİK ANALİZ

Petkim genelinde yürütülen MCC değişim işleri sonucunda tesis koşullarına bağlı olarak ilk yatırımın ötesinde enerji izleme ile talep yönetimi ve kestirimci bakım potansiyeliyle beraber orta vadede bir ünite için planlanmamış duruş kaybının %30 azalması ve bakım maliyetinin %20 düşmesiyle 3–5 yıl geri ödeme bandı oluşmuştur. Çekmeceli standardizasyon stok maliyetini artırsa da ortalama onarım

süresini azaltarak toplam faydayı yükseltmektedir

SONUÇ VE ÖNERİLER

Petkim genelinde yapılan MCC yenileme projeleri güvenlik, güvenilirlik, görünürlük ve standardizasyon alanlarında ölçülebilir kazanımlar üretmekle beraber planlanmamış duruşların ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına, İSG performansının iyileştirilmesine ve dijital bakım/işletme kültürünün yerleşmesine katkı sağlamıştır.

Bu tür projelerin başarıyla tamamlaması adına mühendislik ve emniyet süreçlerinin düzenli aralıklarla güncellenmesi, kurum çapında standardizasyonun tesis edilmesi, turnaround (TA) planlamasının disiplinli bir program yönetimi çerçevesinde yürütülmesi ve saha ekiplerinin sürekli eğitimi önceliklidir. Bu kapsamda kısa devre, selektivite ve IEEE 1584'e göre ark-flaş etütleri periyodik olarak yenilenmeli ve etiketler güncellenmelidir.

Sürdürülebilir iyileştirme için, KPI'lar (planlanmamış duruş, MTBF/MTTR, incident energy, alarm kalitesi, punch kapanış süresi) aylık gözden geçirmelerle izlenmeli; kısa vadede etiket ve eğitim güncellemeleri ile yedek çekmece stoğu tamamlanmalı, orta vadede tüm MCC'lerde koruma koordinasyon felsefesi standardize edilmeli, uzun vadede ise durum/kestirimci bakımı destekleyecek çalışmalar ve hatta günümüzde siber güvenlik dahil çalışmalar yol haritasına alınmalıdır. Bu bütüncül yaklaşım, güvenlik-güvenilirlik-operasyonel verim hedeflerinin dengeli biçimde gerçekleştirilmesini ve MCC yenileme yatırımlarının kalıcı toplam sahip olma maliyeti (TCO: Total Cost of Ownership) faydasına dönüşmesini sağlar.

KAYNAKLAR

IEC 61439-2, Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 2: Power switchgear and controlgear assemblies.

IEC/TR 61641, Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault.

IEC 60947 Series, Low-voltage switchgear and controlgear.

IEEE 1584, Guide for Performing Ark-flaş Hazard Calculations.

NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace.

IEC 60079 Series, Explosive atmospheres.

IEC 62443 Series, Industrial communication networks – IT security for networks and systems.

CIGRE TB 604, LV Switchgear and Controlgear: Reliability and Safety aspects.

ISO 55000, Asset Management – Overview, principles and terminology.

EEMUA 191, Alarm Systems – A Guide to design, management and procurement.

IEEE Std 242 (Buff Book), Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems.

IEC 60204-1, Safety of machinery – Electrical equipment of machines.

IOT TABANLI BİNA OTOMASYON SİSTEMLERİ: ENERJİ VERİMLİLİĞİ, KULLANICI KONFORU VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE BİR İNCELEME

Özge SAĞLIYAN
Bilgisayar Teknolojileri Bölümü
Doğuş Üniversitesi
İstanbul
osagliyan@dogus.edu.tr

***Öz*– Bina Otomasyon Sistemleri (BAS)*, Bina Otomasyon Sistemleri (BAS), enerji verimliliğini artırmada yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak geleneksel sistemler düşük adaptasyon ve sınırlı gerçek zamanlı tepki yeteneklerine sahiptir. Nesnelerin İnterneti (IoT) entegrasyonu, gerçek zamanlı izleme, veri odaklı otomasyon ve akıllı karar mekanizmaları ile enerji verimliliğini, kullanıcı konforunu ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasını önemli ölçüde geliştirmektedir.*
Bu çalışma, 2010–2023 yılları arasında yayımlanan 117 makaleyi inceleyerek IoT-BAS sistemlerini enerji verimliliği, iç mekân konforu ve emisyon azaltımı açısından değerlendirmekte; birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik gibi temel zorlukları ele almaktadır. Bulgular, kullanıma dayalı HVAC kontrolü, akıllı aydınlatma ve öngörücü bakımın enerji tüketimini azaltırken çevre kalitesini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, standart iletişim protokolleri, güçlü güvenlik altyapıları ve hibrit bulut-kenar mimarileri IoT-BAS entegrasyonunu kolaylaştıran başlıca çözümler olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Bina Otomasyon Sistemleri, Nesnelerin İnterneti, Enerji Verimliliği, İç Mekan Konforu, Karbon Dioksit Azaltımı, Akıllı Binalar, HVAC Kontrolü, Akıllı Aydınlatma, Öngörücü Bakım, Birlikte Çalışabilirlik, Siber Güvenlik, Ölçeklenebilirlik, Bulut-Kenar Mimari, Yapay Zekâ, Dijital İkiz, Blokzincir, Sürdürülebilirlik

I. GİRİŞ

Binalar, dünya genelinde toplam enerji tüketiminin %30'unu oluşturmakta ve toplam emisyonların %26'sına katkı sağlamaktadır. Bu emisyonların %8'i binalardan kaynaklanan doğrudan emisyonlar iken, %18'i binalarda kullanılan ısıtma ve elektrik enerjisinden kaynaklanan dolaylı emisyonlardır [1]. Ayrıca, olumsuz hava koşulları, küresel ısınma ve gelişmekte olan ülkelerdeki kentleşme nedeniyle bina enerji tüketimi artmaktadır [2]. Artan enerji ihtiyacı ve çevresel kaygılar, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve kullanıcı konforu gibi unsurları modern binalarda kritik öncelikler haline getirmektedir.

Bina Otomasyon Sistemleri (BAS), Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC), aydınlatma ve iç mekân çevre kalitesini kontrol etmek amacıyla giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. BAS, bir binanın elektrik sistemleri, aydınlatma, güneşlikler, erişim, güvenlik ve diğer ilişkili sistemler üzerinde merkezi ve otomatik kontrol imkânı sağlar. Ayrıca, Bina Yönetim Sistemi (BMS) veya Bina Enerji Yönetim Sistemi (BEMS) olarak da adlandırılmaktadır [3]. BAS, merkezi kontrol ve izleme yoluyla ticari binalarda enerji tasarrufu sağlaması nedeniyle, ticari yapılar, alışveriş merkezleri, fabrikalar gibi endüstriyel alanlar ve hatta konutlarda yaygın olarak uygulanmaktadır [4,5].

Bina operasyonlarını etkin şekilde desteklemek amacıyla BAS mimarisi üç katmandan oluşmaktadır: saha katmanı, otomasyon katmanı ve yönetim katmanı [6]. Saha katmanı, en alt seviyede yer alır ve saha cihazları (sensörler, aktüatörler) ile iletişimin gerçekleştiği katmandır. Otomasyon katmanı, ölçümlerin işlendiği orta katmandır. Yönetim katmanı ise en üstte bulunmakta olup sistem verilerinin sunumu,

iletimi, eğilim analizi, kaydı ve arşivlenmesini gerçekleştirmektedir [7]. BAS'in etkin işleyişi için bu katmanlar arasında kesintisiz iletişim büyük önem taşımaktadır. Sensörler, kontrolörler ve aktüatörler gibi farklı sistem bileşenleri arasında iletişim sağlamak amacıyla, BAS farklı cihazlar ve platformlar arasında etkin iletişim imkânı veren standartlaştırılmış iletişim protokollerini kullanmaktadır.

Önceki çalışmadan elde edilen bulgular [8], BAS'te en yaygın kullanılan iletişim protokollerinin BACnet, LonWorks, KNX ve Modbus olduğunu göstermektedir. BACnet (Building Automation and Control Network), HVAC, aydınlatma, güvenlik, yangın algılama ve binadaki diğer birçok sistemi entegre eden yaygın kullanılan açık bir protokoldür ve büyük ölçekli otomasyon projeleri için tercih edilen bir seçenektir [9]. Echelon Corporation tarafından geliştirilen LonWorks (Local Operating Network) ise özellikle dağıtık kontrol için tasarlanmış önemli ve gelişmiş bir protokoldür. Farklı iletişim ortamlarında (bükümlü çift, güç hatları ve kablosuz ağlar) cihazlar arası iletişimi kolaylaştırır [10]. Buna karşın KNX (Konnex), ev ve bina otomasyonunda dünya çapında tanınan standart bir protokoldür. Aydınlatma, güneşlik, HVAC ve güvenlik sistemlerinin kontrolünde esnek olup, Ethernet, RF (Radyo Frekansı) ve bükümlü çift kablo gibi çeşitli iletişim ortamlarını desteklemektedir [11]. Modbus ise endüstriyel otomasyon için geliştirilmiş olup, BAS'te basitliği ve kontrolörler, sensörler ve aktüatörler arasında TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) ağları üzerinden verimli veri alışverişi sağladığı için yaygın biçimde kullanılmaktadır [12].

Bu protokoller, çeşitli bina sistemlerinin etkin yönetim ve kontrolü için elzemdir. Ancak, geleneksel BAS sadece kullanıcıların rutin aktivitelerine bağlı olarak çalışır ve kullanıcı davranışları ile tercihleri göz önüne alınmaz [13]. Buna karşın, binalarda IoT kullanımı gerçek zamanlı izleme ve kullanıcı tercihleri ile iç ortam iklimine dayalı uyarlanabilir kontrolü mümkün kılarak konforu ve enerji verimliliğini artırmaktadır [14]. Ayrıca IoT, platformlar arası bilgi paylaşımına izin veren, algılayıcı ve aktüatör cihazlardan oluşan, bireysel adreslenebilir cihazların küresel ağıdır. Tek ve birleşik bir mimari kullanarak yaratıcı uygulamaları destekleyen ortak bir işletim modeli oluşturur [15]. IoT, ayrıca akıllı nesnelerin birbirleriyle iletişim kurmasını sağlayarak gerçek dünya bilgi ve veri aktarımını verimli hale getirir. Algılayıcı etkileşim özellikleri ve kullanıcı tanımlama teknolojileri ile bu akıllı nesneler daha fazla gerçek dünya verisi toplar ve gelişmiş otomasyona katkı sağlar [16].

Dolayısıyla, IoT ile BAS entegrasyonu, bina yöneticilerinin internet bağlantısı olan herhangi bir yerden sistemleri uzaktan yönetmesini sağlar [17]. Bu esneklik, operasyonel mükemmelliği artırırken, sorunların büyümeden önce sistematik şekilde bakım yapılmasını mümkün kılar. Ayrıca kullanıcıların ortamlarını kişiselleştirip tercihleri doğrultusunda ayarları değiştirmesine olanak vererek konfor ve memnuniyeti artırır. Genel konforun ötesinde, görsel ve termal konfor da kullanıcı sağlığı ve iç mekân deneyimi için önemlidir. Akıllı binalarda görsel ve termal konforun çeşitli yönleri önceki çalışmalarda incelenmiş, kullanıcı davranışlarının uyarlanabilirliği ile hem konforlu hem de enerji verimli iç mekanlar elde edilebileceği belirtilmiştir [18]. Ayrıca, kullanıcı konumu ve iç ortam koşullarına göre bina kabuklarını uyarlayan adaptif cepheler ve çift taraflı malzeme geometrileri kullanımı önerilmiştir [19]. Çok amaçlı stor perde kontrolörleri ile iç mekân konforunun

artırılması ve enerji yükünün azaltılması da araştırmalarda ele alınmıştır [20]. Pasif ve yarı otomatik konfor stratejilerini destekleyen bu çalışmaların yanında, IoT-BAS gerçek zamanlı sensör bazlı otomasyon ile bu stratejilerin etkinliğini büyük ölçüde artırmaktadır.

Buna ek olarak, IoT-BAS alternatif enerji entegrasyonu ve akıllı şebeke girişimlerine katılımı kolaylaştırarak, binaların enerji talebini şebeke dinamiklerine ve fiyat trendlerine göre dinamik olarak ayarlamasına imkân verir. Enerji tüketimi ve emisyonları azaltarak, IoT destekli binalar karbon nötr ekonomiye geçişte ve iklim eylem hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kritik rol oynamaktadır [21]. CO_2 emisyonlarının azaltılması için diğer yöntemler arasında fiber takviyeli beton gibi daha az çimento içeren malzemeler [22] ve yüksek performanslı alkali aktive beton ile jeopolimer beton gibi çimentosuz malzemeler [23] yer almaktadır. Bu malzemeler geleneksel çimento üretimine kıyasla karbon ayak izini azaltır. Ancak, IoT tabanlı yapısal izleme ve akıllı bina otomasyonu, bu malzemelerin üretkenliğini, dayanıklılığını ve enerji verimliliğini daha da artırmaktadır. Gerçek zamanlı veri analitiği, esnek HVAC kontrolü ve öngörücü bakım sayesinde, IoT-BAS ile inşa edilen binalar, alternatif malzemelerle optimal termal konfor ve işletme performansını yaşam döngüsü boyunca sürdürebilmektedir.

IoT teknolojilerinin bina operasyonlarını dönüştürme potansiyeline rağmen, IoT-BAS için enerji verimliliği, kullanıcı konforu ve CO_2 azaltımı gibi kritik faktörleri bir arada ele alan kapsamlı analizler halen eksiktir. Bu çalışma, IoT tabanlı BAS'in enerji, konfor yönetimi ve sürdürülebilirlik alanlarındaki gelişmelerini kapsamlı şekilde inceleyerek, IoT-BAS entegrasyonunda karşılaşılan birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik sorunlarını da ele almayı amaçlamaktadır. Araştırma ayrıca şu soruları cevaplamayı hedeflemektedir:

1. IoT tabanlı BAS'te son gelişmeler nelerdir?
2. IoT teknolojileri, BAS'te enerji tüketimi optimizasyonu, CO_2 azaltımı ve kullanıcı konforu açısından nasıl kullanılabilir?
3. IoT tabanlı BAS uygulamalarında birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik açısından karşılaşılan temel zorluklar nelerdir?
4. IoT tabanlı BAS'in sürdürülebilir bina uygulamaları ve akıllı şehir girişimleri doğrultusunda gelecekteki adımları nelerdir?

Bu çalışma;

1. IoT tabanlı Bina Otomasyon Sistemleri (BAS) teknolojilerindeki son gelişmeleri belirlemek ve mevcut araştırma bulgularını sentezlemek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması ve analiz gerçekleştirmeyi,
2. IoT tabanlı BAS yaklaşımlarının binalarda enerji verimliliği, kullanıcı konforu ve CO_2 azaltımı üzerindeki etkilerini incelemeyi,
3. IoT tabanlı BAS'in uygulanmasında karşılaşılan birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik sorunlarını teknik açıdan analiz ederek bu sorunlara yönelik potansiyel çözümler ve en iyi uygulamaları önermeyi,
4. Sürdürülebilir bina uygulamaları ve akıllı şehir girişimlerine katkı sağlayacak şekilde IoT tabanlı BAS için gelecekte yapılacak araştırmalara yönelik öneriler sunmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın katkılarının özeti şu şekildedir:

1. IoT-BAS entegrasyonunun enerji tasarrufu, kullanıcı konforu ve

emisyon azaltımı açısından binalarda kapsamlı değerlendirilmesi,
2. IoT-BAS'in birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik sorunlarının standartlaştırma girişimleri, siber güvenlik önlemleri ve ölçeklendirme stratejileri ile ele alınması,
3. Teorik yaklaşımlar ile pratik uygulamaları bir araya getiren bir araştırma çerçevesi oluşturulması; önerilen çözümlerin ticari binalar, akıllı binalar ve yenilenmiş altyapılarda uygulanmasını sağlaması,
4. Bina mühendisleri, tesis yöneticileri, politika yapıcılar ve sektör profesyonellerine sürdürülebilir bina uygulamaları ve enerji yönetimi stratejileri konusunda değerli bilgiler sunması.

2. ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ

Sistematik inceleme, önceden belirlenmiş uygunluk kriterlerini karşılayan tüm geçerli kanıtları toplayarak belirli bir araştırma sorununu ele alır. Bu yöntem, önyargıyı en aza indirmek için kesin ve sistematik yollar kullanarak güvenilir veriler üretir ve değerlendirmeler ile sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olur [24]. Ayrıca, örnek özellikleri veya çalışma düzeyindeki faktörlerin incelenen konu üzerindeki etkisini belirlemek için çeşitli yaklaşımlar uygulanabilir [25]. Araştırma yaklaşımındaki aşamalar; tanımlama, tarama ve uygunluk süreçlerini, kaynak değerlendirmesi, yapılandırılmış analiz ve sentezi içerir.Bu çalışmada, IoT tabanlı BAS'in önemli yönlerini sistematik olarak haritalamak ve görselleştirmek amacıyla sayısal bir araç olan yapılandırılmış değerlendirme kullanılmıştır. Geniş ve yapılandırılmamış tartışmalar sunan anlatı incelemelerinin aksine, yapılandırılmış değerlendirme IoT-BAS bileşenlerini sistematik şekilde kategorize ederek açıklık ve bütünlüğü sağlar. Problemleri çözümlerle doğrudan ilişkilendirmeyen ve tekrarlayan temalar üzerinde yoğunlaşan tematik analizlerden farklı olarak, bu yöntem değişimleri tanımlar ve hedefe yönelik çözümler sunarak araştırma bulgularını uygulanabilir kılar. Ayrıca, istatistiksel meta-analizlere dayanan incelemeler nicel içgörüler sağlarken genellikle bağlamsal derinlik ve pratik kullanılabilirlikten yoksundur; oysa bu yaklaşım teknik analiz ile gerçek zamanlı uygulamayı dengeler. Anahtar kavramları organize ederek, mantıksal akışı koruyarak ve teoriyi uygulama ile ilişkilendirerek yapılandırılmış değerlendirme, diğer tekniklere kıyasla daha üstün, kapsamlı, çözüm odaklı ve uyarlanabilir bir yöntemdir. Bu çalışmada kullanılan sistematik tarama süreci, grafiklerle ve tablolarla görselleştirilmiştir.Aşağıdaki görsel, çalışmada incelenen 117 makalenin yayımlandığı dergi ve kaynakların dağılımını göstermektedir. Kaynakların katkı düzeyleri, seçilen yayınlardaki makale sayısına göre yüzdesel olarak ifade edilmiştir.

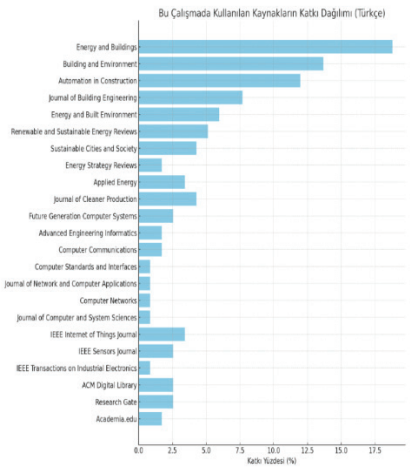
Grafikte öne çıkan bulgular şunlardır:

- En yüksek katkı oranı %18,8 ile *Energy and Buildings* dergisine aittir. Bu durum, enerji verimliliği ve bina temelli aydınlatma sistemlerine ilişkin çalışmaların bu dergide yoğunlaştığını göstermektedir.
- *Building and Environment* (%13,68) ve *Automation in Construction* (%11,97) dergileri de çalışmaya önemli ölçüde katkı sağlamış olup, bu dergilerde yayımlanan makaleler özellikle bina çevresi, yapı

otomasyonu ve sürdürülebilirlik temaları etrafında yoğunlaşmaktadır.

- *Journal of Building Engineering*, *Energy and Built Environment* ve *Renewable and Sustainable Energy Reviews* gibi diğer dergiler de dikkate değer katkılar sunmuştur.
- Ayrıca *IEEE Internet of Things Journal* gibi teknoloji odaklı kaynaklar, akıllı aydınlatma ve IoT tabanlı enerji yönetimi konularında literatüre katkı sağlamıştır.

Toplamda 331 makale taranmış olup, içerik ve konu uygunluğu açısından 117 makale çalışmaya dahil edilmiştir. Görselde sunulan bu oranlar, literatürde hangi yayınların sokak aydınlatmasında enerji verimliliği konusuna odaklandığını ortaya koymakta ve bu alandaki akademik eğilimlerin belirlenmesine katkı sunmaktadır.

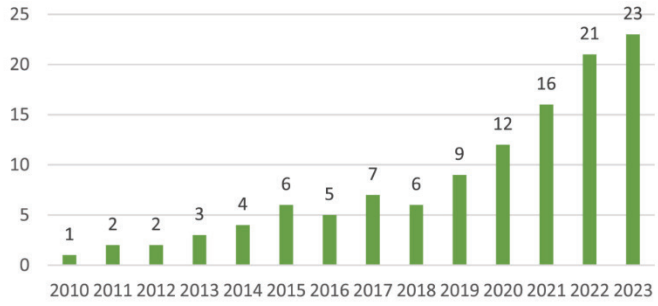


Grafik 1 :Kaynakların katkı dağılımı

Aşağıdaki Grafikte görüldüğü üzere, 2010 yılında yalnızca 1 adet yayın bulunurken, bu sayı yıllar içinde istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. Özellikle 2015 yılından itibaren araştırmalarda belirgin bir artış gözlemlenmektedir. 2020 sonrası dönem, IoT teknolojilerinin bina otomasyon sistemlerine entegrasyonunun hız kazanmasıyla birlikte yayın sayılarında dikkate değer bir sıçrama yaşanmıştır.

- 2010–2013 yılları arasında yayınlar sınırlı sayıda olup araştırmaların henüz başlangıç aşamasında olduğunu göstermektedir.
- 2014–2019 döneminde yayın sayıları kademeli olarak artmış, yılda ortalama 5–9 makale yayımlanmıştır.
- 2020–2023 yılları arasında, bu alanda yapılan yayın sayılarında önemli bir yükseliş gerçekleşmiştir. 2023 yılında ulaşılan 23 yayın, dönemin en yüksek araştırma çıktısını temsil etmektedir.

Bu eğilim, IoT ve BAS konularına olan akademik ve sektörel ilginin giderek arttığını, ayrıca enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve akıllı bina yönetimi gibi konuların giderek daha fazla önem kazandığını açıkça ortaya koymaktadır.

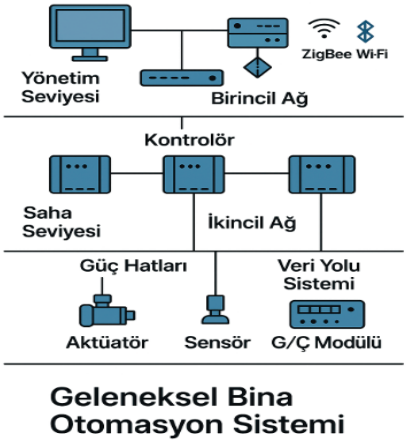


Grafik 2 : Yıllara göre yayın dağılımı

3.GELENEKSEL BİNA OTOMASYON SİSTEMLERİ (BAS)

Bina Otomasyon Sistemleri (BAS), binalarda yer alan iklimlendirme, ısıtma, havalandırma, aydınlatma, gölgeleme, can güvenliği, güvenlik alarmları ve diğer çeşitli temel hizmetlerin düzenlenmesi ve denetlenmesi amacıyla kurulan bir ağ sistemidir. Bu sistem, teknolojik olarak gelişmiş ortamlarda görevlerin otomatikleştirilmesi için tasarlanmış olup, mekanik ve elektriksel bağlantılar aracılığıyla dağılmış olan kontrol ağları üzerinden çeşitli cihazların eşgüdümünü sağlar [26]. BAS yapısı; aktüatörler, sensörler ve donanım modüllerinden oluşmaktadır. Aktüatörler, pencere panjurları veya çatı ışıklıkları gibi fiziksel cihazlardır ve gelen sinyallere bağlı olarak ağları kapatma veya elektrik yüklerinin gücünü değiştirme gibi tepkiler verirler. Sensörler ise fiziksel dünyadaki verileri ölçülebilir sinyallere dönüştüren araçlardır. Donanım modüllerinin giriş/çıkış (I/O) portları, dijital çıkış emirleri doğrultusunda elektriksel sinyaller üreten veya sinyal girişlerinden okuma yapan aktüatör ve sensörlere bağlanmaktadır [27]. Sensörler, aktüatörler, denetleyiciler ve diğer cihazlar ile merkezi yönetim sistemi arasındaki bilgi alışverişi; BACnet, Modbus, Zigbee, Wi-Fi ve Ethernet gibi yaygın olarak kullanılan haberleşme protokolleri aracılığıyla sağlanmaktadır [28].

BAS'in mimarisi aşağıdaki Şekil'de gösterilmiştir. Alan seviyesi, binadaki işlevleri fiziksel olarak gerçekleştiren veya algılayan tüm ekipmanları içerir. Alan seviyesindeki cihazları bir otomasyon seviyesi PLC'ye (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) veya RTU'ya (Uzak Terminal Ünitesi) bağlamak, alan ağı katmanının birincil görevidir. Bu iki katman arasındaki fiziksel bağlantı; enerji hatları, kablolu bağlantılar, veri yolu sistemleri (bus) ve kablosuz yöntemler olmak üzere dört şekilde sağlanabilir. Gerçek zamanlı olarak alan seviyesindeki cihazları yöneten ve kontrol eden gelişmiş denetleyiciler, otomasyon seviyesi kapsamında yer alır. BAS içerisinde yönetim ve otomasyon seviyeleri arasındaki bağlantı, ana ağ (primary network) üzerinden gerçekleştirilir. Bu ana ağ, genellikle binanın geleneksel Yerel Alan Ağı (LAN) ile birlikte çalışmakta ya da bu ağdan ayrılmış durumda bulunmaktadır. LAN içerisinde, bir ağ anahtarı (switch) kullanılarak çeşitli düğümler birbirine bağlanmakta ve aralarında iletişim sağlanmaktadır. Otomasyon seviyesi ile ana ağ arasındaki bağlantı, ikincil ağlar aracılığıyla kurulmaktadır. Yönetim seviyesi ise; bina otomasyon sistemini denetleyen, personele iletişim imkânı sunan ve internet erişimi sağlayan tüm cihazları içermektedir [29].



Şekil 1: Geleneksel Bina Otomasyon Sistemi

Geleneksel bina otomasyon sistemleri (BAS), bina yönetim süreçlerinde otomasyonu sağlamak için önemli bir rol üstlenmekle birlikte, çeşitli sınırlılıkları nedeniyle günümüzün dinamik gereksinimlerine cevap vermekte zorlanmaktadır. Bu sistemlerin başlıca dezavantajları şu şekildedir:

- Özgün donanım ve protokollere bağımlılık: Geleneksel BAS'lar genellikle tescilli (proprietary) donanım ve iletişim protokollerine dayalıdır. Bu durum, sistemin ölçeklenebilirliğini ve genişletilebilirliğini zorlaştırarak, gelişen bina ihtiyaçlarına uyum sağlamasını engeller.
- Esnek olmama: Mimari olarak katı bir yapıya sahip olan geleneksel BAS'lar, yeni teknolojilerin entegrasyonu ya da bina işlevselliğindeki değişikliklere uyum sağlama açısından sınırlı esneklik sunar.
- Yüksek ilk yatırım maliyeti: Özellikle küçük ölçekli binalar veya mevcut sistemlerin iyileştirilmesi (retrofit) durumlarında, sistemin kurulum maliyeti oldukça yüksek olabilir.
- Sınırlı veri analitiği ve içgörü: Bu sistemler çoğunlukla yalnızca temel izleme ve kontrol işlevlerini yerine getirir. Bu nedenle, bina performansı ve kullanıcı davranışlarına ilişkin derinlemesine analiz ve içgörü sağlamakta yetersiz kalır.
- Tedarikçi bağımlılığı: Tescilli yapı nedeniyle bina sahiplerini belirli bir tedarikçiye bağımlı hale getirerek, birlikte çalışabilirlik (interoperability), ürün seçme özgürlüğü ve inovasyon olanaklarını kısıtlar.
- Merkezi mimari zayıflıkları: Merkeziyetçi yapı, tek nokta arızalarına açık olup, sistemin ölçeklenebilirliğini ve performansını sınırlayan darboğazlar oluşturabilir.
- Modern protokollere entegrasyon eksikliği: Güncel iletişim protokolleri ve entegrasyon arayüzlerine doğal destek sunmayan bu sistemler, harici sistemlerle entegrasyonu zorlaştırır.
- Siber güvenlik açıkları: Eski veya yetersiz güvenlik önlemleri

nedeniyle, siber tehditlere karşı savunmasızdır.

Sonuç olarak, geleneksel BAS'lar otomasyonu belirli bir düzeyde sağlasa da, gerçek zamanlı kullanıcı yoğunluğu, çevresel değişiklikler ve enerji talebi dalgalanmalarına dinamik olarak yanıt verme konusunda yetersizdir. Bu nedenlerle, geleneksel sistemler giderek Nesnelerin İnterneti (IoT) temelli çözümlerle değiştirilmeye veya bu teknolojilerle takviye edilmeye başlanmıştır. Konvansiyonel BAS'tan IoT tabanlı bina otomasyon sistemlerine geçiş, enerji verimliliği, kullanıcı odaklılık ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir paradigma değişimini temsil etmektedir.

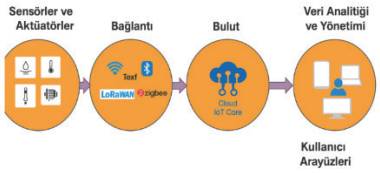
4. BAS İÇİN IOT TEKNOLOJİLERİ

(Nesnelerin İnterneti Teknolojilerinin Bina Otomasyon Sistemlerine Uygulanması)

Nesnelerin İnterneti (IoT), dahili yazılım, sensörler ve aktüatörlerle donatılmış cihazların oluşturduğu ve veri toplama, paylaşma ve analiz etme süreçlerini bağımsız bir şekilde yürütebilen bir bağlantılı cihazlar ağıdır. IoT bileşenleri Şekil 2'te gösterilmektedir.

IoT teknolojisinin merkezinde, çevresel koşullardan nem, sıcaklık, hareket ve ses gibi bilgileri toplayan sensörler yer almaktadır. Bu sensörlerden elde edilen veriler, daha sonra işlenmek, analiz edilmek ve anlamlı, uygulanabilir bilgiye dönüştürülmek üzere merkezi platformlara veya bulut tabanlı sistemlere iletilir [36].

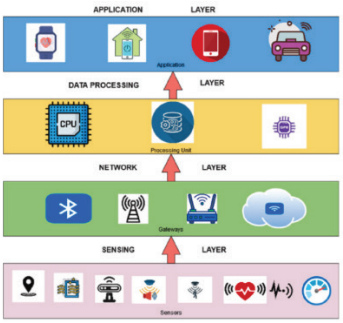
Bu yapı, bina otomasyon sistemlerinin yalnızca izleme ve kontrolün ötesine geçerek; gerçek zamanlı veri analitiği, kestirimci bakım, enerji yönetimi ve kullanıcı davranışlarına duyarlı tepkiler gibi daha ileri seviye işlevsellikler kazanmasına olanak tanır. Böylece, enerji verimliliği, konfor ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak mümkün hale gelmektedir.



Şekil 2 : IoT bileşenleri

Şekil 3'da verilen IoT mimarisi, bağlı cihazların sorunsuz entegrasyonunu ve çalışmasını sağlayan bir çerçevedir. Mimari genellikle her biri belirli işlevlerden sorumlu birkaç katman içerir. Algılama katmanı, gerçek dünyayla iletişim kurmak için sensörler ve aktüatörler içeren somut nesnelerden oluşur. Sensörler ortam verilerini toplarken, aktüatörler cihazların alınan talimatlara göre komutlara yanıt vermesini sağlar. Ağ katmanı, IoT cihazlarının bağlantısını sağlayarak çeşitli ağ protokolleri ve teknolojileri üzerinden veri aktarımını mümkün kılar. Katman, hücresel ağları (3G, 4G ve 5G), Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee ve LoRaWAN'ı (Uzun Menzilli Geniş Alan Ağı) ve diğer kablolu ve kablosuz iletişim teknolojilerini içerir. CoAP (Kısıtlı Uygulama Protokolü), HTTP (Köprü Metni Aktarım Protokolü) ve MQTT (İleti Sıraya Alma Telemetri

Taşımacılığı) gibi ağ protokolleri, cihazlar ile bulut veya uç sunucular arasındaki veri alışverişini yönetir [37]. Veri işleme katmanı, IoT cihazlarından toplanan verileri işler, depolar ve analiz eder. Veri toplama işlemi kenar, sis ve bulut gibi farklı seviyelerde gerçekleşir.



Şekil 3: Nesnelerin interneti mimarisi

4.1AKILLI BİNALARDA IOT UYGULAMALARI

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi, akıllı binalarda enerji yönetimi, güvenlik, alan kullanımı ve bakım süreçlerini önemli ölçüde geliştirmektedir.

- Enerji Yönetimi:
  Akıllı sayaçlar ve enerji izleme cihazları, enerji tüketim kalıplarını gerçek zamanlı olarak takip ederek bina işletmecilerinin enerji tasarrufu ve talep yönetimi için fırsatları belirlemesini sağlar. Toplanan verilerin analiz edilmesiyle, yük dengeleme (load balancing), tepe yük azaltımı (peak shaving) ve enerji yoğun görevlerin zamanlanması gibi stratejiler uygulanarak hem maliyetler düşürülür hem de çevresel etkiler azaltılır [37].
- Güvenlik:
  Akıllı binalarda güvenlik, IoT tabanlı izinsiz giriş algılama sensörleri, erişim kontrol sistemleri ve gözetim kameraları sayesinde artırılır. Bu cihazlar, merkezi izleme sistemlerine bağlı çalışarak, güvenlik ihlalleri veya yetkisiz giriş durumlarında gerçek zamanlı uyarılar ve bildirimler sunar. Bu sayede tehditlere hızlı yanıt verilebilir ve gerekli önlemler anında alınabilir [38].
- Kullanım Takibi (Occupancy Tracking):
  IoT tabanlı sistemler, binanın farklı bölgelerindeki doluluk oranlarını anlık olarak izleyebilir. Elde edilen bilgiler, mekânların daha verimli kullanılması, bina içi düzenlemelerin optimize edilmesi ve genel operasyonel verimliliğin artırılması için kullanılır.
- Öngörücü Bakım (Predictive Maintenance):
  IoT sensörleri, bina sistemleri ve ekipmanlarının performansını sürekli olarak izleyerek arıza belirtilerini ve anormallikleri erken aşamada tespit eder. Bu sayede bakım faaliyetleri zamanında ve hedefe yönelik olarak gerçekleştirilebilir; bu da sistem arızalarının önlenmesini, ekipman ömrünün uzatılmasını ve bakım maliyetlerinin azaltılmasını sağlar [39].

IoT teknolojilerinin akıllı binalarda kullanım alanları özetlenmiştir.

Akıllı Binalarda IoT Teknolojilerinin Uygulamaları: Literatür Taraması yapılmış olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Hernández-Ramos ve ark. [40] (2015) ARM uyumlu IoT güvenlik çerçevesi; bağlamsal verileri entegre ederek bina yönetimi ve güvenlik davranışlarını optimize eder.• City Explorer platformunda uygulanmış ve referans bir akıllı binada doğrulanmıştır.

• Enerji tasarrufu, hizmet keşfi ve yetkilendirme işlevlerini sağlar.

Shah & Mishra [41] (2016) Kişiselleştirilmiş, IoT uyumlu kablosuz algılama ve gözetim platformu • Otomatik binalarda bağıl nem, sıcaklık ve ışık seviyelerini izler.

• Günlük enerji tüketimini izleyerek konfor, güvenlik ve enerji tasarrufu sağlar.

Lilis ve ark. [42] (2017) IoT'nin akıllı bina gelişiminde kullanıcı odaklı yaklaşımlar ve enerji şebeke hizmetleriyle entegrasyonu • Mevcut otomasyon teknolojilerinin gücünü yeni gelişmelerle birleştirerek gelişmiş bina yönetim sistemleri sağlar.

Plageras ve ark. [43] (2018) Bulut bilişim, IoT ve büyük veri entegrasyonu • Sensörlerden elde edilen veriler, bulut sunucular aracılığıyla uzaktan yönetilebilir.

• Düşük enerji tüketimli ve çevre dostu akıllı bina çözümleri sunar.

Jia ve ark. [44] (2019) Farklı bina bileşenlerine entegre edilmiş IoT ve bağlantılı işlevsel varlık ağı • IoT destekli akıllı çevre, nesnelerin çevrelerini algılamasını ve kullanıcılarla etkileşim kurmasını sağlar.

• Bireylerin karar alma süreçlerini destekler.Metallidou ve ark. [45] (2020) Dağıtık enerji sistemlerine IoT entegrasyonu • Zaman alıcı işlemleri azaltır, bina enerji performans verilerini bulut platformunda depolar.

• Enerji verimliliği sağlar, israfı azaltır ve çevresel koşulları iyileştirir.Arun Kumar ve ark**.** [46] (2021)CoAP ve Datagram Transport Layer Security (DTLS) protokolleriyle IoT tabanlı akıllı bina mimarisi • DTLS'in SHA-256 algoritmasıyla entegrasyonu güvenliği artırır.

• CoAP kullanımı ile enerji tüketimi %30,86 oranında azaltılır; MQTT'ye göre daha verimlidir.Tarun Kumar ve ark. [47] (2022) IoT tabanlı kablosuz algılama sistemleri • DesignBuilder V7'de EnergyPlus simülatörü kullanılarak bina enerji modeli oluşturulmuştur.

• Özel tasarım CO_2 sensörü ile kullanıcı verileri toplanarak enerji tüketimi ve çevresel etkiler azaltılır.Krishnan ve ark. [48] (2023) Akıllı binalarda enerji tasarrufu sağlamak için IoT sensörleri • Güç tüketimindeki anormallikler tespit edilip otomatik veya manuel olarak yönetilir.

• Akıllı binalarda sürdürülebilir kalkınmayı destekler.Bu çalışmalar, IoT teknolojilerinin akıllı bina sistemlerinde güvenlikten enerji yönetimine, kullanıcı konforundan sürdürülebilirliğe kadar geniş bir yelpazede etkin biçimde uygulandığını göstermektedir. Çalışma bu teknolojilerin yıllar içindeki gelişimini ve artan etki alanını da yansıtmaktadır.

Akıllı bina sistemlerinde kullanılan çeşitli IoT teknolojileri; ARM uyumlu IoT güvenlik çerçeveleri, kişiselleştirilmiş kablosuz algılama ve izleme platformları ve büyük veri ile bulut bilişim sistemleriyle entegrasyon gibi bileşenleri içermektedir. Bu teknolojilerin uygulama alanları enerji verimliliği, güvenlik, kullanıcı konforu ve çevresel koşulların iyileştirilmesinden, akıllı karar süreçlerinin desteklenmesine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

IoT entegrasyonu sayesinde akıllı binalar, gerçek zamanlı doluluk durumu ve dış çevre koşullarına göre ayarlarını dinamik olarak optimize edebilir, bu da enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. Aynı zamanda gelişmiş bina yönetim sistemleri, anlık veri toplama ve analiz imkânı sunarak daha güvenli, enerji verimli ve akıllı bina mimarilerinin gelişmesini destekler.

4.2. ENERJİ VERİMLİLİĞİ, KULLANICI KONFORU VE EMİSYON AZALTIMI AÇISINDAN IOT TABANLI BAS'IN ROLÜ

IoT tabanlı Bina Otomasyon Sistemleri (BAS), akıllı binaların enerji gereksinimlerine, doluluk kalıplarına ve çevresel koşullara gerçek zamanlı olarak uyum sağlamasına olanak tanır. Bu sistemlerde kullanılan IoT sensörleri; sıcaklık, nem, doluluk durumu ve enerji tüketimi gibi verileri toplayarak, sistemlerin verimlilik ve konforu artırmak amacıyla otomatik kararlar almasına ve kontrol stratejilerini uygulamasına olanak verir [49,50].

Ayrıca, IoT destekli BAS sistemleri, bina kontrolünü esnek ve uyarlanabilir hale getirir. Böylece bina yöneticileri, sistemlerini gelişen ihtiyaçlara ve teknolojilere uygun şekilde optimize edebilir. IoT bağlantılı cihazlar sayesinde uzaktan izleme ve kontrol sağlanarak performans artırılır, bakım maliyetleri düşürülür ve bina ekipmanlarının ömrü uzatılır [50].IoT tabanlı Bina Otomasyon Sistemleri (BAS), sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle aşağıda belirtilen başlıca katkılar üzerinden sürdürülebilirliğe olan etkileri somut şekilde ortaya koyulmaktadır:

- Enerji verimliliğinin artırılması ve enerji tasarrufu sağlanması: IoT destekli BAS, gerçek zamanlı izleme ve dinamik kontrol mekanizmaları ile enerji tüketimini optimize ederek gereksiz kaynak kullanımını önlemektedir.

- Kullanıcı konforunun ve yaşam kalitesinin iyileştirilmesi: Ortam koşullarına ve kullanıcı tercihine duyarlı sistemler, iç mekân çevre kalitesini ve bireysel konforu artırmaktadır.
- Karbon emisyonlarının azaltılması: Enerji kullanımındaki verimlilik artışı, fosil yakıt kaynaklı karbon salınımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

Dolayısıyla IoT tabanlı BAS sistemleri, yalnızca bina operasyonlarının etkinliğini ve verimliliğini artırmakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda enerji, çevre ve yaşam kalitesi alanlarında bütüncül bir dönüşümün temel bileşenini oluşturmaktadır. Bu sistemlerin entegrasyonu sayesinde daha akıllı, kaynak dostu ve çevresel etkileri minimize edilmiş binaların inşası mümkün hâle gelmektedir.

5. SONUÇ

Bu derleme çalışması, IoT tabanlı Bina Otomasyon Sistemlerinin (IoT-BAS) sürdürülebilir bina otomasyonu yöntemlerine geçişte oynadığı hayati rolü analiz etmektedir. Yapılan kapsamlı inceleme, IoT destekli BAS sistemlerinin gelişmiş izleme ve kontrol mekanizmaları aracılığıyla enerji verimliliğini önemli ölçüde artırdığını, kullanıcı konforunu iyileştirdiğini ve CO2 emisyonunu azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, kullanıcı tercihleri ve çevresel koşullara uyum sağlayabilen gelişmiş, bağlam farkındalığına sahip teknolojiler, kişiselleştirilmiş konforu ve iç mekân çevre kalitesini büyük ölçüde artırmaktadır. Bu çalışma, IoT-BAS sistemlerinin enerji verimliliği, konfor ve sürdürülebilirlik açısından bütüncül bir değerlendirmesini sunmaktadır. Ayrıca, IoT-BAS entegrasyonunda karşılaşılan birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik gibi temel zorluklara da değinilerek, standartlaştırılmış iletişim protokolleri, güçlü siber güvenlik çerçeveleri ve hibrit bulut-kenar mimarileri gibi pratik çözüm önerileri sunulmuştur. Bu stratejiler, sistemin esnekliğini, güvenliğini ve ölçeklenebilirliğini geliştirerek IoT-BAS sistemlerini modern akıllı bina ihtiyaçlarına daha dayanıklı ve uyarlanabilir hale getirmektedir.

Özellikle, bu derleme çalışması, enerji optimizasyonu, kullanıcı odaklı otomasyon ve sürdürülebilirlik hedefleri için IoT tabanlı BAS sistemlerini tek bir çatı altında kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Güncel gelişmeleri sentezleyerek, araştırma boşluklarını tespit ederek ve entegre çözüm önerileri sunarak, IoT tabanlı BAS sistemlerinin gelecekteki gelişimi için açık bir yol haritası sağlamaktadır. İlerleyen süreçte, mevcut zorlukların üstesinden gelebilmek ve IoT tabanlı BAS sistemlerinin sunduğu büyük potansiyelden tam anlamıyla faydalanabilmek için araştırma ve yenilik çalışmaları kaçınılmazdır. Bu bağlamda, gelecekteki araştırmaların, yapay zeka destekli otonom BAS sistemlerine, açık kaynaklı çerçeveler aracılığıyla birlikte çalışabilirliğin artırılmasına ve blok zinciri

tabanlı gelişmiş siber güvenlik mekanizmalarının inşasına odaklanması gerekmektedir. Koordineli çabalar ve stratejik entegrasyon yaklaşımları ile IoT, bina otomasyonunu dönüştürme ve daha akıllı, sürdürülebilir ve dirençli binaların kapısını aralama potansiyeline sahiptir.

KAYNAKÇA

[1] Buildings - Energy System - IEA,.

[2] Y. Chen, Z. Ren, Z. Peng, J. Yang, Z. Chen, Z. Deng, Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption, J. Build. Eng. 78 (2023) 107646,

[3] S. van Roosmale, A. Audenaert, J. Meysman, Understanding the opportunities and challenges of building automation and control systems to support facility management – an extensive literature review, Facilities 42 (7/8) (2024) 677–693,

[4] B. Meerbeek, M. te Kulve, T. Gritti, M. Aarts, E. van Loenen, E. Aarts, Building automation and perceived control: a field study on motorized exterior blinds in Dutch offices, Build. Environ. 79 (2014) 66–77,

N. Sivasankari and P. Rathika Journal of Building Engineering 104 (2025) 112347 21

[5] B. Gunay, W. Shen, C. Yang, Characterization of a building's operation using automation data: a review and case study, Build. Environ. 118 (2017) 196–210,

[6] P. Stluka, G. Parthasarathy, S. Gabel, T. Samad, Architectures and algorithms for building automation—an industry view, in: J. Wen, S. Mishra (Eds.),Intelligent Building Control Systems. Advances in Industrial Control, Springer, Cham, 2018, https://doi.org/10.1007/978-3-319-68462-8_2.

[7] V. Graveto, T. Cruz, P. Simoes, ¨ Security of building automation and control systems: survey and future research directions, Comput. Secur. 112 (2022) 102527,

https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102527.

[8] P. Domingues, P. Carreira, R. Vieira, W. Kastner, Building automation systems: concepts and technology review, Comput. Stand. Interfac. 45 (2016) 1–12,

https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.11.005.

[9] ASHRAE — American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Proposed Addendum Ar to Standard 135-2010, BACnet — A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks, 2010.

[10] ISO/IEC 14908-1, Information Technology — Control Network Protocol — Part 1, 2012.

[11] I.V. Sita, P. Dobra, KNX building automations interaction with city resources management system, Procedia Technology 12 (2014) 212–219, https://doi.org/ 10.1016/j.protcy.2013.12.477.

[12] MODBUS, Application Protocol Specification V1.1b32012, 2012.

[13] Georgios Lilis, Gilbert Conus, Nastaran Azadi, Kayal Maher, Towards the next generation of intelligent building: an assessment study of current automation and future IoT based systems with a proposal for

transitional design, Sustain. Cities Soc. –28 (2017) 473–481, https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.019.

[14] H.N. Rafsanjani, A. Ghahramani, Towards utilizing internet of things (IoT) devices for understanding individual occupants' energy usage of personal and shared appliances in office buildings, J. Build. Eng. 27 (2019) 100948, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100948.

[15] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, Marimuthu Palaniswami, Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions, Future Gener. Comput. Syst. 29 (7) (2013) 1645–1660, https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010. ISSN 0167-739X.

[16] Arun Kumar, Sharad Sharma, Nitin Goyal, Aman Singh, Xiaochun Cheng, Parminder Singh, Secure and energy-efficient smart building architecture with emerging technology IoT, Comput. Commun. 176 (2021) 207–217, https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.06.003. ISSN 0140-3664.

[17] F. Zafari, I. Papapanagiotou, K. Christidis, Microlocation for internet-of-things-equipped smart buildings, IEEE Internet Things J. 3 (1) (2016) 96–112, https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2442956.

[18] R.A. Rizi, Occupants' migration in residential buildings towards comfort and energy efficiency (case of traditional residential architecture in Iran), J. Hous.Built Environ. 37 (2022) 179–211, https://doi.org/10.1007/s10901-021-09829-w.

[19] R.A. Rizi, A. Eltaweel, A user detective adaptive facade towards improving visual and thermal comfort, J. Build. Eng. 33 (2020) 101554, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101554.

[20] A. Tabadkani, M. Haddadi, R.A. Rizi, et al., A hierarchical multi-purpose roller shade controller to enhance indoor comfort and energy efficiency, Build. Simul.16 (2023) 1239–1256, https://doi.org/10.1007/s12273-023-1003-7.

[21] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, Zero Energy Building – a review of definitions and calculation methodologies, Energy Build. 43 (4) (2011) 971–979, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022. ISSN 0378-7788.

[22] F. Kazemi, T. Shafighfard, D.Y. Yoo, Data-driven modeling of mechanical properties of fiber-reinforced concrete: a critical review, Arch Computat Methods Eng 31 (2024) 2049–2078, https://doi.org/10.1007/s11831-023-10043-w.

[23] T. Shafighfard, F. Kazemi, N. Asgarkhani, D. Yoo, Machine-learning methods for estimating compressive strength of high-performance alkali-activated concrete, Eng. Appl. Artif. Intell. 136 (2024) 109053, https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109053.

[24] J.H. Elliott, A. Synnot, T. Turner, M. Simmonds, E.A. Akl, S. McDonald, G. Salanti, J. Meerpohl, H. MacLehose, J. Hilton, D. Tovey, I. Shemilt, J. Thomas,T. Agoritsas, J. Hilton, C. Perron, E. Akl, R. Hodder, C. Pestridge, L. Pearson, Living systematic review: 1. Introduction—the

why, what, when, and how, J. Clin.Epidemiol. 91 (2017) 23–30, https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2017.08.010.

[25] J. Davis, K. Mengersen, S. Bennett, L. Mazerolle, Viewing systematic review and meta-analysis in social research through different lenses, SpringerPlus 3(2014) 511, https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-511.

[26] S. Yoon, In situ modeling methodologies in building operation: a review, Build. Environ. 230 (2023) 109982, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109982.

[27] N. Zaeri, A. Ashouri, H.B. Gunay, T. Abuimara, Disaggregation of electricity and heating consumption in commercial buildings with building automation system data, Energy Build. 258 (2022) 111791.

[28] K. Lohia, Y. Jain, C. Patel, N. Doshi, Open communication protocols for building automation systems, Procedia Comput. Sci. 160 (2019) 723–727, https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.020.

[29] Sergio Leal, Gerhard Zucker, Stefan Hauer, Florian Judex, A software architecture for simulation support in building automation, Buildings 4 (3) (2014) 320–335, https://doi.org/10.3390/buildings4030320.

[30] Joao Figueiredo, Jo˜Martins, Energy production system management – renewable energy power supply integration with building automation system, Energy Convers. Manag. 51 (6) (2010) 1120–1126, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.020.

[31] J. Bhatt, H. Verma, Design and development of wired building automation systems, Energy Build. 103 (2015) 396–413, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.054.

[32] M. Schmidt, M.V. Moreno, A. Schülke, K. Macek, K. Ma˘rík, A.G. Pastor, Optimizing legacy building operation: the evolution into data-driven predictive cyberphysical systems, Energy Build. 148 (2017) 257–279, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.002.

[33] P. Aparicio-Ruiz, E. Barbadilla-Martín, J.M. Salmeron-Liss ´ ´en, J. Guadix-Martín, Building automation system with adaptive comfort in mixed mode buildings,Sustain. Cities Soc. 43 (2018) 77–85, https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.028.

[34] T. O'Grady, H.Y. Chong, G.M. Morrison, A systematic review and meta-analysis of building automation systems, Build. Environ. 195 (2021) 107770, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107770.

[35] G. Qiang, S. Tang, J. Hao, L. Di Sarno, G. Wu, S. Ren, Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: a critical review and future directions, Renew. Sustain. Energy Rev. 179 (2023) 113301, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113301.

[36] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions, Future Gener. Comput. Syst. 29(7) (2013) 1645–1660, https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010.

[37] Q. Sun, et al., A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks, IEEE Internet Things J. 3 (4)

(2016) 464–479, https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2512325.

[38] M. Ammar, G. Russello, B. Crispo, Internet of Things: a survey on the security of IoT frameworks, J. Inf. Secur. Appl. 38 (2018) 8–27, https://doi.org/10.1016/j.jisa.2017.11.002.

[39] P. Krishnan, A.V. Prabu, S. Loganathan, S. Routray, U. Ghosh, M. AL-Numay, Analyzing and managing various energy-related environmental factors for providing personalized IoT services for smart buildings in smart environment, Sustainability 15 (8) (2023) 6548, https://doi.org/10.3390/su15086548.

[40] J.L. Hern´andez-Ramos, M.V. Moreno, J.B. Bernab´e, D.G. Carrillo, A.F. Skarmeta, SAFIR: secure access framework for IoT-enabled services on smart buildings, J. Comput. Syst. Sci. 81 (8) (2015) 1452–1463, https://doi.org/10.1016/j.jcss.2014.12.021.

[41] J. Shah, B. Mishra, Customized IoT enabled wireless sensing and monitoring platform for smart buildings, Procedia Technology 23 (2016) 256–263, https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.025.

[42] G. Lilis, G. Conus, N. Asadi, M. Kayal, Towards the next generation of intelligent building: an assessment study of current automation and future IoT based systems with a proposal for transitional design, Sustain. Cities Soc. 28 (2017) 473–481, https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.019.

[43] A.P. Plageras, K.E. Psannis, C. Stergiou, H. Wang, B. Gupta, Efficient IoT-based sensor BIG Data collection–processing and analysis in smart buildings, Future Gener. Comput. Syst. 82 (2018) 349–357, https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.082.

[44] M. Jia, A. Komeily, Y. Wang, R.S. Srinivasan, Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: a review of enabling technologies and applications, Autom. ConStruct. 101 (2019) 111–126, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.023.

[45] C.K. Metallidou, K.E. Psannis, E.A. Egyptiadou, Energy efficiency in smart buildings: IoT approaches, IEEE Access 8 (2020) 63679–63699, https://doi.org/10.1109/access.2020.2984461.

[46] A. Kumar, S. Sharma, N. Goyal, A. Singh, X. Cheng, P. Singh, Secure and energy-efficient smart building architecture with emerging technology IoT, Comput. Commun. 176 (2021) 207–217, https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.06.003.

[47] T. Kumar, R. Srinivasan, M. Mani, An emergy-based approach to evaluate the effectiveness of integrating IoT-based sensing systems into smart buildings, Sustain. Energy Technol. Assessments 52 (2022) 102225, https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102225.

[48] P. Krishnan, A.V. Prabu, S. Loganathan, S. Routray, U. Ghosh, M. AL-Numay, Analyzing and managing various energy-related environmental factors for providing personalized IoT services for smart buildings in smart environment, Sustainability 15 (8) (2023) 6548, https://doi.org/10.3390/su15086548, 2023.

[49] M. Kong, B. Dong, R. Zhang, Z. O'Neill, HVAC energy savings, thermal comfort and air quality for occupant-centric

control through a side-by-side experimental study, Appl. Energy 306 (2022) 117987, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117987.

[50] F.S. Hafez, B. Sa'di, M. Safa-Gamal, Y. Taufiq-Yap, M. Alrifaey, M. Seyedmahmoudian, A. Stojcevski, B. Horan, S. Mekhilef, Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research, Energy Strategy Rev. 45 (2023) 101013, https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101013.

PLC OTOMASYON SİSTEMLERİNİN ÖNLEYİCİ BAKIMI İÇİN DİJİTAL İKİZİNİN OLUŞTURULMASI

Mehmet Erdal ÖZBEK[1], Kamil ÇETİN[1], Bilge Kartal ÇETİN[3], Çağdaş KARATAŞ[2], Savaş ŞAHİN[1], Cornelia I. BADOI[4]

[1]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

35620, Çiğli, İzmir, Türkiye

{merdal.ozbek,kamil.cetin,savas.sahin}@ikcu.edu.tr,

[2]Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

35620, Çiğli, İzmir, Türkiye

cagdas.karatas@ikcu.edu.tr,

[3]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi

35100, Bornova, İzmir, Türkiye

bilge.kartal@ege.edu.tr,

[4]Telecommunications, The National University of Science

and Technology Politehnica Bucharest

Bükreş, Romanya

cornelia.badoi@upb.ro

Özet: *Dijitalleşme ve yapay zekâ çağının başlangıcında olmamız nedeniyle hem günümüz sık kullanılan araçlarının dijitalleşmesinin getirdiği hizmetler, hem de yapay zekâ ya da makine öğrenmesi ve derin öğrenme araçlarının sağladığı kolaylıklar gün geçtikçe artmaktadır. Nesnelerin interneti gibi diğer gelişen bilgi teknolojilerinin de katkısı, uygulanabilirliği ve yaygınlaşması da bu artışa ivme kazandırmaktadır. Endüstride kullanılan makinelerin algılayıcılar, eyleyiciler ve akıllı cihazlar ağı aracılığı ile birlikte çalışması, gerçek zamanlı birçok amaca yönelik verinin elde edilmesini ve iletilmesini sağlamaktadır. Bunlardan en bilinen programlanabilir lojik kontrolcüler (PLC) yerlerini bu akıllı cihazlara bırakmaktadır. Üretim aşamasında karşılaşılabilecek hataların önceden belirlenmesi ve önleyici bakım yapılabilmesi için bu akıllı cihazlar aracılığı ile toplanan veriler yapay zekâ aracılığı ile değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada laboratuvarımızda bulunan PLC cihazların dijital ikizleri aracılığı ile verilerinin alınması için yapılan çalışmalar özetlenmiş ve örnek veriler üzerinden incelenmiştir. Gelecekte bu yapının verileri incelenerek yapay zekâ kullanımı ile önleyici bakım yapılması planlanmaktadır.*

Anahtar kelimeler: *Dijital ikiz, endüstriyel nesnelerin interneti, akıllı fabrika, PLC, otomasyon sistemi, yapay zekâ*

1. GİRİŞ

Dijitalleşme ve yapay zekâ çağının henüz başlangıcında olmamız nedeniyle, kullandığımız elektronik sistemlerin yazılım araçlarıyla iç içe geçmesi her geçen gün artmaktadır. Bilgi teknolojilerinin dijitalleşmesi ve yaygınlaşması nedeniyle sağladıkları kolaylıklara, genellikle yapay zekâ olarak adlandırılan ancak temelinde makine öğrenmesi, derin öğrenme yapıları ve teknikleri bulunan teknolojiler de gün geçtikçe eklenmektedir. Bununla birlikte bilgisayarların artan işlem gücü, derin öğrenme teknikleri ile uyumlu donanımlar sayesinde bu yeni teknolojilerin çok karışık işlemleri eskisine göre çok daha kısa zamanda gerçekleştirebilmesine imkân tanımaktadır.

Fabrikalarda, üretim tesislerinde makinelerin kontrolü için geliştirilmiş bulunan programlanabilir lojik kontrolcüler (PLC), algılayıcılardan gelen verilerin okunması ve gerekli eyleyicilerin kontrolü ile giriş-çıkış ve izleme birimleri (SCADA) ile haberleşmenin sağlanması için kullanılmaktadır. Günümüzde artan veri boyutu ve gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde fabrika otomasyonunda endüstriyel gömülü bilgisayarlar (IEPC) kullanılması önerilmektedir. Bunun yanı sıra içinde bulunduğumuz Endüstri 4.0 olarak adlandırılan endüstri ilerleme aşaması, fiziksel dünyanın sanal ya da dijital birebir kopyasının oluşturulduğu dijital ikiz [1] kullanılmasına dayanmaktadır. Bu sayede üretim planlı, daha verimli ve akıllı hale getirilmektedir [2]. Üretimde ortaya çıkabilecek sorunların önlenebilmesi için önleyici bakım ve planlama yapılması dijitalleşmenin bir yan faydası olarak ortaya çıkmaktadır [3]. Ürünlerin dijital kimliklerinin oluşturulması ve dijital ürün pasaportu [4] aracılığı ile izlenebilmesine doğru giden bu aşamalardan önce, akıllı fabrika modelinin dijital ikizinin kullanımı önceki çalışmalarda [5] gösterilmiştir.

Bu çalışmada ise laboratuvarımızda bulunan PLC cihazlarından oluşturulan dijital ikizleri aracılığı ile bir ağ kurulması ve yapay zekâ ve bulut bilişim teknolojilerinin kullanılarak cihazlardan verilerin alınması ve değerlendirilmesi için yapılan çalışmalar özetlenmektedir.

Bu amaçla izleyen bölümde kısaca dijital ikiz ve PLC cihazlarımız tanıtılacaktır. Sonrasında PLC için elde edilen dijital ikiz ve senaryo örnekleri üzerinden elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır. Son bölümde ise sonuçlar değerlendirilip, gelecek çalışmalara yönelik değerlendirmeler yapılacaktır.

2. LİTERATÜR

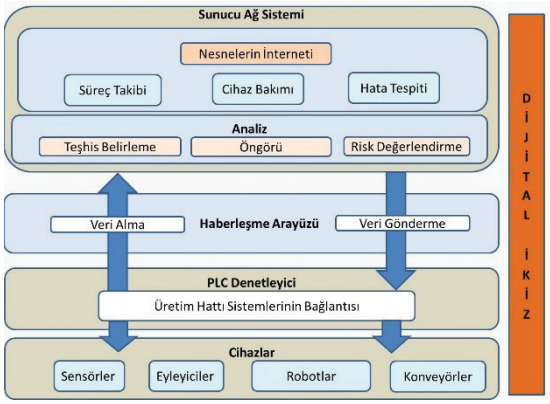
Dijital ikiz ilk olarak, fiziksel dünya, dijital olarak yaratılmış bir sanal ortam ve bu iki ortamı birleştiren veri/bilgi akışı mekanizmasının oluşturduğu üçlü bir yapı olarak tanımlanmıştır [1]. Modelleme amaçlı kullanılan bilgisayar destekli tasarım ya da üretim gibi yazılımlardan farklı olarak dijital ikiz gerçek zamanlı olarak sistemi tanımlamakta ve hatta o sistemin zamanla değişiminin izlenmesini de mümkün kılmaktadır [6]. Farklı işlemlerden veri alabilmeyi sağlayan algılayıcıların nesnelerin interneti (IoT), özellikle endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) destekli çözümleri, algılayıcıların akıllı hale gelmesinden yapay zekâ kullanılarak değerlendirilmesine kadar farklı destekleri içermektedir [7].

PLC'ler makine elemanlarının kontrolünü sağlayan temel elemanlardır. Fiziksel elemanlar arasındaki algılayıcılar, eyleyiciler, motor sürücüleri gibi bütün alt

sistemleri kontrol etmek ve verileri alıp iletmek yazılım kodlama ile yapılmaktadır [5]. Veri analizinin hem gerçek hem de sanal ortamda birlikte yapılabilmesi gerçek zamanlı davranışının bire bir benzerini (ikizini) oluşturmasından geçmektedir. Günümüzde ise IEPC denilen akıllı cihazlarla uç bilişim kullanılarak gerçek zamanlı verileri alıcılardan ve eyleyicilerden toplaması ve daha sonra yerelde, uçta, ya da bulutta değerlendirebilmesi mümkün hale gelmiştir. Dijital ikiz aracılığı ile kolaylıkla izlenebilen bu yapının üzerine yapay zekâ kullanımı ile birlikte verilerden anlamlı öngörüler çıkartmak, bu verileri gerçek zamanda çalışan sistemlere geri besleyerek sürekli bir iyileştirme sağlamak günümüz araştırma konularından birisi olarak öne çıkmaktadır. Gerçek şartların oluşturduğu verilerin yapay zekâ teknikleri kullanılarak değerlendirilmesi ve gerçek zamanlı iyileştirici, önceden önlem alınmasına ya da korunmaya yönelik önerilerde bulunulmasına zemin oluşturmaktadır. Bu ve benzeri nedenler ve gelişmeler göz önüne alınarak Avrupa Birliği 2021'de endüstriyel tasarım ve üretimde internet ve yapay zekâ çağının kullanıldığı, insan-makine etkileşiminin ilerleme yönü olarak ele alındığı beşinci endüstriyel devrimini (Endüstri 5.0) önermiştir [8].

3. PLC OTOMASYON SİSTEMLERİNİN DİJİTAL İKİZİNİN OLUŞTURULMASI

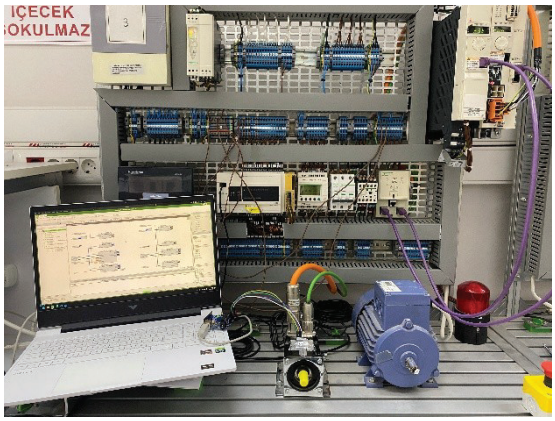
Çalışan bir sistemin dijital ikizinin gerçekleştirilmesi ile başlayan dijitalleşme aşamasında birçok arabirim ve akışın belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Şekil 1'de dijital ikiz kullanımı ile birlikte gerçekleştirilebilecek, önerdiğimiz otomasyon sistem yapısı blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. Akıllı fabrika otomasyon sistemi için önerilen sistem blok diyagramı

Bu yapıda en alt katmanda algılayıcılar, eyleyiciler ve fabrika içinde kullanılabilecek robotlar ve konveyörler gibi cihazlar, bir üst katmanda PLC denetleyicileri aracılığı ile üretim hattının birbirine bağlantısı sağlanmaktadır. Alıcı ve vericiler arasındaki veri akışını sağlayan haberleşme ara yüzü ile verilerin değerlendirilmesi gerçekleştirilerek analiz, öngörü ve risk değerlendirmeleri nesnelerin interneti aracılığı ile üst katmana iletilmiş olmaktadır.

Çalışmamızda Şekil 2'de verilen gösterimde laboratuvarımızda bulunan 9 adet PLC setlerinden birisi kullanılmıştır. Bu düzenek ile farklı senaryoları temsil etmek üzere algılayıcılardan titreşim verisi, ses verisi elde edilerek hız/ivme verileri hesaplanmıştır.

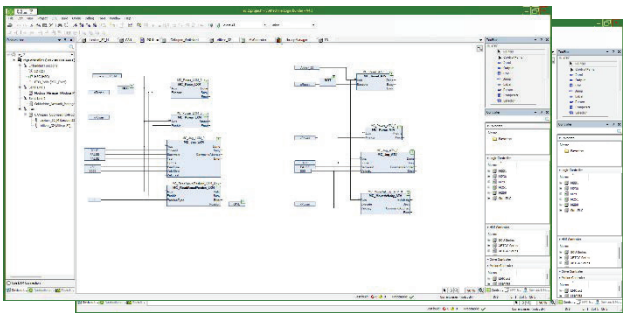


Şekil 2. PLC setinden veri elde edilme düzeneği

Bu amaçla öncelikle yüksüz bir şekilde (boşta) çalışan AC motor için 15 dakika boyunca farklı hızlarda dönerken (200, 500, 800 rpm) titreşim ve ses verileri toplanmıştır. Daha sonra, boşta çalışan servo motor için yine 15 dakika boyunca farklı hızlarda dönerken (600, 800, 1000 rpm) titreşim ve ses verileri toplanmıştır.

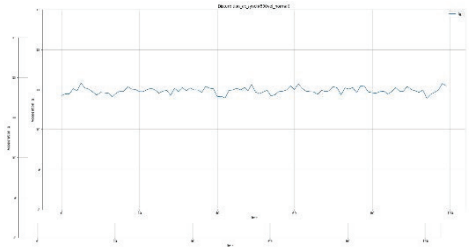
Titreşim verileri mpu6050 algılayıcısı ile Arduino üzerinden, ses verileri ise yarı profesyonel bir mikrofon aracılığı ile Audacity uygulaması kullanılarak kaydedilmiştir.

Şekil 3'te veri okuma ve kontrolcü bağlantıları örneği gösterilmektedir.

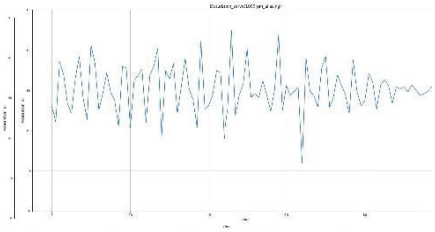


Şekil 3. Kontrolcü bağlantıları

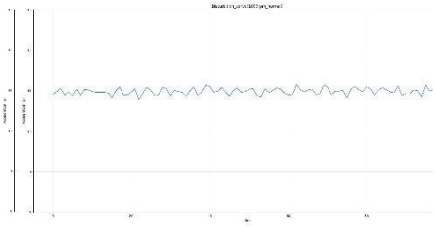
Şekil 4'te bu bağlantılar aracılığı ile elde edilen AC motorun 800 rpm ve servo motorun 1000 rpm hızında dönerken aldığı ivme değerlerini gösteren grafikler verilmektedir



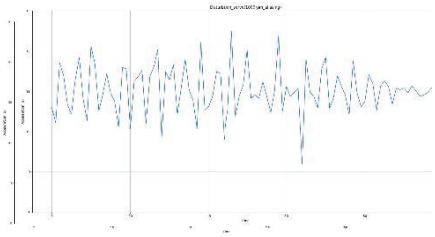
(a)



(b)



(c)

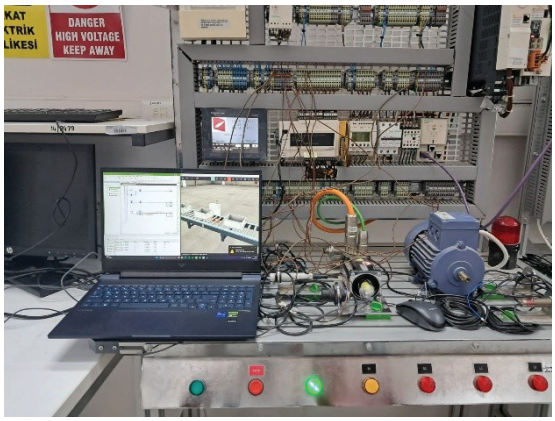


(d)

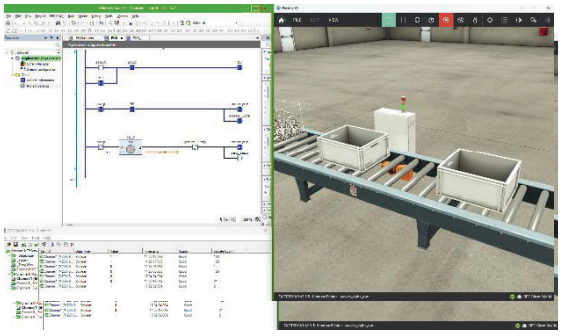
Şekil 4. AC motorun 800 rpm hızında elde edilen (a) normal ve (b) yüklü durumdaki ve servo motorun 1000 rpm hızında elde edilen (c) normal ve (d) yüklü durumdaki ivme değerlerinin değişimi

Grafiklerden üstteki grafikler normal dönüş durumunu gösterir iken, alttaki grafiklerde yüklü durumdaki ivme değerlerinde salınımın arttığı gözlemlenmektedir.

Bütün bu elde edilen değerler, fabrika otomasyonunun ve önerdiğimiz modelin temelinde yatan dijital ikizin kullanılması ile sağlanmaktadır. Şekil 5'te PLC seti üzerinde değişen/değiştirilen motor hızı, dijital ikizdeki konveyör hızını değiştirmektedir. Bu da Şekil 6'da gösterildiği gibi dijital ikiz aracılığı ile hem izlenebilmekte hem de kontrol edilebilmektedir.



Şekil 5. PLC seti ile dijital ikiz bağlantısı



Şekil 6. Dijital ikiz senaryosu

Şekil 6'da gösterilen dijital ikiz platformu sadece gerçek sistemin benzetimi amaçlı değildir. Aynı zamanda dijital ikiz kullanılarak yapılan değişiklikler (motor hızının değişimi, durdurma, çalıştırma, vb.) gerçek sisteme aktarılabilmektedir. Bu da dijital ikiz çalışmalarının en temel gerekliliği olan çift yönlü veri iletimi ve müdahalesini mümkün kılmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada akıllı fabrikanın işleyişinin temelini oluşturan dijitalleşmeye yönelik sistem önerimiz sunulmuştur. Dijital ikize dayalı bu sistemde fabrika makine ve motorlarının oluşturduğu titreşim ve ses verilerinin izlenmesi gerçekleştirilerek, olası senaryolarının oluşturulması sağlanmıştır.

Yapılan bu öncül çalışmalar, verilerin toplandıkça değerlendirilmesine yönelik çalışmaların hızlanmasına destek olmuştur. Endüstriyel nesnelerin interneti kullanımının desteklediği artan veri boyutu ve çeşitliliği sayesinde yapay zekânın kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Bir sonraki aşamada bu verilerden fabrikalarda önleyici bakım amacıyla faydalanılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2569 TÜBİTAK-MCID (Romanya) Uluslararası İkili İşbirliği Programı kapsamındaki "Digital Twins of a New Generation Industrial PLC-IoT Network for AI-based Predictive Factory Maintenance" başlıklı proje ile desteklenmektedir.

Proje kapsamında çalışan bursiyer öğrencilerimize teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] M. Grieves, “Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication”, White paper, 2014.

[2] M. E. Özbek, “Dijital ikiz: Akıllı fabrikalara giden yol”, ETUK 2023, 1-3 Kasım 2023.

[3] F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A. Y. C. Nee, "Digital twin in industry: State-of-the-art," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, April 2019.

[4] M. E. Özbek, “The age of digitalization in industry: From digital twins to digital product passport”, Journal of Artificial Intelligence and Data Science, vol. 4, no. 1, pp. 11–21, 2024.

[5] C. Kılıç, K. Çetin, and M. E. Özbek, “An industrial application of digital twin for a smart factory model using Copelliasim”, IJ3DPTDI, vol. 8, no. 3, pp. 316–325, 2024.

[6] E. VanDerHorn, S. Mahadevan, “Digital twin: Generalization, characterization and implementation”, Decision Support Systems, 145, 113524, 2021.

[7] Y. H. Son, G.-Y. Kim, H. C. Kim, C. Jun, S. D. Noh, “Past, present, and future research of digital twin for smart manufacturing”, Journal of Computational Design and Engineering, 9(1), pp. 1-23, 2021.

[8] Z. Lv, “Digital twins in Industry 5.0”, Research, 6: Article 0071, 2023.

ELEKTRİKSEL PROSES GÜVENLİĞİ

Mehmet Ferit PEKEROĞLU

ELPEK Mühendislik Elektriksel Periyodik Kontroller

peker@elpek.com.tr

ÖZET

Patlayıcı ortamlardaki elektrik tesisatlarının genel tasarım, kurulum, montaj, kullanım, fenni kontrol, işletme ve planlı bakımlarına dair usul ve esaslar, çeşitli global ve ulusal yasal düzenlenmelerde detaylı olarak tarif edilmektedir. Bu bağlamda, ülkemizde halihazırda yürürlükte bulunan İş Ekipmanlarının Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği kapsamında patlayıcı atmosferlerde yer alan ve dolayısıyla özel risk taşıyan elektriksel tüm ekipmanlara yönelik özel denetim kriterleri de bilahare mevcuttur. Patlayıcı ortamda kullanılan iş ekipmanlarının patlama riskini önleyecek vasıfta olması esastır.

Mezkur yönetmelik çatısı altında özellikle TSE EN 60079-14-17-19 seri standartlarına riayet edilerek patlayıcı atmosferlerde elektriksel proses güvenliği tesis edilmelidir. Ancak, ilgili standart hükümleri tek başlarına bir tesisin proses güvenliğini bütüncül şekilde kapsaması hususunda yeterli görülemez. Nitekim, yoğun patlayıcı atmosferlere sahip endüstriyel tesislerde proses güvenliği açısından elektrik kaynaklı risklerin ortadan kaldırılabilmesi için detaylı risk değerlendirmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur. Bu kapsamlı zaruret ile elektriksel proses güvenliği performansı için, en küçük elektrik tesisat bileşenlerine kadar erişim sağlanarak emniyetli atmosfer sağlanabilir.

Elektriksel risklerin tespiti ardından önleyici aksiyonların hızla devreye alınması gereklidir. Büyük endüstriyel tesislerde patlama risklerinin değerlendirilmesi, sadece exproof ekipmanların değerlendirmesine teslim edilemez.

Muhtemel arızaya ve/veya uygunsuzluğa sahip bir exproof ekipmanın sistemin tamamına cereyan edebilecek olumsuz etkilerinin değerlendirmesi mümkündür. Yanı sıra, tesisat kaynaklı hatalar, arızalar vd sorunların da ekipmana tesiri bilahare değerlendirilmelidir.

Elektriksel proses güvenliği yönetimi, endüstriyel tesislerde genel proses güvenliği açısından elektrik kaynaklı tehlikelerin muhtemel bir felaketin tetikleme unsurunun olmasının önüne geçme amacıyla alınacak tedbirlerin ve elektriksel güvenlik politikalarının belirlenmesi, uygulanması ve takibi sürecidir. İşletmelerde proses emniyeti kapsamında devamlılığın sağlanması, elektrifikasyon cephesinden eksiksiz değerlendirme ve modelleme uygulaması olan elektriksel proses güvenliği yönetimi, elektrik kaynaklı kazalar, parlama, patlama, yangın vd elektriksel risklerin önlenmesi amacıyla büyük önem taşımaktadır.

GİRİŞ

Ardışık yıllarda ulusal anlamda yaşanan kimya sanayi genelinde gerçekleşen büyük endüstriyel kazaların başlıca faili, elektrik tesisat ve bileşenleri olarak tarif edilebilir. Bu bağlamda, elektrik tesisat güvenliğinin ehemmiyeti hususunun özellikle patlayıcı kimyasallarla faaliyet gösteren ağır sanayi tesislerindeki önceliği devam etmektedir.

Patlayıcı kimyasallarla çalışma ortamlarına sahip büyük endüstriyel tesislerin patlama ve yangın tehditlerinin bertarafı amacıyla tüm işletme genelinde elektriksel risklerin detaylı tanım, tarif, takip, kontrol, denetim ve değerlendirmeleri yapılmalıdır.

Ülkemizde 25.04.2013 tarihinden bu yana yürürlükte olan İş Ekipmanlarının Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği'nin Ek-1 İş Ekipmanlarında Bulunacak Asgari Gerekler [1] bölümü dahilinde, elektriksel risk yönetimi ardışık birer cümle ile tartışmaya kapalı şeklini almıştır. Söz konusu ardışık iki önemli maddede tarif edildiği üzere;

- Bütün iş ekipmanları, ekipmanda üretilen, kullanılan veya depolanan maddelerin veya ekipmanın patlama riskini önleyecek özellikte olur.

- *Bütün iş ekipmanları, çalışanların doğrudan veya dolaylı olarak elektrikle temas riskinden korunmasına uygun olur.*

patlama, yangın, akıma kapılma vb risklere yönelik elektriksel bağlayıcılığı açıktır.

Kimya Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi tarafından hazırlanan endüstriyel yangınlar ve kimyasal patlamalara dair 2024 yılı için düzenlenen kaza sebep, etki, sonuç ve öneri raporu kapsamında yangın ve patlama vaka seviyelerinin son yedi yılın zirvesine erdiği görülmektedir. 2024 yılında yaşanan 720 endüstriyel yangın ve kimyasal patlama vakaları neticesinde maalesef 29 can kaybı yaşanmıştır. Bu durum, potansiyel risklere yönelik yeterli aksiyonların alınmadığını gözler önüne sermektedir. [2]

Son beş yıla ait mükerrer rapor istatistikleri sektörel anlamda analiz edildiğinde,

- Tekstil sektörü : %24
- Ağaç-kağıt sektörü : %22
- Metal sanayi : %18

dağılıma sahip olarak ilk üç öncü yangın ve patlama kaza liderliğinde değişim olmadığı tespit edilmektedir. Yanı sıra, atık bertaraf ve geri dönüşüm tesislerinde yangın başta olmak üzere yaşanan hadiseler de raporun %8'ine tekabül etmektedir. Depolama ve istif kusurlarının ardından ilk sırada yer alan elektriksel riskler, özellikle yangın olasılıklarını artıran asli kaza unsuru olarak kayıtlardaki yerini almaktadır.

Kazaların temel sebepleri incelendiğinde, rapor kapsamında endüstriyel yangınların beş temel nedeni:

- Yanıcı tozlar,
- Sıcak işler,
- Yanıcı sıvı ve gazlar,
- Hatalı ekipman ve makineler,
- Elektriksel tehlikeler

olarak sıralanmaktadır. Proses güvenliği, iş güvenliği, yangın güvenliği ve elektriksel güvenlik yetersizlikleri kaynaklı bu tip endüstriyel kazaların tekrarı gelmektedir.

NFPA – ABD Ulusal Yangından Korunma Kurumu verileriyle de örtüşen sebeplerin, muhtemel büyük yangın ve patlamaların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması adına özellikle kimya sanayi genelinde aksiyon ve tedbir süreçleri hızlandırmalıdır.

Patlamadan korunma amacıyla 30.04.2013 tarihli, 28633 sayılı Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik hükümlerince ilgili işletmeler, patlamadan korunma dokümanı hazırlamalı, tayin edilen kritik noktalara göre aksiyonlar alınmalıdır. [3]

Ancak, basma kalıp olarak düzenlenen çok sayıdaki pkd, proses güvenliğine katkı sağlamamaktadır. Tesis büyüklüğüne bakılmaksızın özellikle tüm kimya sanayi işletmeleri yangın ve patlama önlemlerini profesyonel yaklaşım dahilinde eksiksiz almakla yükümlüdür.

Proses güvenliğinin bekası için, elektriksel tüm tehditler tespit edilerek pkd kapsamına eklenmelidir. Profesyonel ve çözüm odaklı olarak hazırlanan bir patlamadan korunma dokümanı içinde elektriksel risklere yer verilmesi bir zorunluluk vasfı taşımaktadır. Nitekim, patlamanın tetikleme unsuru olan elektriksel risklerden, patlamadan koruma için hazırlanan bir dokümantasyonda yer almaması cahilane bir tutum olacaktır.

Patlamadan korunma dokümanı dahilinde hazırlanan zone haritalarının yanı sıra, tesis içindeki tüm elektrik tesisatlarının da genel proses güvenliği açısından elektriksel risk haritaları düzenlenmelidir. Elektrik tesisat ve bileşenlerinin tasarımı, doğru seçimi ve montajı, planlı bakımlarının yapılması ve periyodik kontrollerinin konusunda uzman elektrik mühendisleri tarafından denetime tabi tutulması ve sürecin kesintisiz takip edilmesi gerekmektedir. Kimya tesislerine ait patlamadan korunma dokümanlarını hazırlayan çokça personelin ezbere dayalı mükerrer hatası; elektriksel risklere dair

sadece topraklama ve statik elektrik uyarısı yapmalarıdır. Mamafih, yeterli değildir.

Büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve muhtemel etkilerinin azaltılması için tesis genelinde elektrik tesisatlarının tamamının risk olmaktan çıkarılması gerekmektedir.

Patlayıcı atmosferlere sahip bilahare büyük endüstriyel tesislerde patlamadan korunma ve elektriksel güvenlik profilinin önleyici aksiyonlarla alınması gerekliliği nettir. Bu sebeple işveren tarafından işletmenin olası kazalara karşı sorumluluğu da ayrıca tarif edilmiş olmaktadır. Nitekim, işyerinde iş ekipmanlarının kullanımı ile ilgili sağlık ve güvenlik yönünden uyulması gerekli asgari şartları belirlemek amacı ile hazırlanan mezkur yönetmelik hükümlerince,

- *işveren, işyerinde kullanılacak iş ekipmanının yapılacak işe uygun olması ve bu ekipmanın çalışanlara sağlık ve güvenlik yönünden zarar vermemesi için gerekli tüm tedbirleri alır.*

ifadesi ile sorumluluk tarifi de yapılmıştır. Ancak, doğrudan işverenin inisiyatifi dahilinde olsun ya da olmasın endüstriyel kazaların başlıca sorunlar silsilesi, bilirkişi değerlendirmeleri ile vaka sonrası çözüm yollarına kavuşabilmektedir. İşletmelerin mevcut güvenlik kültürü performansı ile alınabilen tedbirlerle muhtemel kaza ve kayıplar önlenebilir. Patlayıcı atmosferlere sahip endüstriyel tesislerde ancak ve ancak kaza öncesi emniyetli çalışma ortamlarının teminatı sağlanabilir. Endüstriyel kazalar ardından alınabilecek önlemler, daha çok çevresel boyut güvenliğine dair tesir eden unsurlar olmaktadır.

Asli olduğu kadar en önemli koruma disiplini, risklerin ortadan kaldırılarak kazaların önlenebilirliğidir. Bu hususta; tesis genelindeki risklerin eksiksiz şekilde tespit edilerek, kusursuz şekilde önlem alınması esastır.

Risk değerlendirmeleri kapsamında, temel risk başlıkları belirlenerek gruplandırmalar yapılmalıdır. Her meslek disiplinine dair risk grupları, ilgili konunun uzmanları tarafından detaylı değerlendirme ve çözüm analitiği gerçekleştirilmelidir. Nihai rapor ve/veya aksiyon planları ise multidisipliner görüşler alınarak, uyum çerçevesi içinde süreç planlanarak yönetilmelidir.

1. Proses Güvenliğinde Elektriksel Risk Değerlendirmenin Önemi

Standart risk değerlendirmelerinden farklı olarak, özellikle kimya sanayi genelinde çeşitli risk analizi metotları bulunmaktadır. Patlayıcı kimyasalların üretimi, depolama, işleme, elleçleme ve benzeri faaliyetlerin gerçekleştiği endüstriyel tesislerde genel iş güvenliği ve yangın güvenliğinin ötesinde, proses güvenliği oldukça büyük önem arz etmektedir.

Proses güvenliği, kimya sektörü genelinde üretim bazlı emniyetli çalışma ortamlarının sürekliliği amacıyla multidisipliner bakış açısı ile güvenli ideal tesislerin yaratılması esasına dayanır.

Patlama potansiyeline sahip kimyasallarla yapılan tüm iş ve işlemlerde elektriksel iş ekipmanlarının patlamaya dayanıklı olması gerekmektedir. Aksi halde kimya sanayide proses güvenliğinden söz etmek mümkün değildir. Nitekim, endüstriyel tesislerin en yoğun ekipmanları arasında elektrik tesisat ve bileşenleri baş rol üstlenmektedir. Bu sebeple, kimya tesislerinde elektriksel güvenliğin sağlanmaması ve/veya ihmal edilmesi durumlarında büyük endüstriyel kazaların geri sayım süreci başlamış olur.

Elektrik tesisatlarının tesis genelindeki risk mevcudiyeti, proses güvenliği açısından sadece konusunda uzman deneyimli elektrik mühendisleri tarafından eksiksiz analiz edilebilir. Nitekim, proses güvenliği yönetiminin çoklu meslek disiplinlerinden

yararlanmasının en önemli gerekçesi, ana bilim dallarının ilgili konunun uzmanlarına teslim edilmesidir.

Elektrik tesisatı ve bileşenlerinin riskleri, öncelikle tesisin eksiksiz tüm noktalarında yapılacak detaylı keşif, kontrol ve denetim sorgusuyla gerçekleştirilecek yol haritasına sahip olmalıdır. En küçük bir ihmal varsa, proses güvenliğinden söz edilemez.

Her zincir ancak zayıf halkası kadar güçlü olabilir düsturu ile proses güvenliğinden bahsedilebilir. Aksi durumda; minör olarak kabul gören muhtemel bir tehlike kaynağı, sistemin (tesisatın ve tesisin) majör kayıp kaynağı vasfına sahip olur. Proses emniyeti açısından elektriksel riskler kesinlikle göz ardı edilebilir bir unsur sayılamaz.

2. Proses Güvenliğinde ERA Elektriksel Risk Analizi

ERA Elektriksel Risk Analizi Modeli, endüstriyel tesisler için en büyük tehlike ve risk sınıfı olan elektriksel risklerin tespiti kontrol ve yönetimi konuları titizlikle incelenmektedir. Bu bağlamda, başta elektrik ve enerji sektörü olmak üzere, risk mühendisliği ve iş güvenliği dünyasının sistem analizlerinde destek ve kaynak olan ERA, endüstriyel tesislerin en önemli sorunlarına mühendislik tekniği ile çözüm olmaktadır.

ERA elektriksel risk analizi kapsamında, elektrik tesisatlarının muhtemel tehditleri ve nedensel faktörlerin belirlenmesi adına elektrik tehlike kaynaklarının kök neden analizi yapılarak mühendislik çözümleri üretilmesi için konusunda uzman ve deneyimli elektrik mühendisleri tarafından elektriksel teknik denetim, takip, kontrol ve teknik değerlendirmeler yapılarak fenni raporlamalar hazırlanmalıdır. Literatür çerçevesine hapsolmaksızın özgün olarak ilk ERA modülleri yılında ve risk matrisleri 2010 yılında hazırlanmıştır. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na ve bağlı yönetmeliklerin elektriksel maddelerini de kapsayacak şekilde güncellenmiştir. Yanı sıra güncel uluslararası standartlara da muhteviyatı kaynaklı cevap veren ERA Elektriksel Risk Analizi kapsamında, bilhassa endüstriyel tesislere yönelik dikkat edilmesi gereken elektriksel risklerden korunma hususunda: elektrik kaynaklı risklerden korunmak, mümkün olduğu kadarıyla elektrik tesisatı risklerini iyi analiz etmek, elektriksel risklere kaynağında yetkili müdahale etmek, elektrikle çalışmalarda kişilere uygun hale getirilmesi için işyerlerinde elektriksel güvenlik tasarımı ile elektrik işleri için doğru ekipman tercihi, çalışma şekli ve çalışma ortamı ile uygun elektriksel iş güvenliğinin tesisi, üretimi aksatmayacak nitelikte genel elektrik risk analizi çalışmalarının gerçekleştirilmesi, üretim faaliyetlerinin elektriksel iş güvenliği açısından sağlıklı ve emniyetli bir şekilde devamlılığının sağlanması, elektrik tesisat ve bileşenlerinin olumsuz etkilerini önleme ve en aza indirme için analizler barındırır.

Elektrik çarpması, akıma kapılma, elektrik kaynaklı yangınların meydana gelmesi, kısa devre durumları, muhtemel hata akımlarının meydana gelmesi durumlarına karşı toplu korunma tedbirleri esas alınarak, kişisel korunma tedbirlerine de önem vermek, çalışanlara uygun elektrikle ya da başka bir ifade ile enerji altında çalışma (canlı hatta) manevra talimatları düzenlemek, elektrikle çalışmalarda iş güvenliği teknik emniyet eğitimi ve elektriksel güvenlik kültürü eğitimleri ile devamlılığını sağlamak projenin uzun vadeli profesyonel desteğini oluşturur. [4]

ERA elektriksel risk analizi çalışmaları neticesinde, büyük endüstriyel tesislere ait elektrik tesisat ve bileşenlerinin genel elektrik risk unsurlarının değerlendirilme raporu ile çeşitli analitik önerilerin yanı sıra elektriksel planlı bakımlar kapsamı

hususunda da teknik dokümantasyonlar hazırlanabilir.

Elektrik, kimya, proses güvenliği ve enerji sektörleri kaynaklı teknik gelişmelere uyumlu mühendislik çözümleri sağlama, elektrik tehlike kaynaklarını ve bilahare kök sebeplerini doğru yorumlama, işyeri tehlike sınıflarına göre elektrik tesisat ve sistemleri için değişken tedbirlerin tespiti, elektrik kaynaklı yangın risklerinin belirlenmesi, elektriksel tehlike kaynakları ve ilgili risk faktörlerinin etkilerini kapsayan bir elektriksel önleme politikası geliştirilmesi ERA çalışmaları kapsamında yer almaktadır.

3. Proses Güvenliği İçin ERA Elektriksel Risk Analizi Modeli Uygulama Usulleri

Risk analizi yöntemleri kapsamında çok sayıda ve çeşitte risk matrisleri vb risk değerlendirme metotları bulunmaktadır. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği kapsamında literatürdeki bir risk değerlendirme metodunun kullanım gerekliliği yer alsa da, iş güvenliği ve çalışan sağlığı açısından risklerin tespitine ve akabinde önlenmesine yönelik herhangi bir engel bulunmamaktadır.

Literatür kısıtlamalarına takılmayan ERA Elektriksel Risk Analizi Modeli, yürürlükteki elektrik ana başlığı altındaki standartlar ve yönetmeliklerin yanı sıra yaşanmış elektrik kaynaklı iş kazalarının ve ramak kala gibi çeşitli veri desteği ile özgün bir yapıya sahiptir. Bu sebeple ERA, hazır matris ve standart (şiddet, olasılık ve frekans gibi) sıradan bir çarpma işlemi formülasyonu ile sınırlı değildir. Bu bağlamda iş güvenliği risk analizi bilimsel ve akademik çalışmalarını, ulusal ve uluslararası bilinen risk değerlendirme yöntemlerinin kabul edilmediği gibi bir anlam çıkarılmamalıdır.

ERA modeli, güvenlik kültürü bilincine sahip büyük endüstriyel tesislerde uzun yıllardır etkin çözümler sunmaktadır. İşletmelerdeki katma değerleri ve çeşitli kazanımları süregelen zaman içinde kendini ispatlamıştır. ERA Elektriksel Risk Analizi özetle, kimya sanayi tesislerinde de uygulanan özgün bir mühendislik risk değerlendirme modelidir. ERA, ülkemizde 2010 yılından bu yana yaklaşık yüz büyük endüstriyel tesiste uygulanmıştır.
Endüstriyel tesislerde elektrik kaynaklı risklerin tespiti ve önlenmesine yönelik çalışmaların referans noktası niteliği taşıyan ERA Elektriksel Risk Analizi Modeli, kantitatif ve kalitatif risk değerlendirme yöntemlerinin farklı bir karması gibi değerlendirilebilir.

Elektriksel risklerin bir tehdit unsuru olmaktan çıkarılması kapsamında konunun uzmanları tarafından uzun vadeli yüksek hassasiyet ve titizlikle yönetilen hassas bir çalışmadır. Bu bağlamda, işletmeler genelinde tüm çalışma alanlarında yapılan saha denetimleri ve elektriksel tehlikelerin tespit çalışmaları ardından risk analizi raporu aşamasına geçilir. Risk analizi raporları oldukça kapsamlı ve bilhassa işyerlerindeki iş güvenliği uzmanlarına (iş güvenliği profesyonellerine) oldukça büyük destek sağlamaktadır.

Çalışanların muhtemel elektriksel risklere karşı emniyetli bir çalışma atmosferinin yaratılmasının yanı sıra, işletme emniyetli üretim devamlılığına ve proses koşullarına da doğrudan ve dolaylı olarak katkılar sağlamaktadır. ERA Elektriksel Risk Analizi, güvenlik kültürü farkındalığına sahip ve bu hassas iş güvenliği bakış açısı ile işletme devamlılığını sürdüren tesislerde özellikle doğrudan işverenlerin, yöneticilerin, iş güvenliği uzmanlarının, üretim ve tesis müdürlerinin ve elektrik ekiplerinin amirliği görevini üstlenen tesis içindeki elektrik mühendislerinin yoğun destek talep ettiği bir uygulamadır.

Tesis içindeki işletme körlüğü (risklerin algılanamaması sorunu) diye tabir edilen 'risklerin görünmezliği'ne fırsat vermek istemeyen ve elektriksel iş güvenliğinin önemine hakim yetkililer için mühendislik çözümleri üretim imkanları sunmaktadır.

ERA, her ne kadar iştigal konusu farkı gözetmeksizin büyük endüstriyel tesisler, liman sahaları, hava meydanları, tehlikeli kimyasalların bulunduğu ya da işlendiği, üretildiği ve depolandığı tesisler, yeraltı maden ocakları dahil, özel tüm sektörel endüstriyel tesisler ve diğer işletmelerde uygulama modeli mümkündür. ERA'nın sonuçları, elektriksel kaza istatistiklerinin azalmasında da rol üstlenmektedir.

4. Elektriksel Proses Güvenliği Modeli

İş güvenliği kapsamında bir kazanın meydana gelme olasılığı yüksek olabilir, ancak beklenen olumsuz sonuçlar ve buna bağlı etkiler genel olarak düşük olabilir. Proses güvenliğinde ise durum çeşitli farklılıklar gösterir ve iş güvenliği kaza olasılıklarından daha istisna bir olasılık seviyesine sahiptir. Ancak muhtemel kaza ardından yaşananlar, kayıp ve zararlar özetle kaza etkileri felaket mertebesine erişebilir. Bu sebeple, mevcut prosesteki tüm donanımların ve sistem bütünlüğünün emniyetli şekilde devamlılığı sağlanmalı ve sürdürülebilirliği tesis edilmelidir.

Sistem bütünlüğündeki muhtemel bozulma ve/veya zarara uğrama olasılıkları yok edilmelidir. Tehlikeli kimyasalların üretildiği, depolandığı, işlendiği ve benzeri gibi faaliyet kapsamında sürekli etkileşim halinde bulunulan büyük endüstriyel tesislerde felaketlerin yaşanmaması adına o işletme için proses güvenliği en kıymetli hazinedir.

Ülkemizde Seveso direktifine göre ve 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile 2872 Sayılı Çevre Kanunu'na dayalı olarak hazırlanmış olan Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik proses güvenliği için önemli bir adımdır. [5]

Ancak, en büyük sorumluluk, görev ve gözetim hiç şüphesiz ilgili işletmenin kendisine aittir. Proses güvenliği açısından başlıca; güvenlik kültürü bilinci, yasal gereklilik ve standartlara uyum, işletmedeki çalışanın güvenlik politikasına ve kurum içi iş güvenliği talimatlarına uyumu, tedarik zinciri kapsamında paydaşların bilgilendirilmesi, proses yönetimi politikaları, güvenlik yetkinliği ve yeterliliği, tehlike ve risk analizi raporlamaları ve değerlendirmeleri, işletme genel güvenlik prosedürleri, proaktif bir yaklaşımla tesis edilmesi gereken güvenli çalışma pratikleri, tesis güvenilirliği, acil durum yönetimi, güvenlik eğitimleri, performans güvenliği, fenni muayene ve periyodik ölçümler, periyodik denetimler ve yenilenen süreç analizi çalışmaları bir döngü halinde devamlılık göstermelidir. Endüstriyel tesislerde proses kazalarını engellemek, ilgili tesisi ve yakın çevresindeki tesisleri de korumak demektir.

Patlayıcı kimyasalların proses genelindeki elektrik tesisatı ile olan yakınlığı, yalıtımı, uygunluğu, kullanım koşulları, kullanıcı bilgi, beceri ve yetkileri, kontrol, denetim ve bakım prosedürleri vb gibi çok sayıda değişkenin eş zamanlı değerlendirilmesi gerekir.

EPG Elektriksel Proses Güvenliği, büyük endüstriyel tesislerde genel proses güvenliği açısından elektrik kaynaklı tehlikelerin muhtemel bir felaketin tetikleme unsuru olmasının önüne geçme amacıyla alınacak tedbirlerin ve elektriksel güvenlik politikalarının belirlenmesi, uygulanması ve takibi sürecidir. Proses güvenliğine elektriksel bakış açısı ile ortaya çıkan bu kavram, 2019 yılından bu

yana geliştirilerek detaylı bir teknik uygulama projesine dönüşmüştür.

İşletmelerde proses emniyeti kapsamında devamlılığın sağlanmasına yönelik komple elektrifikasyon cephesinden detaylı şekilde değerlendirme ve modelleme uygulaması olan EPG Elektriksel Proses Güvenliği, özellikle kimya sanayi genelinde elektrik kaynaklı kazalar, parlama, patlama, yangın ve diğer elektriksel tüm risklerin önlenmesi çalışmasıdır.

İşletmenin proses güvenliğinin sağlanması ve devamlılığının tesisi için, patlamadan korunmanın yanı sıra elektrik kaynaklı yangınların önlenmesi ve muhtemel iş kazalarına karşı da önleyici aksiyonların planlandığı elektriksel tüm faaliyetlere yönelik bir güvenlik kalkanıdır.

EPG Elektriksel Proses Güvenliği Yönetimi kapsamında işletmenin genel proses akış şeması dikkate alınarak,

- Elektrik tesisat çizimleri,
- Elektriksel proses güvenliği tarifleri,
- Elektrik tesisat dizayn tasarım kullanım kriterlerinin belirlenmesi,

- Elektriksel güvenlik dokümanları ve diğer teknik güvenlik dokümanlarının hazırlanması,
- Elektrik mühendislik tesisat ve enerji panosu gibi çizimleri projeleri hesaplamalarının yapılması,
- Elektriksel proses ve ekipman tasarımı, ex ekipman seçimi

- Kimyasal bileşenlerle elektriksel unsurların muhtemel doğrudan veya dolaylı etkileşimlerine karşı risk analizi,
- Tehlikelerin belirlenmesi, risklerin önlenmesi için çözüm ve alternatiflerin değerlendirilmesi,
- Koruyucu elektriksel güvenlik sistemlerinin belirlenmesi,
- Elektriksel proses risk yönetim kararları,
- Elektrik exproof ekipmanların periyodik muayenesi ve atex uygunluk değerlendirmeleri,
- Elektriksel manevra ve çalışma ortamı talimatlarının hazırlanması,

- Arc flash analizi,
- Kuvvetli akım tesisatlarının güvenliği,
- Zayıf akım tesisatlarının güvenli kullanımı,
- Elektriksel periyodik kontrollerin denetimi ve yeterliliğinin analizi,

- Yüksek gerilim ve manyetik alan başta olmak üzere, statik elektrik etkileri,
- Topraklama yeterliliği,
- Akıma kapılma risklerinin önlenmesi,
- İzolasyon hatası analizleri,
- Elektrikle güvenli çalışma eğitimleri,
- Elektrik tesisatlarının uygulama kullanım ve müdahale uygunluklarının güvenlik analizleri de proje kapsamında irdelenmektedir.

SONUÇ

Kimya sanayinin başlıca en büyük korkusu olan patlama potansiyeline sahip alanlar ve bu alanlarda kullanılan elektrik tesisatları arasındaki kusursuz dengenin sağlanması için ATEX Direktifleri de dikkate alınarak proses güvenliği seviyesi her tesis için optimum seviyeye taşınmalıdır.

EPG elektriksel proses güvenliği yönetimi, muhtemel patlayıcı ortamlarda endüstriyel kazaların önlenmesi için tesis genelindeki tüm elektrik tesisatlarının ve bileşenlerinin emniyetli işletilmesi referansına dayanır. Patlayıcı atmosferlerde elektriksel emniyet sağlanması hususunda hiçbir engel yoktur. IEC 60079 seri standart hükümlerine de hakim elektrik mühendislerinin desteği ile kimya sanayi genelinde elektriksel proses güvenliği sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, 28628, 25 Nisan 2013
- Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik, T.C. Resmi Gazete, 28633, 30 Nisan 2013
- Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik, T.C. Resmi Gazete, 30702, 02 Mart 2019
- Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik
- Mavi Bilge Akademi – Patlayıcı Ortamlarda Elektriksel Güvenlik Eğitim Notları
- İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği
- Yasin PEKEROĞLU – İş Sağlığı ve Güvenliği Sözlüğü, Mavi Bilge Yayınları, 2015
- İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, 28512.
- İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik, T.C. Resmi Gazete, 28681.
- Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, 24246, 30 Kasım 2000.
- Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, Resmi Gazete, 24500, 21 Ağustos 2001.
- Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, T.C. Resmi Gazete, .
- IEC 60079-17, 2016. Patlayıcı Ortamlar, Bölüm 17: Elektrik tesisatlarının muayenesi ve bakımı (IEC 60079-17: 2013) Türk Standartları Enstitüsü.
- Büyük Endüstriyel Kazalarla İlgili Hazırlanacak Büyük Kaza Önleme Politika Belgesi Tebliği, T.C. Resmi Gazete, 30750.
- https://www.elpek.com.tr/

DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA TASARIM OPTİMİZASYONU

Doç. Dr. Ulaş KILIÇ, Nehir Değer

Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği

ulas.kilic@ege.edu.tr , nehirdeger974@gmail.com

Bornova, İZMİR, Temmuz 2025

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlanan "Dağıtım Transformatörlerinin Metasezgisel Algoritmalarla Tasarım Optimizasyonu" projesi sonuçlarını içermektedir. Proje süresince transformatör tasarım aşamaları incelenmiş ve optimum verimlilik, boyut, maliyet değerlerine ulaşmak hedeflenmiştir.

Tasarımda yenilikçi yöntemler kullanan ve sunan bu proje TUBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmektedir.

I.ÖZET

Dağıtım transformatörleri tasarımı karmaşık bir çoklu hedef optimizasyon problemidir. Büyük değişken arama alanı nedeniyle literatürde önerilen çoğu optimizasyon yöntemi küresel minimum yerine yerel minimumu bulma eğilimindedir. Bu problemi çözmek amacıyla IEC 60076 transformatör tasarım standartlarından gelen kısıtlarla MATLAB programı ortamında transformatör tasarımı için gerekli amaç fonksiyonları oluşturularak tasarım kurgulanmış sezgisel algoritmalar transformatörün amaç fonksiyonlarına entegre edilmiştir. Bu algoritmalar parçacık sürü, diferansiyel evrim ve genetik algoritmalarıdır. Bu algoritmalar için amaç fonksiyonları geliştirilmiştir. Tasarım değişkenlerinin alt ve üst limit değerleri, incelenen transformatörün güç aralığını sağlayacak şekilde genişletilmiştir. Bu çalışmada toplam 7 adet değişken kullanılmış ve diğer parametreler bu değişkenler üzerinden hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dağıtım Transformatörü, Optimizasyon, Sezgisel Algoritmalar, IEC 60076 Standartları

II. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ

Transformatörler, elektromanyetik indüksiyon prensibiyle çalışan toplam gücü sabit tutarak bir voltaj seviyesini başka bir voltaj seviyesine dönüştüren elektromekanik cihazlardır.

%98'in üzerinde verimliliklerde çalışan bu cihazlar güç sistemlerinin en önemli bileşenlerindendir. Transformatörler yüksek verimliliklerde çalışmalarına rağmen küçük kayıplar bile transformatörün çalışma ömrü boyunca toplandığında büyük enerji kayıplarına yol açmaktadır. Kaybolan bu enerjinin telafisi büyük ölçüde fosil yakıtlara bağlı olduğundan çevresel sonuçlar doğurmaktadır. Son dönemde teknolojinin hızlı gelişimi güvenilir, temiz ve sürekli enerjiye olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu sebeple transformatörlerden mümkün olan en yüksek verimlilik beklenmektedir.

Çok sayıda karmaşık denklem çözümü isteyen, birden fazla amaç fonksiyonu olan transformatör tasarımı zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu tasarım için hem teknik hem ekonomik kısıtlar dikkate alınmalıdır ve bu da birden fazla değişkenli denklemlerin çözümünü gerektirmektedir. Transformatör tasarımı yapan tasarım mühendisleri halihazırda ellerinde bulunan matematiksel formüllerle ve daha önce tasarlanan transformatörlerden gelen geri dönüşlerle tasarımları gerçekleştirmektedirler. Transformatör tasarımında kullanılan bu geleneksel yöntemler arama alanını daraltmaktadır ve optimum çözümlere ulaşmayı zorlaştırmaktadır.

Bu çalışma tasarımda geleneksel yöntemlerin aksine yenilikçi bir yöntem olan sezgisel algoritmalar kullanarak arama alanının genişletilmesini ve optimum çözümler bulunmasını bu sayede maliyet verimlilik optimum dengesini bularak hem ekonomik hem temiz, güvenilir bir tasarım elde etmeyi hedeflemektedir.

Transformatör tasarım optimizasyonu problemine yönelik literatür incelemesi, araştırmaların çoğunlukla geleneksel optimizasyon algoritmaları kullanılarak gerçekleştirildiğini göstermektedir. Sezgisel optimizasyon algoritmalarının temel avantajı, geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı yakınsamaları ve küresel optimum çözümlere ulaşabilme kabiliyetleridir. Son yıllarda, transformatör tasarım optimizasyonu alanında çeşitli metasezgisel algoritmaların uygulandığı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Alhan [1] çalışmasında, transformatör tasarım optimizasyonu için Rekabetçi-Uyarlamalı Diferansiyel Evrim (Competitive-Adaptive Differential Evolution), Guguk Kuşu Arama

(Cuckoo Search) ve Çiçek Tozlaşma Algoritması (Flower Pollination Algorithm) gibi modern metasezgisel algoritmaları karşılaştırmıştır. Sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiş ve önerilen yöntemlerin etkinliği kanıtlanmıştır. Benzer şekilde, Hashemi ve diğerleri [2] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması (Firefly Algorithm), Aritmetik Optimizasyon Algoritması (Arithmetic Optimization Algorithm), Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Grey Wolf Optimization) ve Yapay Goril Birlikleri Optimizatörü (Artificial Gorilla Troops Optimizer) kullanılarak dağıtım transformatörü tasarımı optimize edilmiştir. Zile [3] tarafından yapılan araştırmada ise Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony), Guguk Kuşu (Cuckoo Search) ve Çiçek Tozlaşma Algoritmaları kullanılarak güç transformatörü tasarımı gerçekleştirilmiştir. 1000 kVA, 1250 kVA ve 1600 kVA transformatörler için maliyet minimizasyonu ve verimlilik maksimizasyonu hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, önceki araştırmalarda sınırlı olarak kullanılan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Diferansiyel Evrim (DE) ve Genetik Algoritma (GA) algoritmalarının transformatör tasarım optimizasyonunda kapsamlı karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin yavaş yakınsama ve yerel optimumda sıkışma problemlerine alternatif olarak bu algoritmalar seçilmiştir, çünkü daha az parametre gerektirmekte ve daha hızlı yakınsama göstermektedir. Tek algoritma performansına odaklanan önceki çalışmaların aksine, üç farklı metasezgisel algoritmanın aynı problem üzerinde karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda sadece optimum çözümün değil, aynı zamanda yakınsama hızı, hesaplama süresi ve algoritma kararlılığı gibi performans göstergeleri de değerlendirilmiştir.

Önerilen hibrit MATLAB optimizasyon sisteminin literatürdeki önceki çalışmalara kıyasla öne çıkan özellikleri şu şekildedir. Sistem, dağıtım transformatörleri optimal tasarım için yenilikçi bir yaklaşım sunar ve sadece teknik ve tüketici kısıtlarını değil, aynı zamanda üretim kısıtlarını da dikkate alır. Literatürdeki basit kısıt işleme yöntemlerinin aksine geliştirilmiş bir ceza sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, kısıt yönetimini daha etkili hale getirip küresel optimuma yakınsamayı güçlendirir. Ayrıca tek bir optimizasyon çalıştırması yerine, $2\times2\times5 = 20$ farklı konfigürasyonda sistematik testler gerçekleştirerek algoritma güvenilirliğini istatistiksel olarak doğrular. Bu literatür değerlendirmesi sonucunda, mevcut çalışmanın transformatör tasarım optimizasyonu alanında metodolojik bir katkı sağladığı ve endüstriyel uygulamalar için pratik çözümler sunduğu görülmektedir.

III. TRANSFORMATÖR TASARIM PROBLEMİ

Bu sistem, IEC 60076 standartlarına uygun olarak dağıtım transformatörlerinin tasarım parametrelerini optimize etmek üzere, metasezgisel algoritmaların amaç fonksiyonlarıyla entegre edildiği bir optimizasyon platformu olarak geliştirilmiştir. Sistem, transformatörün aktif kısım maliyetini minimuma indirirken aynı anda verim, kayıplar ve sıcaklık artışı gibi performans kriterlerini de karşılamayı hedefler.

Çalışma prensibi, doğadan ilham alan metasezgisel algoritmaların geniş ve karmaşık çözüm uzayında küresel optimum çözümleri keşfetme becerisine dayanır; böylece geleneksel yöntemlerin çoğu zaman takılıp kaldığı yerel minimum tuzaklarını aşar. Transformatör tasarımı, çok sayıda tasarım değişkeni ve kısıtı içeren karmaşık bir, çok amaçlı optimizasyon problemidir. Bu çalışmada 630 kVA dağıtım transformatörü için aktif kısım maliyet minimizasyonu hedeflenmektedir.

Tasarım Değişkenleri	
A_core	Çekirdek bacak kesit alanı (cm²)
Turns_LV	Alçak gerilim sargı sarım sayısı
L_conductor	İletken uzunluğu (mm)
thickness	İletken kalınlığı (mm)
LV_cooling_channels	AG soğutma kanalı sayısı
HV_cooling_channels	YG soğutma kanalı sayısı
A_yoke	Boyunduruk kesit alanı (cm²)

Şekil 1/ Tasarım Değişkenleri

Amaç Fonksiyonu:

Transformatör tasarım optimizasyonunun amacı, tüm kısıtları sağlayarak aktif kısım maliyetini minimize etmektir:

Min_Maliyet: C_total = C_core + C_copper + C_oil + Cezalar

Burada:

- C_core: Çekirdek maliyeti = M_core × cost_core ($/kg)
- C_copper: Bakır maliyeti = M_copper × cost_copper ($/kg)
- C_oil: Yağ maliyeti = M_oil × oil_cost ($/L)

Tasarım Kısıtları:

Optimizasyon sürecinin IEC 60076 standartlarına uygun olması için aşağıdaki kısıtlar uygulanmıştır:

- Manyetik akı yoğunluğu kısıtı:
  $B_{calc} \leq B_{max} = 1.65$ Tesla
  $B_{yoke} \leq B_{max} = 1.65$ Tesla
- Akım yoğunluğu kısıtı:
  $J_{calc} \leq J_{max} = 3.2 \times 10^6$ A/m²
- Verimlilik kısıtı:
  $\eta \geq 0.98$
- Yüksüz kayıp kısıtı:
  $NLL \leq 1300$ W
- Toplam kayıp kısıtı:
  $P_{total} \leq 0.015 \times S_r$
- Ceza: Kısıt ihlali ceza fonksiyonları

Ceza Fonksiyonu Sistemi:

Kısıt ihlallerinin tamamen önüne geçmek için beş ana ceza bileşeni kullanılmıştır:

- Soğutma_cezası = max(0, heat_dissipation - cooling_capacity) × 100
- Core_kayıpları_cezası = max(0, NLL - 1300) × 10000
- Toplam_kayıplar_cezası = max(0, total_loss - max_total_loss) × 500

- Verimlilik_cezası = max(0, 0.98 - efficiency) × 100000

Elektromanyetik Hesaplamalar:

- Faraday Yasası:

B_calc = volts_per_turn / (4.44 × f × A_core)

- Sarım Oranı:

Turns_HV = Turns_LV × (V_HV / V_LV)

- Steinmetz Denklemi (Yüksüz Kayıplar):

Ph = Kh × f × B^n (Histerezis kaybı)

Pe = Ke × f² × t × B² (Eddy akımı kaybı)

NLL = (Ph + Pe) × (V_core × ρ_core)

- Yük Kayıpları:

Pcu = 3 × I² × R (Bakır kayıpları)

Pst = α × β × f² × B² × t (Kaçak kayıplar)

LL = Pcu + Pst

Bu matematiksel formülasyonlar, IEC 60076 standartlarına uygun, ekonomik ve teknik açıdan optimal transformatör tasarımını sağlamak için kapsamlı bir çerçeve oluşturmaktadır.

IV.METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZASYON

Diferansiyel Evrim (DE):

Storn ve ***Price*** tarafından 1995 yılında Differential Evolution tanıtıldı. DE algoritmasının temel bir çeşidi, aday çözümlerden (araçlar olarak adlandırılır) oluşan bir popülasyona sahip olarak çalışır.

- Yoke_flux_cezası = 10000 × max(0, |B_calc - B_yoke| - 0.1)

Optimizasyon sistemi MATLAB R2023a ortamında geliştirilmiş olup, bu platformun tercih edilme nedenleri arasında güçlü matematiksel hesaplama kabiliyeti, metasezgisel algoritmaların kolayca uygulanabilmesi, mühendislik uygulamalarında yaygın kullanımı, zengin grafik ve görselleştirme araçları sunması ve elektromanyetik hesaplamalarda yüksek güvenilirlik sağlaması yer almaktadır. Bu çalışmada oluşturulan amaç fonksiyonuna Parçacık Sürü, Genetik ve Diferansiyel Evrim sezgisel algoritmaları entegre edilmiştir.

A.Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO):

Parçacık sürü ***Kennedy*** ve ***Eberhart*** tarafından açıklanan algoritmaya dayanmaktadır ve ***Mezura-Montes*** ve ***Coello*** ve ***Pedersen*** tarafından önerilen değişiklikleri kullanmaktadır. Parçacık sürüsü algoritması, ilk parçacıkları oluşturarak ve onlara başlangıç hızlarını atayarak başlar. Her parçacık konumundaki amaç fonksiyonunu değerlendirir ve en iyi (en düşük) fonksiyon değerini ve en iyi konumu belirler. Mevcut hıza, parçacıkların bireysel en iyi konumlarına ve komşularının en iyi konumlarına dayanarak yeni hızlar seçer. Daha sonra parçacık konumlarını (yeni konum, eski konum artı parçacıkların sınırlar içinde kalmasını sağlayacak şekilde değiştirilen hızdır), hızları ve komşularını yinelemeli olarak günceller. Algoritma bir durdurma kriterine ulaşana kadar yinelemeler devam eder.

Bu aracılar, popülasyondaki araçların pozisyonlarını birleştirmek için basit matematiksel formüller kullanılarak arama alanında hareket ettirilir. Bir aracın yeni pozisyonu bir iyileştirme ise kabul edilir ve popülasyonun bir parçası haline gelir, aksi

takdirde yeni pozisyon basitçe atılır. İşlem tekrarlanır ve bunu yaparak sonunda tatmin edici bir çözümün keşfedilmesi umulur, ancak garanti edilmez.

Genetik algoritma (GA):

1950'de Alan Turing, evrim ilkelerine paralel olacak bir "öğrenme makinesi" önerdi. Evrimin bilgisayar simülasyonu, bilgisayarı New Jersey, Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde kullanan Nils Aall Barricelli'nin çalışmalarıyla 1954'te başladı. 1954'teki yayını geniş çapta fark edilmedi. 1957'de başlayarak, Avustralyalı kantitatif genetikçi Alex Fraser, ölçülebilir bir özelliği kontrol eden birden fazla lokuslu organizmaların yapay seçiliminin simülasyonu üzerine bir dizi makale yayınladı. Bilgisayar bilimi ve operasyon araştırmasında , genetik algoritma (GA), e vrimsel algoritmaların (EA) daha geniş sınıfına ait olan doğal seçilim sürecinden esinlenen bir metasezgidir
. Çaprazlama ve mutasyon gibi biyolojik olarak esinlenen operatörler aracılığıyla optimizasyon ve arama sorunlarına yüksek kaliteli çözümler üretmek için kullanılır . GA uygulamalarına bazı örnekler arasında daha iyi performans için karar ağaçlarının optimize edilmesi , sudoku bulmacalarının çözülmesi ,hiperparametre optimizasyonu ve nedensel çıkarım yer alır.

V. YAZILIM VE SİMÜLASYON BAZINDA ÇIKTILAR

630kVA yağlı tip transformatör için öncelikle MATLAB yazılım programında tasarım parametreleri, değişkenler ve fonksiyonlar tanımlanmıştır. İlk aşamada Metasezgisel algoritma olmadan MATLAB'in kendi optimizasyon fonksiyonu olan fmincon ile tasarım gerçekleştirilmiştir bu tasarımın çıktısı aşağıdaki görselde verilmiştir.

```
--- Optimizasyon Sonuçları ---
Optimum Çekirdek Kesit Alanı: 486.86 cm^2
Optimum AG Sarım Sayısı: 25.0
Optimum AG İletken Uzunluğu: 500.00 mm
Optimum AG İletken Kalınlığı: 260.00 mm
Optimum AG Soğutma Kanalı Sayısı: 4
Optimum YG Soğutma Kanalı Sayısı: 4
Optimum Boyunduruk (Yoke) Kesit Alanı: 435.86 cm^2
Minimum Aktif Kısım Maliyeti: 15287.85 $
--- Maliyet Dağılımı ---
Çekirdek Maliyeti: 7323.14 $
Bakır Maliyeti: 6618.86 $
Yağ Maliyeti: 1345.85 $
Toplam Aktif Kısım Maliyeti: 15287.85 $
--- Verimlilik ve Kayıplar ---
Verimlilik: 99.5169 %
Yüksüz Kayıplar (NLL): 1231.80 W
Yüklü Kayıplar (LL): 1826.57 W
Toplam Kayıplar: 3058.38 W
--- Boyutsal Parametreler ---
Çekirdek Bacak Çapı: 248.98 mm
Çekirdek Bacak Uzunluğu: 746.93 mm
Boyunduruk (Yoke) Uzunluğu: 1493.86 mm
Boyunduruk (Yoke) Genişliği: 29.18 mm
YG Sarım Sayısı: 2156.2
Trafo Toplam Yüksekliği: 1005.28 mm
Trafo Toplam Genişliği: 1793.86 mm
Trafo Toplam Derinliği: 1793.86 mm
fx >>
```

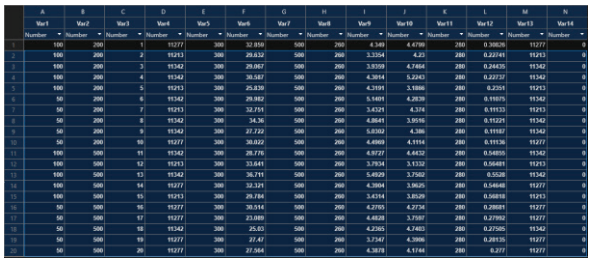
Şekil 2/Metasezgisel Algoritmalar Eklenmeden Önceki Tasarımın Sonuçları

Bu tasarım çıktısında öncelikle 7 adet değişkenimizin değerleri ardından maliyet dağılımı, verimlilik ve kayıp değerleri en son da ise boyutsal parametreler karşımıza çıkmış oldu.

- Verimlilik= %99.5169
- Minimum Aktif Kısım Maliyeti= 15287.85$
- Toplam Aktif Kısım Maliyeti= 15287.85$

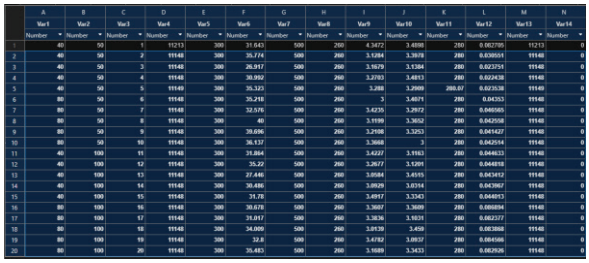
Ardından tasarımımıza DE, PSO ve GA metasezgisellerini entegre edip her bir algoritmalı tasarım 20 kere hesaplama yapacak şekilde ayarlanmış ve çıktılar matlabde excel dosyası olarak alınmıştır. Aşağıda algoritmalar çalıştırıldıktan sonra oluşturulan excel çıktısının görselleri bulunmaktadır.

Parçacık Sürü Algoritması (PSO):



Şekil 3/ PSO Eklendikten Sonra Tasarım Sonuçları

Genetik Algoritma (GA):



Şekil 4/ GA Eklendikten Sonra Tasarım Sonuçları

Diferansiyel Evrim:



Şekil 5/ DE Eklendikten Sonra Tasarım Sonuçları

Şekil-3,4,5 de verilen excel tabloları metasezgiseller eklendikten sonra transformatör tasarım optimizasyonu çıktılarıdır.

Sütunların İfade Ettikleri Çıktılar:

Var1: ***Popülasyon_boyutu***

Var2: ***Iterasyon_boyutu***

Var3: ***sayac***

Var4: ***amaç_fonksiyonu***

Var5: ***Çekirdek Alanı (cm²)***

Var6: ***AG Sarım Sayısı***

Var7: ***AG İletken Uzunluğu (mm)***

Var8: ***AG İletken Kalınlığı (mm)***

Var9: ***AG Soğutma Kanalı***

Var10: ***YG Soğutma Kanalı***

Var11: ***yoke kesit alanı (cm²)***

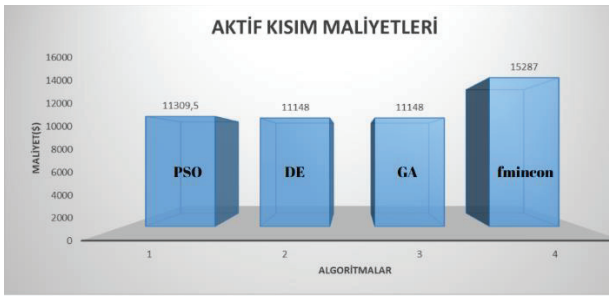
Var12: ***sure***

Var13: ***amaç_fonksiyonu***

Var14: ***F_Taşma***

Var14 yani taşma değerlenin 0 olması tasarımın algoritmalar eklendikten sonra da herhangi bir kısıt ihlali yapmadığını göstermektedir.

Var13'ler yani amaç fonksiyonumuz olan aktif kısım maliyetinin her algoritmanın bulduğu sonuçların ortalama değeri alınarak şekil-6 da verilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 6/ Aktif Kısım Maliyetlerinin Algoritmalara Göre Sonuçları

Şekil-6 da bulunan grafikte de görüldüğü gibi metasezgiseller tasarıma entegre edilmeden önce 15287$ olan aktif kısım maliyeti metasezgiseller eklendikten sonra yaklaşık 11000$ seviyelerine düşmüştür. Bu da metasezgiseller ile tasarımda yaklaşık 4000$'lık bir kar elde edildiğini göstermektedir.

Metasezgiseller bu tasarımda sadece maliyet minimizasyonu yapmakla kalmamış aynı zamanda zaman bakımından da oldukça avantaj sağlayarak tasarımları gerçekleştirmiştir.

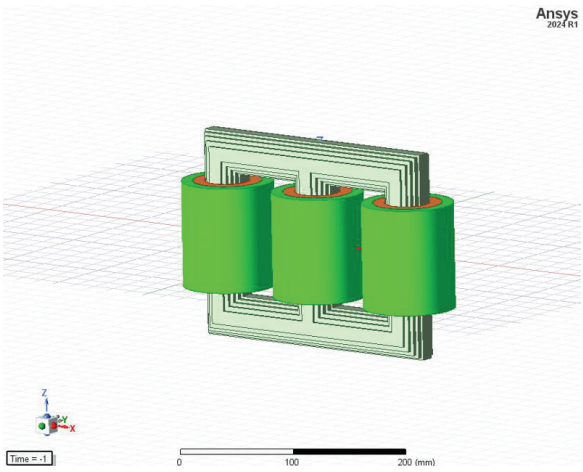
ANSYS MAXWELL 3D SİMÜLASYON ORTAMINDA TASARIMIN OLUŞTURULMASI

ANSYS MAXWELL 3D de transformatör tasarımının adımları:

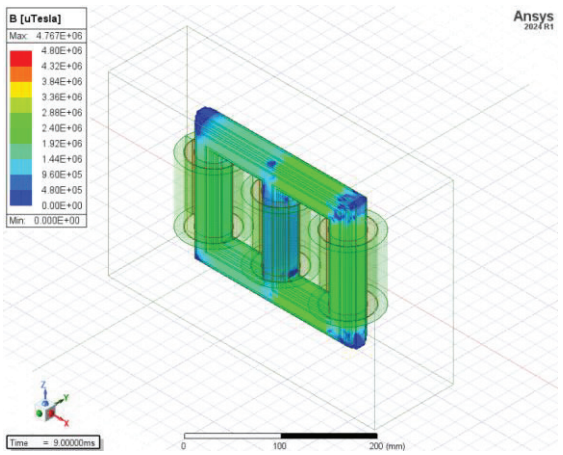
1.Tasarımın optimize edilen geometrik değerleri ile şekil-7 de verilen tasarım oluşturuldu ardından AG ve YG sargıları oluşturulup sargılar enerjilendirildi.

2. Çekirdek ve Sargı materyalleri oluşturulup gerekli değerleri girildi.

3. Tasarımın Boşta ve Yükte çalışma durumunu test etmek için gerekli koşullar oluşturuldu. Ve bu durumlardaki manyetik akı yoğunluğu gözlemlendi.



Şekil 7/ ANSYS MAXWELL Programında oluşturulan Transformatör Tasarımı



Şekil 8/ Oluşturulan Tasarımın Manyetik Akı Yoğunluğunun Gözlemlendiği Simülasyon

VI. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Projenin önemli hedeflerinden biri olan kısıt ihlallerinin önüne geçilmesi oluşturulan ceza fonksiyonları ile gerçekleştirildi. Bu toplam aktif kısım maliyeti ve cezalı aktif kısım maliyeti arasında bir fiyat fark olmadığından anlaşıldı yani tasarımda herhangi bir taşma olmadığı gözlemlendi.

Metasezgiseller tasarıma entegre edilmeden önceki ve sonraki bulunan çıktılar karşılaştırıldı her iki durumda da algoritmaların kısıt ihlali yapmadığı anlaşıldı. Şekil-3,4,5 de bulunan excel

çıktıların da Var14' te her bir tasarımın taşma değeri bulunmaktadır bu değer hiç değişmemekle beraber hep 0 olarak kalmıştır. Metasezgiseller entegre edilmeden önce 15287$ olan aktif kısım maliyeti bu algoritmalar ile yaklaşık 11000$ seviyelerine düşürüldü. Bu da sezgisel algoritmalar ile yaklaşık olarak 4000$ kazanç sağlanmış olduğunu göstermektedir. Bu algoritmalar maliyet kazancı haricinde Var12 de verilen değerlerde de görüldüğü gibi oldukça kısa sürede tasarımın gerçekleşmesini sağlayarak zaman bakımından da oldukça avantaj sağlamıştır.

Sonuç olarak metasezgiseller algoritmalarla transformatör tasarımı gerçekleştirmek hem maliyet hem de zaman bakımından oldukça avantaj sağlamıştır. Kullanılan ceza fonksiyonları uygulamaları ise IEC 60076 uluslararası standartlarından gelen sınırlamaları kullanarak kısıt ihlalinin önüne geçmiştir.

VII. KAYNAKÇA

[1] Alhan, L. (2017). Transformatör Tasarım Optimizasyonu Problemi İçin Modern Metasezgisel Algoritmaların Karşılaştırmalı Analizi (Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[2] Hashemi, M. H., Kılıç, U., & Dikmen, S. (2022). Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformers. Electrical and Electronics Engineering Department, Ege University.

[3] Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer Engineering: Design and Practice.* CRC Press

[4] Hashemi, M. H., Kılıç, U., & Dikmen, S. (Year). Application of Feature Selection in Distribution Transformer Design and Manufacturing Using Feed Forward Artificial Neural Network and Equilibrium Optimizer Algorithm. Ege University & Eltaş Transformatör A.Ş, İzmir, Turkey.

[5] Zile, M. (Yıl). Design of power transformers using heuristic algorithms. UTIYO Information Systems and Information Technology Department, University of Mersin, Mersin, Turkey.

[6] R. Salkoski and I. Chorbev, "Design optimization of distribution transformers based on Differential Evolution Algorithms," ICT Innovations, p. 10, 2012.

YERLİ VE MİLLİ MODÜLER TRANSFORMATÖR: ENERJİ VERİMLİLİĞİNDE YENİ BİR YAKLAŞIM VE PİLOT BÖLGE UYGULAMA SONUÇLARI

Mustafa Uğur TORUNER[1], Bilal BAĞCI[1], Metin KERİMOĞLU[1], Kardelen KAMİŞLİ[2], Turgay Özzeftci[2], Tuğbanur TAŞDEMİR ÖZDEMİR[2], Nazlı CÜRGÜL CAN[3], Umut Barış KILIÇKAN[3]

ugur.toruner@pronerji.com, bilal.bagci@pronerji.com, metin.kerimoglu@pronerji.com, kardelen.kamisli@gdzelektrik.com.tr, turgay.ozzeftci@gdzelektrik.com.tr, tugbanur.tasdemir@gdzelektrik.com.tr, nazli.can@admelektrik.com.tr, umutbaris.kilickan@admelektrik.com.tr

[1] Pronerji Elektrik Mühendislik Arge Danışmanlık A.Ş.
[2] Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş.
[3] Adm Elektrik Dağıtım A.Ş.

Özet*—Bu makale, Türkiye'nin enerji dağıtım şebekelerindeki verimliliği artırmak ve teknik kayıpları azaltmak amacıyla geliştirilen "Yerli ve Milli Olarak Modüler Transformatör Geliştirilmesi ve Pilot Bölge Uygulamasının Yapılması" başlıklı Ar-Ge projesinin sonuçlarını detaylandırmaktadır. Proje, özellikle düşük yükte çalışan ve zamanla enerji talebi artan bölgelerde, konvansiyonel yüksek güçlü transformatörlerin neden olduğu yüksek boşta ve yükte kayıplara çözüm olarak modüler, gücü artırılabilen bir transformatör sistemi sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, 250 kVA gücünde bir modüler transformatör prototipi tasarlanmış, üretilmiş ve Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş. faaliyet bölgesinde pilot uygulaması başarıyla gerçekleştirilmiştir. Makalede, projenin tasarım aşamaları, saha uygulaması, teknik kayıp analizleri ve elde edilen ekonomik faydalar ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler — Verimlilik, Teknik kayıplar, Modüler transformatör

Abstract— This paper presents the findings of the R&D project entitled "Development of an Indigenous Modular Transformer and Its Pilot Implementation", which was launched to improve efficiency and reduce technical losses in Turkey's electricity distribution networks. The project introduces a modular, power-scalable transformer system as a remedy for the high no-load and load losses inherent in conventional high-power transformers—losses that become especially pronounced in regions operating at low load levels yet experiencing steadily rising demand. Within the scope of the study, a 250 kVA modular transformer prototype was designed, manufactured, and successfully commissioned in a pilot installation within the service territory of GdzElektrik Dağıtım A.Ş. The paper details the design process, field deployment, technical loss analyses, and the resulting economic benefits.

Keywords — Modular transformer, Efficiency, Technical losses

I. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı sırasında karşılaşılan en temel sorunlardan biri, transformatörlerde meydana gelen teknik kayıplardır [1], [2]. Özellikle yerleşim yerlerinin ilk kurulum aşamalarında veya mevsimsel talep değişikliklerinin yaşandığı bölgelerde, genellikle gelecekteki talep artışı öngörülerek yüksek kapasiteli transformatörler tesis edilir. Ancak bu transformatörlerin uzun süreler boyunca düşük doluluk oranlarıyla çalıştırılması, demir (boşta) ve bakır (yükte) kayıplarının artmasına neden olarak sistem verimliliğini ciddi ölçüde düşürmektedir [3]. Bu durum hem enerji israfına yol açmakta hem de dağıtım şirketleri için önemli bir işletme maliyeti oluşturmaktadır.

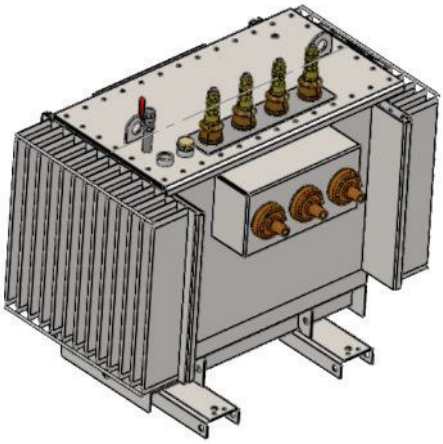
Bu soruna çözüm olarak geliştirilen modüler transformatör projesi, fiziksel olarak birbirine eklenebilen ve böylece ihtiyaca göre gücü kademeli olarak artırılabilen bir transformatör sistemi önermektedir [4]–[6]. Bu "yap-boz" benzeri yapı sayesinde, enerji talebinin düşük olduğu dönemlerde daha düşük güçte bir transformatör devrede kalırken, talep arttıkça yeni modüller eklenerek kapasite artırımı sağlanır. Böylelikle teknik kayıplar minimize edilirken yatırım maliyetleri de optimize edilir ve şebeke esnekliği artar. Şebeke esnekliği ve verimliliğinin arttırılması motivasyonuyla; master plan çerçevesinde yapılan genişleme yatırımlarıyla tesis edilen transformatörlerin gerçek zamanlı talep gücünün çok üstünde yada çok altında olması nedeniyle yüksek teknik kayıpların meydana gelmesinin önüne geçirilmesi odağında prototip ürün geliştirilerek saha uygulaması yapılmıştır.

II. TASARIM VE SİMÜLASYON

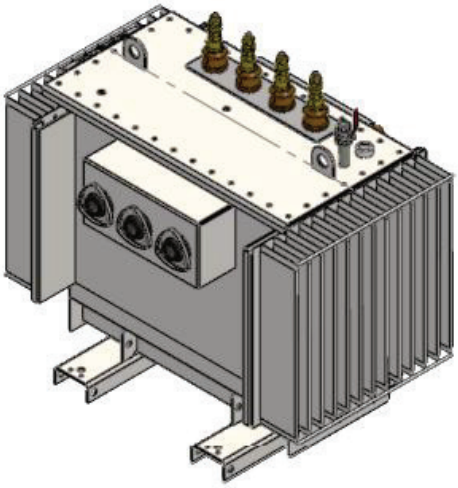
A. *Teknik Özellikler ve Tasarım Kriterleri*

Proje kapsamında, 33/0,4 kV gerilim seviyesinde, 250 kVA gücünde, 5 kademeli, ONAN (yağlı doğal hava soğutmalı) ve hermetik yapıda bir modüler transformatör tasarlanmıştır. Tasarımın en yenilikçi yönlerinden biri, transformatörlerin birbirine kolayca bağlanabilmesini sağlayan "plug-in" (tak-çalıştır) tipinde OG buşing bağlantı aparatlarının kullanılmasıdır. Bu yapı, sahada montaj kolaylığı ve hızı sağlayarak işletme verimliliğini artırmaktadır.

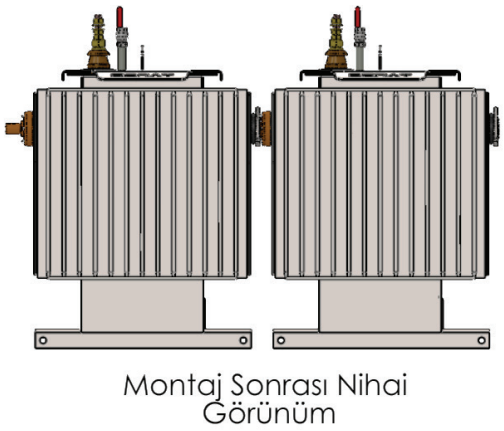
Transformatörün hem giriş hem de çıkış bağlantılarında iki grup plug-in başlık yapısı tasarlanmıştır. Bu sayede, bir modülün enerjisi, bir sonraki modüle kolayca aktarılabilmektedir. Aşağıda, modüler transformatörün ilk tasarım görselleri sunulmuştur.



Şekil1 Modüler Transformatör İlk Tasarım Ön Görünüş (Transformatörün ön cephesinden, OG plug-in bağlantılarını ve AG buşinglerini gösteren 3D tasarım.)



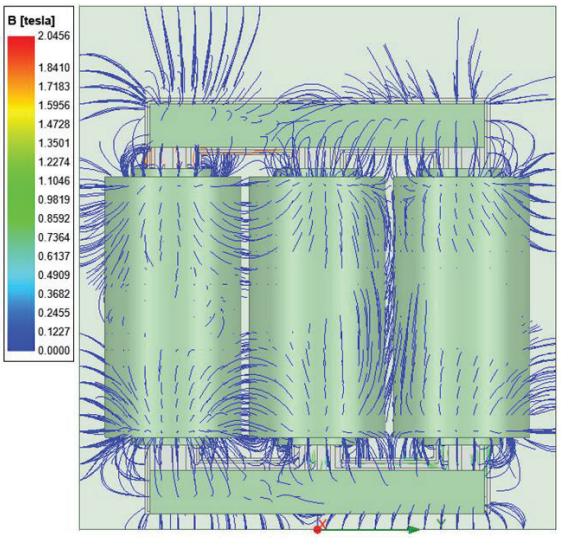
Şekil 2 Modüler Transformatör İlk Tasarım Arka Görünüş (Transformatörün arka cephesinden, diğer modüle kenetlenmeyi sağlayacak bağlantı yapısını gösteren 3D tasarım.)



Şekil 3 Modüler Transformatör Kenetlenmiş Halde (İki modüler transformatörün birbirine kenetlenmiş halini gösteren montaj sonrası simülasyon.)

B. *Simülasyon ve Analiz Çalışmaları*

Tasarımın doğruluğunu ve performansını teyit etmek amacıyla, manyetizma analizleri ve kaçak akı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, tasarlanan modüler yapının, konvansiyonel transformatörlere benzer bir manyetik akı dağılımına sahip olduğunu ve kaçak akıların nominal seviyelerde kaldığını göstermiştir. Çekirdekten geçen akı miktarının sadece %0,01'i (1/10000) oranında bir kaçak akı tespit edilmiş, bu da tasarımın manyetik açıdan verimli olduğunu kanıtlamıştır.



Şekil 4 Çekirdeğin devrede olduğu durumda kaçak akı dağılımları görünüm (Transformatör çekirdeği enerjilendirildiğinde oluşan manyetik akı yollarını (mavi çizgiler) ve akı yoğunluğunu (renk skalası) gösteren simülasyon sonucu.)

III. Laboratuvar Testleri ve Nihai Ürün

Üretilen modüler transformatör prototipi, saha montajı öncesinde Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından akredite edilmiş bir laboratuvarda IEC 60076-1[1] ve IEC 60076-3 standartlarına göre kapsamlı rutin testlere tabi tutulmuştur. Bu testler arasında sargı direnci ölçümü, çevirme oranı testi, vektör grubu doğrulaması, kısa devre empedansı ve yük kaybı ölçümü, yalıtım direnci testi ve dielektrik dayanım testleri bulunmaktadır. Test sonuçları, transformatörün tüm teknik şartnamelere ve standartlara uygun olduğunu göstermiş ve saha uygulaması için onay almıştır.



Şekil 5 Montaj Öncesi Nihai Ürün (Üretimi tamamlanmış ve laboratuvar testlerinden geçmiş modüler transformatör prototipi.)



Şekil 6 Modüler Transformatör Etiket Bilgileri (Transformatörün gücü, gerilim seviyeleri, seri numarası, soğutma tipi, kayıp değerleri ve standartları gibi tüm teknik özelliklerini içeren etiket.)

IV. Pilot Bölge Tespiti ve Saha Uygulaması

A. Pilot Bölge Seçimi

Pilot uygulama için, Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş. faaliyet bölgesinde, Manisa'nın Saruhanlı ilçesine bağlı Halitpaşa TR-3 kodlu transformatör bölgesi seçilmiştir. Bu bölgenin seçilmesindeki temel kriterler; düşük başlangıç tüketimine sahip olması, yeni yerleşime açık olması ve TEDAŞ'ın öngördüğü yıllık %4,4'lük şebeke büyüme potansiyelini yansıtmasıdır[7]. Yapılan analizler, bölgedeki mevcut 250 kVA'lık konvansiyonel transformatörün kapasitesinin şimdilik yeterli olduğunu ancak artan taleplerle birlikte gelecekte ek kapasiteye ihtiyaç duyulacağını göstermiştir.



Şekil 7 Halitpaşa TR-3, Saruhanlı-Manisa Bina Görünümü (Modüler transformatörün montaj edildiği trafo binasının dış görünümü.)

B. Saha Montajı

Saha montajı, 09.05.2025 tarihinde Gdz ve Pronerji saha ekiplerinin iş birliğiyle gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, mevcut konvansiyonel transformatörün demontajı yapılmış, ardından yeni modüler transformatörün montajı tamamlanmıştır. Montaj sırasında, OG çıkış tarafında L tipi kablo başlıkları kullanılarak izolasyon sağlanmıştır.



Şekil 8 Modüler Transformatör Montaj Sonrası Görüntüsü

V. TEKNİK KAYIP VE FAYDA-MALİYET ANALİZİ

Modüler transformatörün montajının ardından, modüler transformatörün performansı bir izleme periyodu boyunca takip edilmiş ve eski transformatörün verileriyle karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

A. Teknik Kayıp ve Doluluk Oranı Karşılaştırması

Modüler transformatörün kurulumunu takip eden ilk 7 gün içinde yapılan ölçümler, teknik kayıplarda önemli bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bu süre zarfında, önceki yılların aynı dönemine kıyasla günde ortalama **73,49 kWh'lik** bir kazanç sağlanmıştır.

Tablo 1 Teknik Kayıp Kıyas Tablosu

Günlük Kayıp ve Kazanç Tablosu						
Gün	2022/5	2023/5	2024/5	Eski Trafo Ortalama Günlük Kayıp	2025/5	Montaj Sonrası Günlük Ortalama Kazanç
9	18,63	22,58	18,80	20,00	8,279	58,61%
10	18,94	15,52	18,72	17,73	8,322	53,06%
11	26,80	18,14	18,78	21,24	8,285	60,99%
12	16,15	18,72	18,93	17,93	8,290	53,77%
13	13,17	18,74	19,12	17,01	8,308	51,16%
14	19,06	6,24	18,96	14,75	8,312	43,67%
15	18,53	31,22	19,12	22,96	8,341	63,67%

Bu sonuçlar, modüler transformatörün düşük yüklerde dahi çok daha verimli çalıştığını ve boşta kayıpları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Doluluk oranı analizleri de bu bulguyu desteklemiştir.

Tablo 2 Mayıs Ayı Günlük Doluluk Oranı Kıyası Tablosu

Eski Trafo Günlük Ortalama Doluluk Tablosu					
Gün	2022/5	2023/5	2024/5	Ortalama Doluluk (2022,2023,2024)	2025/5
9	3,05%	1,96%	1,19%	2,07%	1,63%
10	3,13%	1,28%	0,85%	1,75%	1,99%
11	1,15%	1,29%	2,52%	1,66%	0,94%
12	3,06%	0,87%	3,97%	2,63%	1,28%
13	3,82%	1,33%	6,01%	3,72%	1,55%
14	2,91%	1,50%	5,23%	3,21%	1,60%
15	2,35%	1,11%	6,26%	3,24%	2,20%

B. 30 Yıllık Amortisman ve Ekonomik Getiri Projeksiyonu

Projenin uzun vadedeki ekonomik etkisini analiz etmek için, şebekede yıllık %4,4'lük bir genişleme varsayımıyla 30 yıllık bir amortisman süresi projeksiyonu yapılmıştır. Bu projeksiyona göre, eski ve yeni transformatörlerin toplam teknik kayıpları hesaplanmıştır.

• Eski 250 kVA Transformatör Toplam Kayıp (30 Yıl): **206.375,33 kWh**

• Yeni Modüler 250 kVA Transformatör Toplam Kayıp (30 Yıl): **92.525,51 kWh**

Bu hesaplamalar, modüler transformatörün 30 yıllık ömrü boyunca 113.846,83 kWh'lik bir enerji tasarrufu sağlayacağını ortaya.

EPİAŞ'ın ağırlıklı ortalama PTF (Piyasa Takas Fiyatı) ve TCMB'nin USD/TRY kuru baz alınarak yapılan ekonomik analizde, bu enerji tasarrufunun 30 yıllık amortisman ömrü boyunca yaklaşık 7.710,76 ABD Doları tutarında bir kazanç sağlayacağı hesaplanmıştır.

Tablo 3 30 Yıllık Amortisman Süresince Teknik Kayıp Kazanç Hesabı

	Eski 250 kVA Transformatör	Modüler 250kVA Transformatör
Kayıp (kWh)	206.375,33	92.525,51
Kayıp TL Karşılığı	₺533.412,64	₺237.221,37
Kayıp Karşılığı (USD)	$13.977,28	$6.266,52
Ağırlıklı Ortalama PTF Fiyat (TL/MWh)	2.616,84	Elektrik Piyasası Günlük Raporu
USD/TRY	38,64	Merkez Bankası Güncel Kur
Amortisman Ömrü Boyunca Tesis Kayıp Kazanç Miktarı	**$7.710,76**	

VI. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

"Yerli ve Milli Olarak Modüler Transformatör Geliştirilmesi ve Pilot Bölge Uygulamasının

Yapılması" projesi, enerji dağıtım şebekelerinde verimliliği artırmak için yenilikçi, esnek ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Pilot uygulama sonuçları, modüler transformatör tasarımının teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğini ve üstünlüğünü somut verilerle kanıtlamıştır.

Dağıtım bağlantı talepleri müracaatlarının bölgedeki artışı nedeniyle mevcut 250 kVA transformatör doluluk oranının yaklaşık 2 yıl içerisinde %60 – %70 seviyelerine ulaşması öngörülmektedir. Yatırım planları kapsamına da giren ilgili bölge için trafo kapasitesinin verimsizlik seviyesine ulaşması kaçınılmazdır. Bu çerçevede ilgili bölgenin genişleme potansiyeliyle 2 adet 250 kVA transformatörün paralel bağlantısıyla elde edilen 500 kVA kurulu gücün enerji talebini karşılayabileceği analiz edilmiştir. Bu analizler odağında; tasarımın ilk aşaması olan proje sürecinde modüler transformatör tasarımının şebeke kararlılığı ve karakteristiğinin test edilmesi, tasarımın saha şartlarında doğruluğu kanıtlanmıştır. Yaklaşık 1 yıl içerisinde bölgeye paralel bağlantı prensibinde ikinci modüler trafonun kurulumu gerçekleştirilecek olup, modüler tasarımın tüm şartlarda doğruluğu test edilerek raporlanacaktır. Enerji talebi ve tedarik sürekliliğinin sağlanabilmesi için bölge yatırım planlarına kritik bir çözüm önerisi olarak ele alınmıştır.

A. Projenin Temel Kazanımları

- *Enerji Verimliliği ve Kayıp Optimizasyonu:*

Düşük yüklerde çalışan transformatörlerin neden olduğu yüksek teknik kayıplar, modüler yapı sayesinde minimize edilmiştir.

- *Yatırım Maliyetlerinde Azalma (CAPEX Optimizasyonu):*

Şebeke talebine göre kademeli kapasite artırımı imkanı, başlangıçta yüksek güçlü trafo yatırımını gereksiz kılarak sermaye harcamalarını optimize etmektedir. Proje, 630 kVA'lık bir transformatöre kıyasla tesis kurulum maliyetlerini %60 azaltma potansiyeli taşımaktadır.

- *Şebeke Esnekliği ve Tedarik Sürekliliği:*

Modüler yapı, şebekenin dinamik enerji taleplerine hızla uyum sağlamasına olanak tanır. Olası bir modül arızasında, diğer modüllerin hizmet vermeye devam etmesi, tedarik sürekliliğini artırır ve kesinti sürelerini (SAIDI, SAIFI) iyileştirir.

- *Kaynak Verimliliği ve Sürdürülebilirlik:*

Atıl durumdaki transformatörlerin envanterde bekletilmesi yerine sahada verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak kaynak israfını önler.

- *Yerli Teknoloji ve Sanayinin Desteklenmesi:*

Projenin yerli imkanlarla geliştirilmiş olması, Türkiye'nin enerji teknolojilerindeki yetkinliğini artırmakta ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır.

Bu başarılı pilot uygulamanın sonuçları, modüler transformatör sistemlerinin Türkiye'deki diğer 21 elektrik dağıtım şirketi için de uygulanabilir ve faydalı bir model olduğunu göstermektedir. Bu teknolojinin yaygınlaştırılması, ulusal enerji altyapısını güçlendirecek, işletme maliyetlerini düşürecek ve Türkiye'nin sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmasına önemli bir katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

İşbu araştırma ve uygulama projesi, EPDK Ar-Ge Komisyonu'nun 11.09.2023 - 15.09.2023 tarih ve 02/23/09-05 karar sayılı kurul kararı kapsamında fonlanarak Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş. yürütücülüğünde, Adm Elektrik Dağıtım A.Ş. paydaşlığında ve Pronerji'nin danışmanlığında hayata geçirilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] International Electrotechnical Commission, Power Transformers – Part 1: General, IEC 60076-1, 6th ed., Geneva, Switzerland, 2011.

[2] United Nations Environment Programme, Energy-Efficient Transformers – U4E Policy Guide Series, Nairobi, Kenya, 2017.

[3] J. M. Bloemink and T. C. Green, "Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 911–919, Apr. 2013.

[4] E. R. Ronan, S. D. Sudhoff, S. F. Glover, and D. L. Galloway, "A power electronic-based distribution transformer," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 537–543, Apr. 2002.

[5] A. Milczarek and M. Malinowski, "Comparison of classical and smart transformers impact on MV distribution grid," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 3, pp. 1339–1347, Jun. 2020.

[6] N. Yousefpoor, B. Parkhideh, A. Azidehak, S. Bhattacharya, and B. Fardanesh, "Modular transformer converter-based convertible static transmission controller for transmission grid management," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 12, pp. 6293–6306, Dec. 2014.

[7] EPİAŞ, Day-Ahead Market Daily Report, 10 May 2025.

[8] TEDAŞ, Distribution Network Load-Growth Forecast 2024-2030, Tech. Rep., Ankara, 2024.

RÜZGÂR ENERJİSİ ÜRETİM PENETRASYONUNUN ELEKTRİK ŞEBEKESİ KARARLILIĞI VE DUYARLILIĞI ÜZERİNDEKİ DİNAMİK ETKİLERİ

Dilay Naz Özkan, Engin Karatepe
dilay.ozkannz@gmail.com, engin.karatepe@ege.edu.tr
Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Bornova, İzmir

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla artan penetrasyonu, elektrik şebekelerinde kararlılığın farklı işletme koşulları altında sistematik biçimde değerlendirilmesini giderek daha önemli hâle getirmiştir. Bu çalışmada, kararlılık analizleri Kundur'un iki alanlı güç sistemi modeli üzerinde, Matlab tabanlı PSAT (Power System Analysis Toolbox) kullanılarak ve sabit devirli rüzgâr türbinleri entegre edilerek gerçekleştirilmiş ve atalet, sönüm katsayısı ve iletim hattı uzunluğu gibi fiziksel parametrelerin doğal frekanslar ve sönüm oranları üzerindeki etkileri farklı sistem koşulları altında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Rüzgâr türbinlerinin farklı seviyelerde sisteme entegrasyonu ile senkron jeneratörlerin eşzamanlı olarak devreden çıkarıldığı senaryolar birlikte ele alınarak, kararlılıkla ilişkili sistem davranışları ve duyarlılıklar incelenmiştir. Sistem modlarının hangi durum değişkenleriyle daha güçlü bağlantı kurduğunu belirlemek amacıyla durum katılım matrisi kullanılmış ve sistem tepkisinde etkili olan değişkenler analiz edilmiştir. Çalışmada, düşük ataletli yapılardaki yerel etkiler de ele alınarak analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda sistem parametrelerinin farklı senaryolar altında nasıl değiştiği irdelenerek sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Elektrik Şebekelerinde Kararlılık, Duyarlılık, PSAT, Sabit Devirli Rüzgâr Türbini (CSWT), Rüzgâr Enerjisi Entegrasyonu, Penetrasyon.

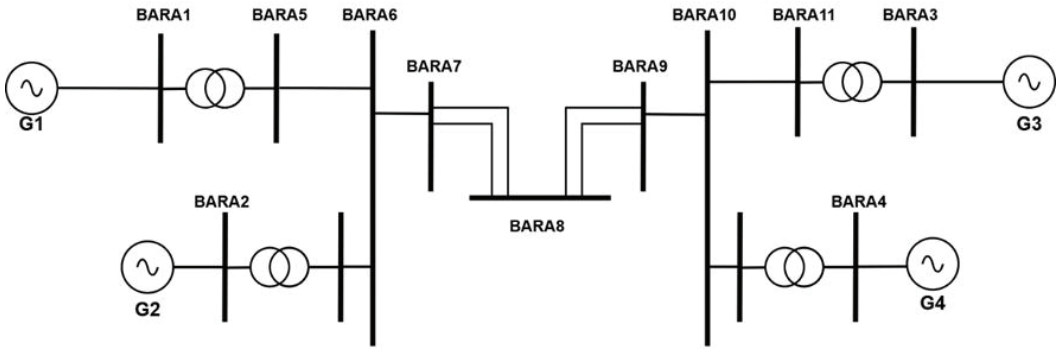
1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu, sistem dinamiklerini önemli ölçüde etkilemiş ve kararlılık analizlerini daha kritik hâle getirmiştir. Düşük atalet, zayıf bağlantı noktaları ve yeni kontrol temelli dönüştürücülerle değişen şebeke yapısı, kararlılık sınırlarının yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Artan rüzgâr enerjisi penetrasyonu, güç sistemlerinin dinamik davranışlarının daha yalın, izlenebilir ve karşılaştırılabilir modellerle temsil edilmesini gerektirmektedir. Literatürde bu amaçla önerilen yaklaşık empedans modeli [1], aynı tip kontrol tabanlı türbinlerden oluşan santrallerin dinamik davranışlarını analiz etmek üzere kullanılmıştır. Başka bir çalışmada ise rüzgâr gücünün sistem üzerindeki etkileri, kararlılık bölgesi sınırı yaklaşımıyla ele alınarak, türbin konumu ve penetrasyon oranının sistemin modal yapısına olan etkileri değerlendirilmiştir [2]. Özellikle büyük ölçekli rüzgâr entegrasyonu senaryolarında, modal analiz ve parametre uzayı yaklaşımları kullanılarak sınır koşullarının belirlenmesi önemli bir analiz olarak karşımıza çıkmaktadır [3]. Bu tür çalışmalar, rüzgâr enerjisinin sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini daha geniş bir perspektiften değerlendirme gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlerin entegrasyonunun kontrol stratejisine bağlı olarak sistemin dinamik tepkilerini nasıl etkilediği, karşılaştırmalı analizlerle sunulmuştur [4]. Ayrıca, iletim hatlarına entegre edilen Tip-4 rüzgâr türbinlerinin, seri kompanzasyon elemanlarıyla olan etkileşiminin kararlılığa etkileri de detaylı biçimde incelenmiştir [5]. Bunun yanı sıra, Tip-3 rüzgâr türbinlerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkileri kontrol stratejileri, atalet özellikleri, denetleyici parametreler, bağlantı noktası ve penetrasyon seviyesi gibi unsurlar üzerinden, çeşitli analiz ve değerlendirme yöntemleriyle kapsamlı biçimde ortaya konmuştur [6–10]. Küçük sinyal kararlılığına yönelik klasik denetleyici uygulamalar da literatürde ele alınmış, özellikle düşük frekanslı salınımların kontrolüne yönelik olarak güç

sistemi stabilizatörü, statik gerilim kompanzatörü ve otomatik gerilim düzenleyici gibi denetleyicilerin koordineli yapılandırılması ile bu yapıların geniş ölçekli sistemlerdeki uygulanabilirliği çeşitli modelleme ve simülasyon çalışmalarıyla değerlendirilmiştir [11–13]. Yenilenebilir enerjinin ağırlık kazandığı sistemlerde, yaygınlaşan şebeke oluşturan eviriciler ve sanal jeneratör yapıları, klasik güç sistemi kavramlarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda, frekans, gerilim düzenlemesi ve senkronizasyon gibi kararlılık boyutları incelenmekte, ayrıca zayıf şebeke koşullarında evirici penetrasyonu ile kontrol parametreleri arasındaki ilişki ve bu yapıların salınım modlarına etkileri özdeğer analizleriyle değerlendirilmektedir [14–16]. Bu kapsamda, gerilim kaynaklı dönüştürücüler küçük sinyal kararlılığı açısından incelenmiş ve bu yapıların sisteme entegrasyonu sırasında ortaya çıkan dinamik etkileşimler analiz edilmiştir. İncelemelerde, iç ve dış modlar arasındaki çoklu etkileşimlerin sistem kararlılığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, özellikle çoklu dönüştürücü içeren HVDC sistemlerinin deniz üstü alternatif akım şebekelerine entegrasyonu bağlamında kontrol stratejileri arasındaki etkileşimler ele alınmıştır [17, 18]. Ayrıca, empedans-temelli ve özdeğer-temelli yöntemlerin farklı uygulama senaryolarındaki uygunlukları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [19]. Bunun yanında, klasik senkron makinelere ilişkin kontrol yapılarının kararlılık üzerindeki etkileri de literatürde önemli bir başlık olarak ele alınmış, uyartım sistemi, otomatik gerilim düzenleyici ve senkron kompansatörlerin, sistem ataleti ve düşük frekanslı modlar bağlamında küçük sinyal ve geçici kararlılığa etkileri ortaya konmuştur [20–21]. Bu kapsamda, güç sistemi kararlılığına dair temel kavramların sınıflandırılması ele alınmış, rotor açısı, frekans, gerilim ve küçük sinyal kararlılığı gibi başlıklara dayalı yapılandırmalar ile bu alanlara ilişkin analiz yöntemleri ve kontrol stratejileri incelenmiştir [22, 23].

Bu çalışma, güç sistemlerinin dinamik davranışlarını değerlendirmek amacıyla Kundur'un iki alanlı test sistemi üzerinde gerçekleştirilmiş, modelleme ve analiz süreçlerinde MATLAB tabanlı PSAT aracı kullanılmıştır. Durum uzayı temelli yaklaşımlar doğrultusunda sistemin modal karakteristikleri analiz edilmiş, sönüm oranları, doğal frekanslar ve duruma bağlı etkileşimler özdeğer ve katılım faktörü analizi ile incelenmiştir. Özellikle özdeğerlerin karmaşık düzlemdeki konumları üzerinden sistemin kararlılık durumu ayrıntılı biçimde değerlendirilmiş, kritik modlara ait sönüm ve frekans bilgileri sistem tepkisinin temel göstergeleri olarak kullanılmış ve sistemdeki kararlılık etkinlikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada, atalet katsayısı, sönüm parametresi ve iletim hattı uzunluğu gibi fiziksel değişkenlerin etkileri farklı işletme koşulları altında karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin (CSTW) [24] farklı güç seviyelerinde entegrasyonu senaryolarla incelenmiş, eşzamanlı senkron jeneratörlerin sistemden çıkarıldığı



Şekil 1. Kundur İki Alanlı Test Sistemi

durumlarla birlikte parametre duyarlılıkları ve sistem tepkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, düşük ataletli yapılarda ortaya çıkan yerel etkiler göz önünde bulundurularak sistemin kararlılığa verdiği tepki senaryo temelli olarak irdelenmiştir.

2. TEST SİSTEMİ ve DURUM DEĞİŞKENLERİNİN TANIMI

Bu çalışmada, Şekil 1'de verilen IEEE PES tarafından önerilen ve literatürde yaygın olarak kullanılan İki Alanlı Dört Jeneratörlü Kundur Güç Sistemi esas alınmıştır [25]. Ayrıntılı yapısal ve dinamik özellikleri *Power System Stability and Control* adlı kaynakta tanımlanan bu sistem, güç sistemi kararlılık analizlerinde yaygın olarak kullanılan standart bir test modeli olarak öne çıkmaktadır [26]. Modelleme süreci MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş, bu kapsamda PSAT (Power System Analysis Toolbox) aracı temel alınmıştır [27]. Ardından, küçük sinyal kararlılığı analizleri, özdeğer çözümlemesi, mod katılım faktörlerinin incelenmesi ve sönüm oranlarının değerlendirilmesi yoluyla ayrıntılı biçimde gerçekleştirilmiştir.

Test sistemi, 11 baradan oluşmakta olup, 1–4 numaralı baralar 20 kV seviyesinde çalışan jeneratör baralarıdır. Sistem, ikişer jeneratör içeren iki bölgeden oluşmakta ve bu bölgeler zayıf bağlanmış iletim hatlarıyla birbirine bağlanmaktadır. 5–11 numaralı baralar 230 kV seviyesinde iletim sistemini temsil eder. Alan 1 (Bara 1, 2, 5, 6, 7) ve Alan 2 (Bara 3, 4, 10, 11, 9) olarak yapılandırılan bölgeler, Bara 7 ve 9 üzerinden bağlanmıştır. Test sisteminde 900 MVA, 20 kV, 60 Hz özelliklerinde dört senkron jeneratör ve 12 iletim hattı yer almakta olup hat empedansları ise π-model parametreleriyle tanımlanmıştır.

Kararlılık analizinde, sistemin karakteristik özdeğerleri $\lambda_i = \alpha_i \pm j\beta_i$ sistemin salınım modlarını temsil etmekte olup, sönüm oranı (ζ) ve salınım frekansı (f) bu özdeğerler kullanılarak belirlenmektedir [27]. Bir sistemde oluşan her salınım modunun, hangi durum değişkenleriyle ne ölçüde ilişkili olduğunu belirlemek amacıyla katılım faktörleri kullanılır. Bu analiz yöntemi, modların hem hangi bileşenler tarafından uyarıldığını hem de hangi değişkenler üzerinde daha baskın etkiler oluşturduğunu ortaya koyar. Her mod için oluşturulan katılım vektörü, o modla ilişkili tüm durum değişkenlerinin katkı düzeylerini nicel olarak ifade eder. Bu kapsamda, sistemde yer alan bazı senkron jeneratörler devreden çıkarılmış ve bunların yerine CSWT'lerin entegrasyonu sağlanmıştır. Test sisteminde yalnızca senkron jeneratörler bulunduğunda, sistem toplamda 24 adet durum değişkeni içermektedir. Rüzgâr türbininin entegre edilmesiyle birlikte bu sayı 30'a yükselmiştir. Elde edilen özdeğerler üzerinden kararlılık analizi gerçekleştirilmiş, baskın osilasyon modları belirlenmiş ve bu modlara

Tablo 1. Durum değişkenleri ve mod tanımlamaları

Test Sistemi	*Bağlı Durum Değişkenleri*	*Mod Numaraları*
Senkron makineler	$\delta_1, \omega_1, e'q_1, e'd_1, e''q_1, e''d_1, \delta_2, \omega_2, e'q_2, e'd_2, e''q_2, e''d_2, \delta_3, \omega_3, e'q_3, e'd_3, e''q_3, e''d_3, \delta_4, \omega_4, e'q_4, e'd_4, e''q_4, e''d_4$	$\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{24}$
Senkron makineler + Rüzgâr Türbini	$\delta_1, \omega_1, e'q_1, e'd_1, e''q_1, e''d_1, \delta_2, \omega_2, e'q_2, e'd_2, e''q_2, e''d_2, \delta_3, \omega_3, e'q_3, e'd_3, e''q_3, e''d_3, \delta_4, \omega_4, e'q_4, e'd_4, e''q_4, e''d_4, v_w, w_t, w_m, \gamma, e'_r, e'_m$	$\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{30}$

karşılık gelen katılım faktörleri hesaplanmıştır. Tablo 1'de sistemde tanımlanan durum değişkenleri ve ilgili modlar sunulmuştur [27].

3. SENARYOLAR

Test sistemi üzerinde 6 farklı senaryo oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar:

Senaryo 1: Bu senaryoda, sistem yalnızca senkron jeneratörlerden oluşmakta olup, jeneratörler üzerinde herhangi bir kontrol sistemi bulunmamaktadır. Bu yapı altında sistemin durum uzayı modeli elde edilmiş ve özdeğer analizi gerçekleştirilmiştir.

Senaryo 2: Sistem alanlarının dinamik özelliklerinde yapısal farklılıklar olabileceği dikkate alınarak, atalet katsayısındaki değişimin etkisi her iki bölge için ayrı ayrı incelenmiştir.
Senaryo (2a): G1ve G2 için H=13, G3 ve G4 için H = 12,35 alınmıştır.
Senaryo (2b): G1 ve G2 için H = 6, G3 ve G4 için 12,35 alınmıştır.
Senaryo (2c): G1 ve G2 için H = 13, G3 ve G4 için 6 alınmıştır.

Senaryo 3: Senaryo 1 kapsamında belirlenen kritik modlar dikkate alınarak, en düşük sönüm oranına sahip jeneratör olan SG3 için tanımlanan sönüm katsayısı, bu moda yüksek katılım gösteren SG4 üzerine farklı oranlarda uygulanmış ve elde edilen yapı üzerinden sönüm oranı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda, Sönüm oranı düşük olan bir modun iyileştirilmesine yönelik olarak, doğrudan müdahalenin mümkün olmadığı veya tercih edilmediği durumlar göz önünde bulundurularak, aynı moda anlamlı düzeyde katılım gösteren alternatif birim üzerinden dolaylı bir iyileştirme stratejisinin etkisi araştırılmıştır.

Senaryo 4: Bu senaryoda, iletim hatlarına ait empedans parametrelerinde yapılan değişikliklerin güç sisteminin dinamik davranışları üzerindeki olası etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, söz konusu değişimlerin salınım modlarının frekansı, sönüm oranı ve güç paylaşım profilleri üzerindeki yansımaları analiz edilerek sistem kararlılığına ilişkin genel eğilimlerin gözlenmesi amaçlanmıştır.

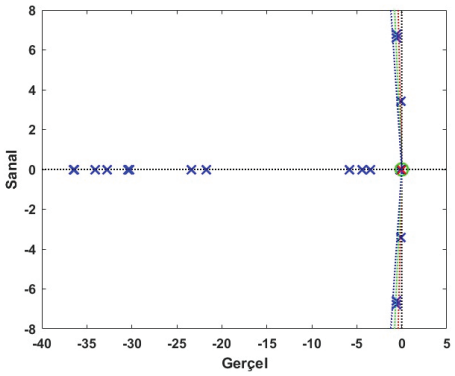
Senaryo 5: Bu senaryoda, CSWT entegrasyonu iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.
Senaryo (5a): Birinci alanda, Bara 6'ya farklı güç seviyelerinde CSWT bağlanmış ve bu entegrasyona karşılık olarak SG2'nin ürettiği aktif güç eşzamanlı olarak azaltılmıştır.
Senaryo (5b): İkinci alanda, Bara 10'a farklı güç seviyelerinde CSWT bağlanmış ve SG4'ün ürettiği aktif güç eşzamanlı olarak azaltılmıştır.
Senaryo 6: Bu senaryoda, farklı bölgelerde konumlanan SG2 ve SG4 senkron jeneratörleri, aynı aktif güç kapasitesine sahip CSWT ile tamamen ikame edilmiştir.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Senaryo 1'e ait özdeğer grafiği Şekil 2'de sunulmakta olup, modların kompleks düzlemdeki dağılımını göstermektedir. Gerçek eksenin sağında yer alan tek bir pozitif özdeğer, sistemin potansiyel kararsızlığına işaret ederken, kalan 21 negatif özdeğer, kararlı modları temsil etmektedir. Ayrıca, üç çift kompleks özdeğer ise sistemde salınım modlarının varlığını ortaya koymaktadır. Tablo 2'de verilen analiz sonuçlarına göre sistemde üç baskın salınım modu olduğu görülmektedir.

Tablo 2 Senaryo 1 için Baskın Osilasyon Modları

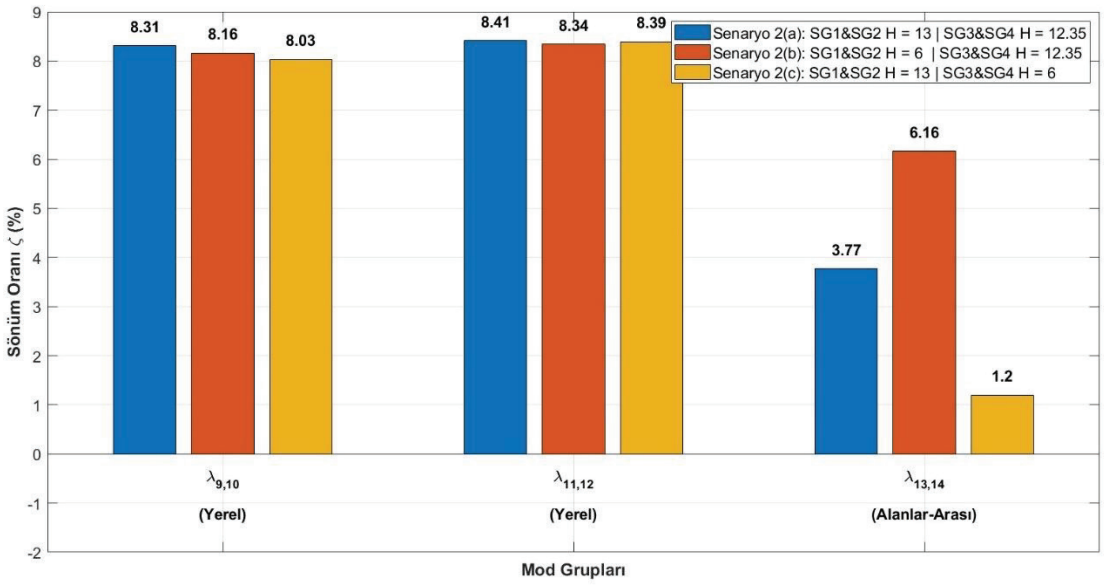
Mod Sayısı	Özdeğer	Osilasyon Frekansı(Hz)	Sönüm Oranı	En Etkili Durum (% Katılım)	Mod Türü
λ_9, λ_{10}	–0.56655±6.794	1.085	0.083	δ_1 = 25.6%, ω_1 = 25.6%, δ_4 = 19.1%, ω_4 = 19.1%	Yerel
$\lambda_{11}, \lambda_{12}$	–0.55725±6.6015	1.054	0.084	δ_2 = 24.9%, ω_2 = 24.9%, δ_3 = 19.6%, ω_3 = 19.6%	Yerel
$\lambda_{13}, \lambda_{14}$	–0.12945±3.4272	0.546	0.038	δ_1 = 14.6%, ω_1 = 14.6%, δ_4 = 19.1%, ω_4 = 9.1%	Alanlar-Arası



Şekil 2. Senaryo 1 için Özdeğer Analizi Grafiği

λ_9–λ_{10} ve λ_{11}–λ_{12} çiftleri sırasıyla ~1.08 Hz ve ~1.05 Hz frekansta salınımları temsil etmekte ve kontrolsüz durumda yetersiz sönüm gösterme eğilimindedir. Üçüncü baskın mod çifti olan λ_{13}–λ_{14}, yaklaşık 0.546 Hz frekansla alanlar arası salınımı ifade eder. Katılım faktörlerine göre δ_1, ω_1, δ_4, ve ω_4 gibi rotor açısı ve açısal hız değişkenleri bu modlar üzerinde yüksek etkiye sahiptir. Bu da rotor dinamiklerinin salınım modlarında belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Senaryo 2'de üç farklı durum için baskın modlara ait sönüm oranlarının karşılaştırması Şekil 3'te verilmiştir. Senaryo 2a'da, tüm jeneratörlerin yüksek ataletli olması sistemin daha kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır. Senaryo 2b'de alanlar arası modunun sönümlemesi artarken ($\lambda_{13,14}$), yerel modlarda küçük bir sönüm kaybı gözlemlenmiştir. Senaryo 2c'de ise ($\lambda_{13,14}$) alanlar arası modunun sönümlemesi Tablo 3'ten de görüleceği üzere çarpıcı şekilde düşmüştür (~%2.57). Bu da $\lambda_{13,14}$ modunun SG3 ve SG4'e daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Ataletin düşürülmesi, mod frekanslarını artırmakta ve sistemin daha hızlı ancak daha az sönümlü tepki vermesine neden olmaktadır. Sonuçlar, alanlar arası modların düşük ataletli alanlarda daha kolay bozulduğunu ve jeneratör konumlarının bölgesel kararlılık açısından kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Senaryo 3 kapsamında, küçük sinyal kararlılığı üzerinde sönüm katsayısının etkisini incelemek amacıyla, daha önceki analizlerde kritik modlarla ilişkilendirilen jeneratörlerden en düşük sönüm oranına sahip olan SG3 referans alınmıştır. Bu doğrultuda, SG3'e ait sönüm katsayısı, aynı moda yüksek düzeyde katılım gösterdiği belirlenen SG4'e farklı oranlarda uygulanarak sistemin modal davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan bu analizle, dolaylı bir sönüm iyileştirme stratejisinin kararlılık performansı üzerindeki katkısı incelenmiştir. Tablo 4'te, sönümleyici parametresi D değerinin artmasının seçilen mod ($\lambda_{13,14}$) üzerindeki etkisi sunulmuştur. D değeri



Şekil 3. Senaryo 2 için Farklı Atalet Sabiti Değerlerinin Kritik Modlarda Sönüm Oranı Etkisi

Tablo 3. Senaryo 2(c) için SG3 ve SG4 Atalet Sabiti H=6 Durumunda Kritik Modlar

Mod Sayısı	Osilasyon Frekansı(Hz)	Sönüm oranı	En Etkili Durumlar (% Katılım Faktörü)	Mod Türü
λ_9, λ_{10}	1.584	0.0803	δ_1 = 25.8%, ω_1 = 25.8%, δ_4 = 20.1%, ω_4 = 20.1%	Yerel
λ_{11}, λ_{12}	1.057	0.0839	δ_2 = 25.9%, ω_2 = 25.9%, δ_4 = 19.6%, ω_4 = 19.6%	Yerel
λ_{13}, λ_{14}	0.719	0.012	δ_4 = 22.1%, ω_4 = 22.1%, δ_3 = 6.8%, ω_3 = 6.8%	Alanlar-Arası

arttıkça, modun gerçel kısmı daha negatif hale gelmiş ve sönüm oranı sırasıyla %3.77'den %4.49'a yükselmiştir. Bu durum, sönümleyicinin etkisinin arttığını ve modun daha hızlı sönümlendiğini göstermektedir. Ayrıca, δ_1 ve ω_1 için katılım oranlarında küçük bir azalma gözlenirken, δ_4 ve ω_4 için katılım oranlarının arttığı görülmektedir. Bu eğilim, sönümleyicinin uygulandığı jeneratörün ilgili moda olan etkisinin arttığını, yani modun daha yerel hale geldiğini ve SG1 üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, artan D değeri sönüm oranını artırmanın yanı sıra, modun etkisini yeniden dağıtarak kontrolün daha yerel hale gelmesini sağlamıştır. Bu durum, seçilen jeneratör kapsamında etkin bir sönümleme sağlanması açısından olumlu bir etki ortaya koymakta ve dolaylı kontrol stratejilerinin sistem kararlılığı üzerindeki potansiyel katkısını göstermektedir.

Senaryo 4'te bara 7–8 ve bara 8–9 hatları 110 km uzunlukta olup standart iletim hattı parametreleri r = 0,011 pu, x = 0,11 pu ve B = 0,09625 pu ile modellenmiştir. Bu senaryoda hat empedansları Tablo 5'te verildiği şekilde değiştirilerek, kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Hat uzunluklarının artırılması, özellikle alanlar arası mod frekanslarını düşürmüş ve sönüm oranlarını etkilemiştir. Senaryo 4b ve 4c'de tek taraflı hat uzatma ile seçilen modun frekansı 0.415 Hz'e düşerken, sönüm oranı yaklaşık %5.6'ya yükselmiştir. Bu, frekansın azalmasına rağmen sönümde kısmî bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Senaryo 3 için Sönüm Katsayısının Kritik Modda Farklı Jeneratörlere Eklenmesinin Katkısı

D	Özdeğer (λ)	Sönüm Oranı (%)	En Etkili Durumlar (% Katılım Faktörü)
0	-0.12945±0.54546	3.77	δ_1 = 14.51%, ω_1 = 14.51%, δ_4 = 19.06%, ω_4 = 19.06%
0.5	-0.13563±3.42800	3.95	δ_1 = 14.49%, ω_1 = 14.50%, δ_4 = 19.08%, ω_4 = 19.08%
1	-0.14180±3.42880	4.13	δ_1 = 14.47%, ω_1 = 14.48%, δ_4 = 19.09%, ω_4 = 19.09%
2	-0.15411±3.43050	4.49	δ_1 = 14.44%, ω_1 = 14.45%, δ_4 = 19.12%, ω_4 = 19.12%

Senaryo 4d'te ise simetrik ve yüksek empedanslı hatlarla alanlar arası modun frekansı 0.031 Hz'e kadar düşmüş, ancak sönüm oranı yalnızca %1 civarında kalmıştır. Bu, modun klasik salınım özelliğini yitirip zayıf salınımlı ve ağır sönümlü bir geçici rejime dönüştüğünü göstermektedir. Yerel modlarda ise belirgin bir değişim gözlenmemiştir, bu da hat parametrelerinin daha çok alanlar arası modları etkilediğini, yerel modların ise jeneratör karakteristiklerine bağlı kaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, artan hat uzunlukları doğal salınım frekansını düşürüp mod davranışlarını değiştirmekte, simetrik uzatmalar kararlılığı artırırken, asimetrik yapılar yetersiz sönümlemeye neden olabilmektedir. Bu iletim sistemi planlamasında kararlılık analizlerinin ve kontrol stratejilerinin belirlenmesindeki önemi ortaya koymaktadır.

Senaryo 5 kapsamında, Alan 1'deki SG2 kademeli olarak sistemden ayrılmış ve yerine CSWT entegre edilmiştir. Bu santral, her biri 75 metre kanat uzunluğunda 15 adet türbinden oluşmakta ve toplam 900 MVA kurulu güce sahiptir. Türbinler, nominal 15 m/s rüzgâr hızında çalışacak şekilde modellenmiş olup, her biri PSAT ortamında üçüncü dereceden bir asenkron jeneratör ve esnek mil sistemiyle temsil edilmektedir. Rüzgâr üretim sistemi, bara 6 üzerinden PV barasına entegre edilmiştir. Bu noktada aktif güç üretimi 1.0 pu (100 MVA baz) olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma için, SG2'nin bağlı olduğu PV barasında aktif güç 7 pu olarak tanımlanmıştır.

Rüzgâr enerjisi sisteminin entegrasyonu kademeli olarak 100 MVA'dan 600 MVA'ya çıkarılmış, SG2'nin üretim katkısı da aynı oranda azaltılmıştır. Rüzgâr türbinlerine ait yüksek frekanslı salınım modlarının penetrasyon arttıkça daha belirgin ve kararlı hâle geldiği Şekil 4'te gözlemlenmektedir. Düşük güç seviyelerinde zayıf sönümlü görülen bu modlar, yüksek penetrasyonda daha iyi sönümlenmiş ve gerçel eksende sola kaymıştır. Bu, türbin iç dinamiklerinin yüksek penetrasyonda daha etkin biçimde sönümlendiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu gelişmenin sistemin genel kararlılığına katkısı sınırlı kalmaktadır.

SG2'nin sistemdeki katkısının azaltılmasıyla birlikte alanlar arası modların frekansı 1.03 Hz'den 0.93 Hz'e düşmüş, sönüm oranları da belirgin biçimde azalmıştır. Bu değişim, özellikle Şekil 4c ve 4f arasında açık bir şekilde gözlemlenmektedir. SG2'nin sistemde bulunması, bu modların sönümünde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca CSWT'ye ait yaklaşık 0.75 Hz civarındaki geçiş modları her senaryoda görülmekte, rüzgâr katkısı arttıkça bu modların sönüm oranlarında kısmi iyileşmeler sağlanmaktadır. Ancak bu modların sistem kararlılığı üzerindeki etkisi yine sınırlı kalmaktadır.

Alan 2'deki SG4 katkısının kademeli azaltılması ve yerine Bara 10 üzerinden CSWT'nin 100–600 MVA aralığında

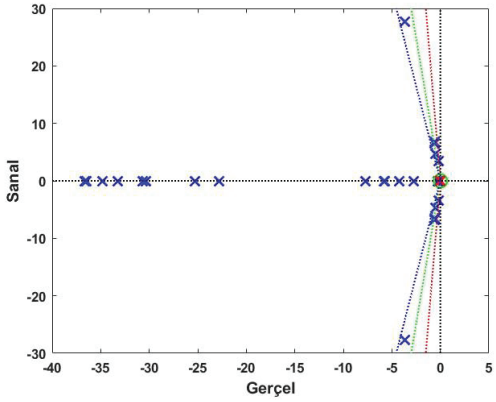
Tablo 5 Senaryo 4 için Hat Uzunluklarının Küçük Sinyal Kararlılık Analizine Etkisi

Senaryo-4	Hat 7-8 (km)	Hat 8-9 (km)	Ara-Bölge Özsalınım Frekansı (Hz)	Sönüm Oranı (%)	En Etkili Durum Özdeğeri
4a	110	110	0.546	3.77	$\delta_4, \omega_4 = -0.1294 \pm 3.4273$
4b	220	110	0.415	5.64	$\delta_4, \omega_4 = -0.14711 \pm 2.6055$
4c	110	220	0.415	5.64	$\delta_4, \omega_4 = -0.14716 \pm 2.6056$
4d	220	220	0.031	1	$e'q_1, e'q_2 = -0.1944 \pm 0.0029$

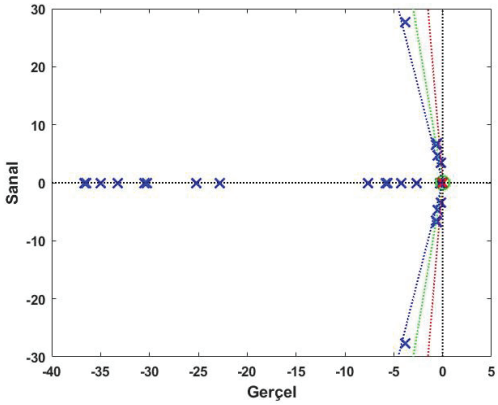
entegrasyonu ile sistemin küçük sinyal kararlılığı, Tablo 6'daki özdeğer verilerine dayanarak incelenmiştir. Düşük penetrasyonda (100 MVA CSWT), SG4 ana üretici konumundayken alanlar arası modlar 1.08 Hz frekans ve yeterli sönüm oranıyla kararlı bir yapı sergilemiştir. Ancak CSWT kapasitesi arttıkça bu modların frekansları sırasıyla 1.02 Hz (300 MVA) ve 0.97 Hz (600 MVA) seviyelerine gerilemiş, özdeğerlerin gerçel bileşenleri sıfıra yaklaşarak sönüm oranlarında belirgin azalmalar yaratmıştır. CSWT'ye ait yaklaşık 4.39 Hz'deki yüksek frekanslı modlarda ise tüm senaryolarda sönüm oranlarında iyileşme görülmüş (gerçel bileşenler –3.59'dan –4.42'ye kaymıştır), ancak bu gelişme sistemin genel kararlılığına sınırlı katkı sağlamıştır. Ayrıca 0.75–0.77 Hz aralığında gözlenen geçici modlar özellikle orta penetrasyon düzeylerinde daha belirgin hale gelmiş, fakat bütüncül kararlılık üzerinde sınırlı etki göstermiştir. Alan 1 ile kıyaslandığında, SG4'ün bulunduğu Alan 2'nin zayıf bağlanmış topolojisi nedeniyle CSWT entegrasyonu alanlar arası sönüm oranlarını daha olumsuz etkilemiştir. Sonuç olarak, yüksek rüzgâr penetrasyon senaryolarında yalnızca kapasite değil, entegrasyon noktası da sistem kararlılık açısından kritik önemdedir.

Senaryo 6 kapsamında, SG2 jeneratörünün devre dışı bırakılarak aynı güçte (700 MVA) CSWT ile ikame edilmesiyle elde edilen sistem davranışı, benzer şekilde SG4'ün devre dışı bırakıldığı ve aynı koşullarda eşdeğer güçte bir birimin eklendiği alternatif senaryo ile karşılaştırılmıştır. Özdeğer analizi ve katılım faktörlerine göre yapılan değerlendirmede, Şekil 5'te görüleceği üzere SG2'nin devre dışı bırakıldığı durumda sistemde 2 adet pozitif gerçel özdeğer tespit edilmiştir. Bu durum, sistemin bazı modlarında kararsızlık eğilimini göstermektedir. Buna karşılık, SG4'ün devre dışı bırakıldığı senaryoda Şekil 6'da görülen yalnızca 1 adet pozitif gerçel özdeğer gözlemlenmiş ve sistemin daha kararlı bir yapı sunduğu görülmüştür.

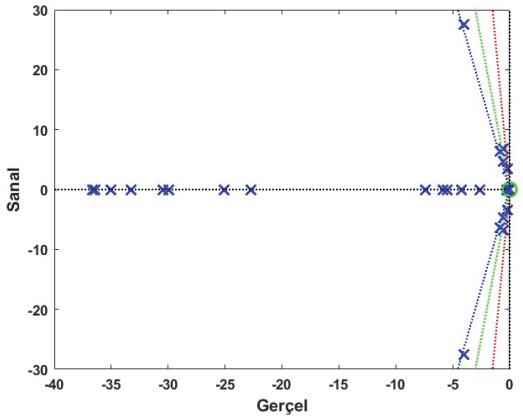
Her iki durumda da düşük sönümlü karmaşık eşlenik modlar yaklaşık 1.05–1.08 Hz frekans aralığında yer almakta olup, sönüm oranları oldukça düşük seviyededir. Bu modlar, rotor açı senkronizasyonuna dair önemli veriler sunarken, sönüm oranları açısından senaryolar arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Yeni eklenen birime ait karakteristik modlar incelendiğinde, her iki senaryoda da bu modların yaklaşık 3.8 Hz frekansında olduğu ve sisteme güçlü şekilde entegre oldukları görülmektedir. SG2 senaryosunda bu modların sönüm katsayısı daha yüksektir (≈ -2.98). SG4 senaryosunda ise bu değer yaklaşık -2.56 civarında olup, salınım etkisinin daha uzun sürdüğü anlaşılmaktadır. Katılım faktörleri açısından değerlendirildiğinde, her iki durumda da düşük frekanslı modlara en fazla katkıyı δ_1 ve ω_1 değişkenlerinin yaptığı, özellikle SG1'in rotor dinamiğinin sistemde merkezi bir rol oynadığı belirlenmiştir.



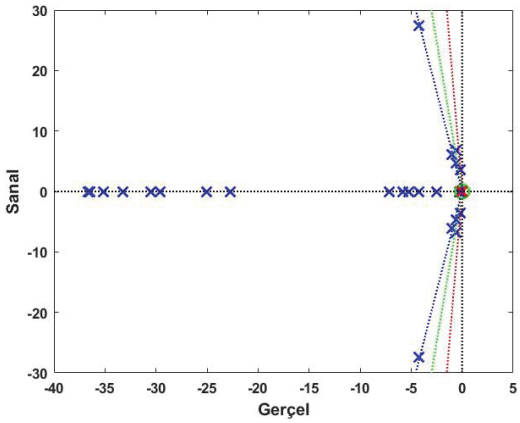
Şekil 4a. CSWT 100 MVA / SG2 600 MVA



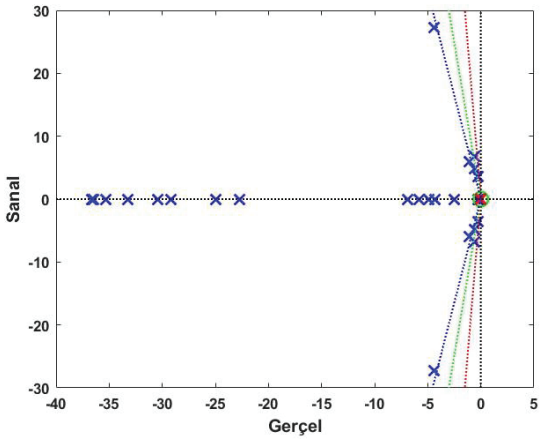
Şekil 4b. CSWT 200 MVA / SG2 500 MVA



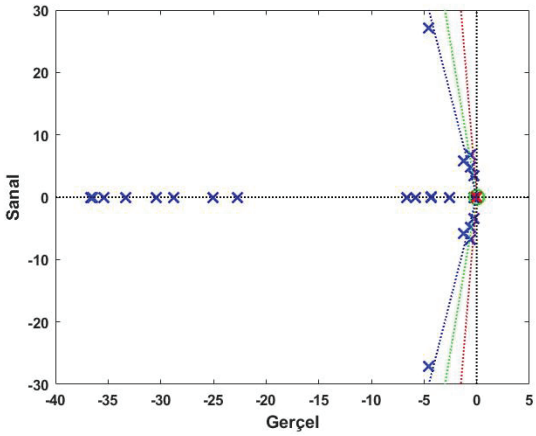
Şekil 4c. CSWT 300 MVA / SG2 400 MVA



Şekil 4d. CSWT 400 MVA / SG2 300 MVA



Şekil 4e. CSWT 500 MVA / SG2 200 MVA



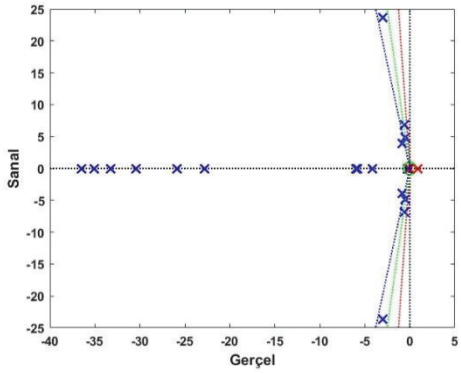
Şekil 4f. CSWT 600 MVA / SG2 100 MVA

Şekil 4. Senaryo 5 için Senkron Jeneratör 2'nin Kademeli Azaltıldığı Durumda Özdeğer Analizi

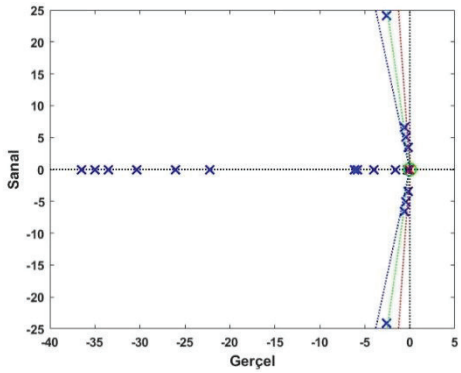
SG2 senaryosunda bu modların daha dengeli ve hızlı sönümlendiği, SG4 senaryosunda ise etkilerinin daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, SG4'ün devre dışı bırakıldığı senaryo daha kararlı bir işletme profili sunarken, SG2 senaryosu yeni birimin sisteme daha hızlı ve etkin şekilde entegre olduğunu göstermektedir. Hangi jeneratörün devre dışı bırakıldığı, sistemin dinamik performansını belirgin ölçüde etkilemektedir.

Tablo 6 Senaryo 5 için Alan 2'de CSWT Penetrasyonunun Arttırılmasında Kritik Durumlar

CSWT Gücü (MVA)	SG4 Gücü (MVA)	Alanlar-Arası Mod Frekansı (Hz)	Alanlar-Arası Sönüm Oranı	CSWT Mod Frekansı (Hz)	CSWT Mod Gerçel Kısmı
100	600	1.08	0.081	4.37	-3.59
200	500	1.05	0.068	4.38	-3.82
300	400	1.02	0.053	4.39	-3.98
400	300	1.0	0.041	4.39	-4.15
500	200	0.98	0.035	4.39	-4.32
600	100	0.97	0.027	4.39	-4.42



Şekil 5. Senaryo 6 için SG2'nin Devre Dışı Bırakılması



Şekil 6. Senaryo 6 için SG4'ün Devre Dışı Bırakılması

4. SONUÇ

Bu çalışmada, güç sistemlerinin dinamik davranışlarının incelenmesine yönelik olarak Kundur'un yaygın şekilde referans alınan iki alanlı test sistemi kullanılmış ve bu model üzerinde PSAT ortamında kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, elektrik şebekelerinin dinamik kararlılığı, yalnızca temel sistem parametreleri olan atalet sabiti, sönüm katsayısı ve hat empedansları açısından değil, aynı zamanda sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin farklı penetrasyon seviyelerinde entegrasyonu da dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde, sistemin çeşitli yapılandırmalar altında nasıl davrandığını analiz edebilmek amacıyla, farklı işletme koşullarını temsil eden senaryolar tanımlanmış ve her bir senaryo özelinde sistem tepkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tüm modların belirli parametre değişimlerine karşı farklı düzeylerde duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle düşük ataletli bölgelerde kararlılığın zayıfladığı ve bazı durumlarda kararsızlığa yakın modların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

REFERANSLAR

[1] W. Dong, W. Du, X. Xie, and H. F. Wang, "An Approximate Aggregated Impedance Model of a Grid-Connected Wind Farm for the Study of Small-Signal Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 5, pp. 3847–3861, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3138107.

[2] W. Liu, R. Ge, H. Li, and J. Ge, "Impact of Large-Scale Wind Power Integration on Small Signal Stability Based on Stability Region Boundary," *Sustainability*, vol. 6, no. 11, pp. 7921–7944, Nov. 2014, doi: 10.3390/su6117921.

[3] W. Liu, R. Ge, Q. Lv, H. Li, and J. Ge, "Research on a Small Signal Stability Region Boundary Model of the Interconnected Power System With Large-Scale Wind Power," *Energies*, vol. 8, no. 4, pp. 2312–2336, Mar. 2015, doi: 10.3390/en8042312.
[4] D. Xie, Y. Lu, J. Sun, and C. Gu, "Small Signal Stability Analysis for Different Types of PMSGs Connected to the Grid," *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 149–164, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.01.021.
[5] Y. Xu, M. Zhang, L. Fan, and Z. Miao, "Small-Signal Stability Analysis of Type-4 Wind in Series-Compensated Networks," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 1, pp. 529–538, Sep. 2019, doi: 10.1109/tec.2019.2943578.
[6] D. Gautam, V. Vittal, and T. Harbour, "Impact of Increased Penetration of DFIG-Based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1426–1434, May 2009, doi: 10.1109/tpwrs.2009.2021234.
[7] L. Yang, Z. Xu, J. Østergaard, Z. Y. Dong, K. P. Wong, and X. Ma, "Oscillatory Stability and Eigenvalue Sensitivity Analysis of a DFIG Wind Turbine System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 328–339, Jan. 2011, doi: 10.1109/tec.2010.2091130.
[8] J. Ma, Y. Qiu, Y. Li, W. Zhang, Z. Song, and J. S. Thorp, "Research on the Impact of DFIG Virtual Inertia Control on Power System Small-Signal Stability Considering the Phase-Locked Loop," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 2094–2105, Jul. 2016, doi: 10.1109/tpwrs.2016.2594781.
[9] B. Mehta, P. Bhatt, and V. Pandya, "Small Signal Stability Analysis of Power Systems With DFIG Based Wind Power Penetration," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 58, pp. 64–74, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.01.005.
[10] B. Mehta, P. Bhatt, and V. Pandya, "Small Signal Stability Enhancement of DFIG Based Wind Power System Using Optimized Controllers Parameters," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 70, pp. 70–82, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.01.039.
[11] X. Y. Bian, Y. Geng, K. L. Lo, Y. Fu, and Q. B. Zhou, "Coordination of PSSs and SVC Damping Controller to Improve Probabilistic Small-Signal Stability of Power System With Wind Farm Integration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2371–2382, Aug. 2015, doi: 10.1109/tpwrs.2015.2458980.
[12] S. Essallah, A. Bouallegue, and A. Khedher, "Integration of Automatic Voltage Regulator and Power System Stabilizer: Small-signal Stability in DFIG-based Wind Farms," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 1115–1128, Jun. 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0539-0.
[13] R. Shankar, R. Bhushan, and K. Chatterjee, "Small-signal Stability Analysis for Two-area Interconnected Power System With Load Frequency Controller in Coordination With FACTS and Energy Storage Device," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 603–612, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.asej.2015.06.009.
[14] H. Zhang, W. Xiang, W. Lin, and J. Wen, "Grid Forming Converters in Renewable Energy Sources Dominated Power Grid: Control Strategy, Stability, Application, and Challenges," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, Jan. 2021, doi: 10.35833/mpce.2021.000257.
[15] H. Xin, C. Liu, X. Chen, Y. Wang, E. Prieto-Araujo, and L. Huang, "How Many Grid-Forming Converters Do We

Need? A Perspective From Small Signal Stability and Power Grid Strength," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1–13, Jan. 2024, doi: 10.1109/tpwrs.2024.3393877.
[16] W. Du, Q. Fu, and H. F. Wang, "Power System Small-Signal Angular Stability Affected by Virtual Synchronous Generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 3209–3219, Jan. 2019, doi: 10.1109/tpwrs.2019.2896149.
[17] Z. Gong and H. Yuan, "Identifying and Assessing Small-Signal Stability of Grid-Tied VSCs Considering Multiple Modes," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 101183–101194, Jan. 2023, doi: 10.1109/access.2023.3315236.
[18] M. Raza, E. Prieto-Araujo, and O. Gomis-Bellmunt, "Small-Signal Stability Analysis of Offshore AC Network Having Multiple VSC-HVDC Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 830–839, Jul. 2017, doi: 10.1109/tpwrd.2017.2725982.
[19] M. Amin and M. Molinas, "Small-Signal Stability Assessment of Power Electronics Based Power Systems: A Discussion of Impedance- and Eigenvalue-Based Methods," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 5014–5030, Jun. 2017, doi: 10.1109/tia.2017.2712692.
[20] F. P. Demello and C. Concordıa, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," Mar. 1969.
[21] S. Ghimire, K. V. Kkuni, E. D. Guest, K. H. Jensen, and G. Yang, "Impact of Synchronous Condensers on Small-Signal Stability of Offshore Wind Power Plants," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 168018–168029, Jan. 2024, doi: 10.1109/access.2024.3497669.
[22] N. Hatziargyriou *et al.*, "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended," journal-article, Jul. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3041774
[23] J. Shair, H. Li, J. Hu, and X. Xie, "Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and Power Electronics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 111111, Jul. 2021. doi:10.1016/j.rser.2021.
[24] S. Y. Kong, R. C. Bansal, and Z. Y. Dong, "Comparative small-signal stability analyses of PMSG-, DFIG- and SCIG-based wind farms," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 87–97, Dec. 2011, doi: 10.1080/01430750.2011.640802.
[25] "Small-Signal Stability Analysis and Control - Power System Dynamic Performance Committee," *Power System Dynamic Performance Committee*, Oct. 28, 2022. https://cmte.ieee.org/pes-psdp/benchmark-systems-2/
[26] P. Kundur, *Power System stability and control*. McGraw-Hill Companies, 1994.
[27] F. Milano, "Power System Analysis Toolbox," PSAT version 2.1.11 Apr. 2022.

RÜZGÂR SANTRALLERİNDE AERODİNAMİK ETKİLEŞİMLERE BAĞLI AZALAN VERİMLİLİK, DİKEY EKSENLİ TÜRBİNLER İLE GERİ KAZANILABİLİR Mİ?

B. Kıvanç Deneçli
REDOCSE, İzmir
kivanc.denecli@redocse.com

Abstract:

In wind farms, improper placements of horizontal-axis wind turbines cause significant efficiency losses due to the wake effect that occurs behind the turbines. In this study, which uses the literature review method, scientific research is shared showing that the integration of vertical-axis wind turbines between existing horizontal-axis turbines increases overall system energy efficiency by reducing aerodynamic interactions. Research based on simulations and field experiments shows that these hybrid structures can accelerate investment returns and be implemented with minimal intervention to existing infrastructures. In addition, some information about vertical-axis wind turbines (VAWT) will be given, and their advantages and disadvantages compared to horizontal-axis turbines will also be discussed.

Keywords: *Vertical-axis wind turbine (VAWT), horizontal-axis wind türbine (HAWT), wind farm, energy density, wake effect, sector management, hybrid layout.*

Özet

Rüzgâr santrallerinde, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin uygun olmayan yerleşimleri, türbinlerin arkasında oluşan wake (rüzgar gölgelenmesi) etkisi nedeniyle ciddi verim kayıplarına yol açmaktadır. Literatür derleme metodu kullanılan bu çalışmada, mevcut yatay eksenli türbinlerin arasına dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin entegre edilmesinin, aerodinamik etkileşimleri azaltarak sistem genelinde enerji verimliliğini artırdığına dair bilimsel araştırmalar paylaşılmaktadır. Simülasyon ve saha deneylerine dayalı araştırmalar, bu hibrit yapıların yatırım geri dönüşünü hızlandırabileceğini ve mevcut altyapılara minimum müdahale ile uygulanabileceğini göstermektedir. Bunun yanında dikey eksenli türbinler (VAVT) hakkında bazı bilgiler verilecek ve yatay eksenli türbinlere göre avantaj ve dezavantajları da ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Dikey eksenli rüzgâr türbini (VAWT), Yatay eksenli rüzgar türbini (HAWT), rüzgar enerji santrali, enerji yoğunluğu, rüzgâr gölgelenmesi, sektör yönetimi, hibrit yerleşim.*

GİRİŞ

Geçmişten günümüze enerji ihtiyacı hali hazırda logaritmik olarak artış gösterirken, gelecekte elektrikli araçlar ve özellikle yapay zekânın ihtiyacı olan elektrik enerjisi de eklenince mevcut altyapı bu talebe aynı hızla karşılık verebilecek midir? Bu açıdan bakıldığında tüketim yerinde üretim ve mevcut lisanslı yenilenebilir enerji santral kapasitelerinin daha verimli kullanılması gerekliliği şimdiden düşünülmelidir.

Tüketim yerinde üretim önündeki izin vb engeller, mevcut lisanslı enerji üretim tesislerindeki elektrik kapasite limiti sabit tutularak mekanik kapasitelerin arttırılması gibi önermeler, altyapı yetersizliği nedeni ile geciken tahsis sorunları hızlıca değerlendirilmelidir.

Enerji ihtiyacı bu kadar hızlı artış gösterirken, enerji yatırımlarının da aynı ivme ile ilerlemesi yanı sıra mevcut üretimdeki tesislerin enerji verimliliğini de arttırmak oldukça önemlidir.

Enerji verimliliğini arttırmanın çeşitli yollarından biri üretim kayıplarını azaltmak, enerji yoğunluğunu arttırmak gibi optimizasyonlar üzerinde çalışmaktır.

Rüzgâr enerji santrallerinde büyük verim kayıplarına neden olan birçok faktörden biri sektör yönetimidir. Bu problemi aşmak için türbinler arasında mesafe zorunluluğu doğmaktadır. Bu da enerji yoğunluğunu düşüren en önemli etmendir. Kanat boyları arttıkça düşeyde azalan w/m2 miktarı mesafenin de artmasıyla yatayda da azalmaktadır. Bu noktada mevcut kurulmuş geleneksel yatay eksenli türbinlerin yanlarına dikey eksenli türbinlerin eklenmesi w/m^2 anlamında verimi arttıracak ve ayrıca santral bazında güç eğrisi grafiğinin eğimini arttıracak dolayısı ile daha düşük rüzgârlarda tam yüke çıkılmasını sağlayacaktır. Bu yazıda bu teoriyi destekleyen çalışmalar derlenmiş, dikey eksenli rüzgâr türbinleri hakkında bilgiler verilmiştir.

1-RÜZGÂR GÖLGELENMESİ (WAKE AFFECT)

Rüzgâr santrallerinde, üretim esnasında operasyonel ve çevresel bazı kısıtlamalar mevcuttur. Bu kısıtlamaların neden olduğu, ülkemizdeki toplam üretim kaybı hakkındaki verilere ulaşılabilen açık bir kaynak bulunmamaktadır. Bu kısıtlamalar; sektör yönetimi, şebeke limitlemesi, gölge efekti, desibel optimizasyonu, kuş göç zamanı gibi zorunlu birtakım nedenlerden kaynaklanmaktadır. Yazıda aerodinamik etkileşim nedenli sektör yönetimi ele alınacaktır.

İngilizce' de "wake effect" olarak adlandırılan terim, Türkçe' ye sözcük olarak uyanma etkisi olarak çevrilse de teknik olarak yaygın kullanılan terim gölgelenme etkisi ya da rüzgâr gölgelenmesidir. Bu yazıda bu terim rüzgâr gölgelenmesi olarak kullanılacaktır. Şekil-1'de rüzgâr türbinlerinin arkalarında bıraktığı rüzgâr gölgelenmesi fotoğrafı görülmektedir.



Şekil-1 Vatenfall'den bir görüntü-Fotoğraf: Christian Steiness [2]

Belirli bir kinetik enerji ve yapıya sahip olan rüzgâr, bir rüzgâr türbini ile karşılaştığında kinetik enerjisinin en fazla Betz limiti kadar miktarını(%59,3) rüzgâr türbininde mekanik enerjiye dönüştürmek üzere bırakır ve yapısı da bozularak yoluna devam eder.

Rüzgâr gölgelenmesi rüzgârın, türbinlerin içinden geçtikten sonra, türbinlerin arkasında daha yavaş ve türbülanslı bir hava akımı yaratması olgusudur. [1]

Arazinin doğasında var olan atmosferik olaylardan da kaynaklanabilen türbülansların haricinde, rüzgâr gölgelenmesinin diğer türbinlere etkisi türbinlerin sık aralıklarla yerleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumun rüzgâr santrallerine; azalan enerji üretimi, türbinlerin mekanik stresten ötürü azalan kullanım ömürleri ve artan bakım maliyetleri, rüzgâr santralinin finansal fizibilitesine etkisi gibi olumsuz etkileri vardır.[2]

2-SEKTÖR YÖNETİMİ (SECTOR MANAGEMENT)

Geleneksel yatay rüzgâr türbinleri; rüzgâr yönüne göre, kanatların bağlandığı makine dairesinin (nasel) eksenini hareket ettirerek (yaw hareketi) rüzgârdan maksimum kinetik enerjiyi almak ister. Eğer bu eksen komşu rüzgâr türbinleri ile aynı eksende olursa; arkada kalan rüzgâr türbini öndeki rüzgâr türbininin rüzgâr gölgesinde kalmış olur. Dolayısı ile hem kinetik enerjisi azalmış hem de yapısı bozulmuş rüzgâr formuna maruz kalır. Bu yapısı bozulan rüzgâr, türbinde mekanik strese dolayısı ile artan mekanik arızalara ve bakım maliyetlerine yol açarken üretimi de önemli ölçüde düşürür.

IEC tarafından henüz onaylanmamış olsa da geliştiriciler, bazen özel rüzgâr koşullarında belirli türbinleri kapatarak veya yük azaltıcı modlarda çalıştırarak türbülansın etkilerini hafifletmektedir.[3]

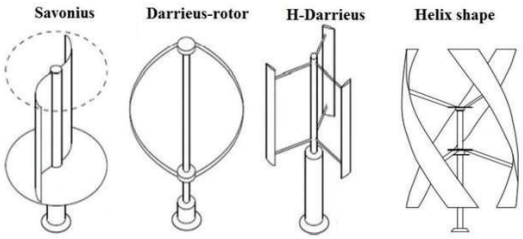
WSM (Wind Sector Management), belirli yönlerden gelen rüzgârı sınırlayarak türbinlerin güvenliğini ve yapısal bütünlüğünü korumaya yönelik bir yöntemdir. Ancak, fazla muhafazakâr yaklaşımlar enerji üretiminde kayıplara yol açabilmektedir. Nabla, yaptığı çalışmada rüzgâr çiftliklerinde uygulanan muhafazakâr WSM stratejilerinin performans ve yapısal bütünlük üzerindeki etkilerini analiz ederek, daha az kısıtlayıcı ve türbin bazlı çözümler geliştirmişlerdir. Ayrıntılı aeroelastik yük analizleri, rüzgâr koşulları ve SCADA verilerine dayalı olarak oluşturulan yeni stratejilerle, güvenliği korurken enerji üretiminde %5'e varan artış sağlamışlardır. [4]

Türkiye'de sektör yönetimi kaynaklı toplam kayıp hakkında bilgi verici açık bir kaynak bulunamadı.

3-DİKEY RÜZGÂR TÜRBİNLERİ VE KRONOLOJİK GELİŞİMİ

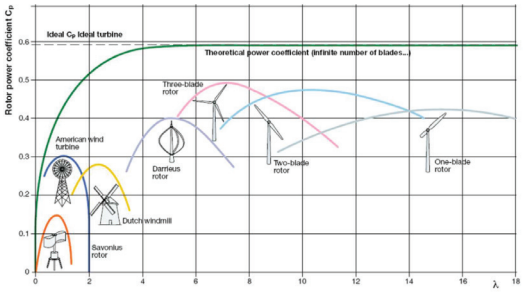
Rüzgâr türbinleri, dönüş eksenine göre iki ana kategoriye ayrılırlar: yatay eksenli rüzgâr türbinleri (Horizontal Axis, HAWT) ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri (Vertical Axis, VAWT). Büyük Rüzgâr çiftliklerinde, yüksek verimlilikleri nedeniyle yatay eksenli türbinler daha yaygındır ve bu da yatırımın geri dönüşünü artırır. Ancak "tüketim yerinde üretim" amaçları için küçük dikey eksenli türbinler, yatay eksenli küçük türbinlere kıyasla tercih edilebilir. Bunun başlıca nedenleri: türbinin sürekli rüzgâr yönüne göre ayarlama (yaw) gereksinimi yoktur, türbin kanat açılarını değiştirmeye yarayan sistem (pitch sistemi) yoktur. Tesis yerdedir dolayısı ile işletme ve bakım maliyetleri azdır. Türbülanslı veya bozulmuş akışlarda daha iyi performans gösterir ve daha az gürültü yayarlar.[5]

VAWT'ler, Savonius, Darrieus ve hibrit türleri olmak üzere sınıflandırılırlar. Savonius rotorları; sürükleme kuvveti ile çalışır ve basit su çarklarına benzer. Başlatmaları kolaydır ancak verimleri düşüktür. Darrieus rotorları, kaldırma kuvveti ile çalışır, Savonius'a göre daha yüksek verim sağlar, ancak kendi kendine başlatma kapasitesi düşüktür. Bu tür içinde, H-Darrieus modeli düz kanatlara sahip olup, üretimi daha kolay ve bakımı daha azdır. Hibrit rotorlar, Savonius ve Darrieus tasarımlarını birleştirir; hem verimi hem de kendi kendine başlatma yeteneğini artırmayı amaçlar. (Şekil-2)



Şekil-2 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Tipleri [6]

Şekil-3 'de farklı tipteki rüzgâr türbinlerinde rotor güç katsayısının (Cp) ortalama uç hız oranına (TSR) göre değişim eğrisi gösterilmektedir. Görüleceği üzere Savonius tipi VAWT'ların hızları düşük, torku yüksek ancak Cp değerleri düşüktür. Darrieus tipi VAWT'lar ise Cp değerleri HAWT'lara en yakındır ve hızları da yüksektir.



Şekil-3 Farklı tip türbinlerin Cp-λ grafikleri [7]

VAWT araştırmaları, 1970'lerdeki enerji krizi sonrası Kuzey Amerika'da yoğunlaşmış, 1987'de Kanada'da inşa edilen 3.8 MW gücündeki ÉOLE projesiyle zirveye ulaşmıştır. ÉOLE, beş yıl boyunca güvenilir şekilde çalışmış

ancak yatak arızası nedeniyle ekonomik gerekçelerle durdurulmuştur.[8]

Bu gibi gerek kaza gerek verimsiz haller nedeni ile ve ayrıca yatay eksenli türbinlerin sektörü domine etmesi ile birlikte birçok proje sonlandırılmak durumunda kalmıştır. VAWT'lerin geleceği malzeme teknolojileri, yapısal dayanım ve toplumsal kabulü artıracak yenilikçi tasarımlara bağlıdır.

Günümüzde ArborWind (ABD), Luvside (Almanya), Kliux (İspanya), Guangzhou (Çin) gibi üreticiler genellikle kentsel, kırsal ya da fabrika çatıları gibi küçük ve rüzgâr koşullarının değişken olduğu bölgelerde kullanılmak üzere üretim yapmaktadırlar.

İsveçli SeaTwirl, geleneksel yatay eksenli türbinlerin (HAWT) yerine dikey eksenli yüzer rüzgâr türbinleri (VAWT) geliştirmekte olup, 2015'ten bu yana İsveç'in Lysekil açıklarında faaliyet gösteren 30 kW'lık S1 prototipi ile tasarımının fırtına koşullarına dayanıklılığını kanıtlamıştır. Şirket, 8 Eylül 2022 tarihinde Westcon ile yaptığı anlaşma kapsamında, Norveç'in Bokn bölgesinde 1 MW kapasiteli S2x modelini kurmayı planlamaktadır. Bu model, 55 metre su üstü yapısı ve 80 metreye ulaşan su altı yapısı ile derin sularda işletim için tasarlanmıştır. Dikey eksenli türbinler rüzgâr yönüne uyum için ek mekanizmaya ihtiyaç duymamaları, bakım kolaylığı, daha düşük ağırlık merkezi sayesinde denge avantajı sağlamaları ve birim alanda daha yoğun yerleştirilebilmeleri nedeniyle, ölçeklenebilirlik sorunları aşılabildiği takdirde, 50 €/MWh altında elektrik üretim maliyetleri ile rekabetçi bir alternatif sunma potansiyeline sahiptir. [9]

Norveç Su Kaynakları ve Enerji Müdürlüğü'nün (NVE), SeaTwirl'ün S2x projesine yönelik itirazı reddetmesiyle birlikte şirket, Boknafjorden'de planlanan 1 MW kapasiteli dikey eksenli yüzer rüzgâr türbini prototipinin kurulum sürecine kesin olarak devam edebilme olanağı kazanmıştır. Projenin tamamlanmasıyla birlikte türbin, mevcut karasal trafo merkezine bağlanacak ve üretilen elektrik Haugaland Kraft tarafından satın alınacaktır. Bu gelişme, yalnızca SeaTwirl'ün Ar-Ge ve ticarileştirme sürecindeki belirsizlikleri ortadan kaldırmakla kalmayıp, aynı zamanda yüzer dikey eksenli türbinlerin deniz üstü rüzgâr enerjisi sektöründe uygulanabilirliğini göstermek açısından da önemli bir dönüm noktası teşkil etmektedir. [10]

İsveçli yüzer rüzgâr şirketi SeaTwirl AB, Verti-Go projesi kapsamında 2 MW kapasiteli yüzer dikey eksenli rüzgâr türbininin gösterimi için Avrupa Birliği Horizon Europe programından 15 milyon euro fon sağlamıştır. Proje, 1 Ekim 2025'te başlayacak olup tasarım aşaması 2026 sonunda tamamlanacak, inşaat ve operasyon süreçleri ise 2029 yılı sonuna kadar devam edecektir. University College Cork, proje koordinatörü olarak görev almakta olup, konsorsiyumda EDP – Cnet, Greenov, Next Fabrication, Sub Connected AB, Sowento, RSTER, PNO,

Bureau Veritas ve Zorlu Enerji yer almaktadır. Projede geliştirilen türbin tasarımı, kule ve sparın tek bir dönen ünite olarak entegre edilmesi sayesinde düşük ağırlık merkezi sağlamakta, çelik kullanımını azaltmakta ve bakım ile operasyon maliyetlerini düşürmektedir. Verti-Go projesi, AB'nin yenilenebilir enerji teknolojilerini geliştirme ve karbon emisyonlarını azaltma stratejileri ile uyumlu olarak, offshore rüzgar enerjisi alanında yenilikçi çözümlerin uygulanabilirliğini göstermeyi hedeflemektedir. [11]

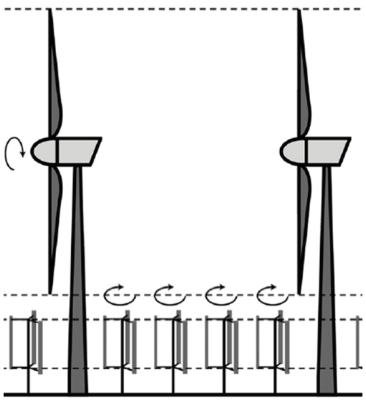
4- DİKEY RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE RÜZGÂR GÖLGELENMESİ

RMIT Üniversitesinden Harun Chowdhury ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin çevresindeki akış dinamiği ve bu dinamiklerin türbin yerleşimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, Urban Green Energy tarafından üretilen UGE-4K model dikey eksenli rüzgâr türbini kullanılmış ve ANSYS CFX yazılımı ile sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları yapılmıştır. Farklı giriş hızları ve dönüş frekansları altında türbinin wake yapısı incelenerek, sonraki türbinlerin optimal yerleşimi için uygun akış iyileşme mesafeleri belirlenmiştir. Sonuçlar, türbinin arkasındaki akışın yaklaşık 5 katı türbin çapı mesafede minimum etkiye sahip olduğunu özellikle türbinin sağ tarafındaki akış iyileşmesinin daha yavaş olduğunu göstermiştir. [12]

Rolin ve Porté-Agel, çalışmalarında rüzgâr tünelinde üç kanatlı bir dikey eksenli rüzgâr türbininin arkasındaki wake yapısını stereoskopik parçacık görüntüleme hız ölçümü (sPIV) ile incelemiştir. Sonuçlar, wake'in belirgin şekilde asimetrik olduğunu ve kanatlar rüzgâra karşı hareket ederken hız kaybı ve türbülansın arttığını göstermektedir. Çalışmaya göre, sınır tabakanın dikey hız profili, yukarıdan aşağıya momentum taşınımını artırarak wake'in toparlanmasını hızlandırmaktadır. [13]

Bu çalışmalardan; dikey eksenli türbinlerde de rüzgâr gölgelenmesinin söz konusu olduğu ve bununla beraber HAVT'lere göre gölgelenmenin daha hızlı toparlanacağı ve etkisinin 5D mesafede minimuma ineceği sonuçları çıkarılabilir.

5-DİKEY RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İLE YATAY RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ETKİLEŞİMİ



Şekil-4 HAWT ve VAWT hibrit rüzgâr santrali[14]

Shengbai Xie ve arkadaşları, Şekil-4'teki gibi büyük ölçekli yatay eksenli türbinlerin olduğu rüzgâr santraline küçük ölçekli dikey eksenli rüzgâr türbinleri eklemeyi simule etmişlerdir. VS olarak adlandırdıkları bu rüzgâr santralinde her büyük ölçekli yatay eksenli rüzgâr türbini etrafına 20 adet küçük ölçekli dikey eksenli rüzgâr türbini koymuşlardır. Yapmış oldukları modelleme ve simülasyonlara göre %32 oranında daha fazla enerji üretimi olduğunu tespit etmişler ve etrafındaki VAWT lerin wake etkisi ile HAWT ın %10 daha fazla enerji ürettiğini tespit etmişlerdir. Aynı zamanda HAWT ın wake izinin daha hızlı toparlandığı da tespit edilmiştir. Ayrıca VAWT eklemek yerine toplamda aynı güçte HAWT eklemenin maliyet olarak dezavantajlı olduğunu da ileri sürmektedirler.[14]

Hansen ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinleri (HAWT) ile küçük ölçekli dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin (VAWT) aynı rüzgâr çiftliğinde birlikte kurulmasının etkileri Large Eddy Simulation (LES) ve analitik wake modelleri kullanılarak incelenmiştir. Küçük ölçekli VAWT'ler üçgen kümeler halinde yerleştirilmiştir. Çalışmaya göre, optimal yerleşim ile küçük VAWT'lerin HAWT performansına önemli bir olumsuz etkisi olmadan, toplam enerji üretimini %21'e kadar artmıştır. Yani HAWT'ler tek başına çalıştığında elde edilen enerjiye kıyasla, birlikte kurulumla üretim ciddi şekilde artmaktadır. [15]

John O. Dabiri, yaptığı çalışmada karşı yönlü dizilimdeki VAWT'lerin, yan türbinlerle olumlu aerodinamik etkileşimlerden faydalanabileceğini ve yakın yerleşimde verim kaybını azaltabileceğini öne sürmektedir. Çalışma, bu karşı yönlü VAWT çiftlik konseptini, doğal rüzgâr koşullarında ve tam ölçekli saha ölçümleriyle incelemektedir. Alan ölçümleri, rüzgâr tüneli deneyleri veya sayısal simülasyonlar kadar kontrollü olmasa da, önerilen konseptin geçerliliğini doğrudan desteklemektedir ve gelecekteki ölçekli model deneyleri ve simülasyonlar için bir karşılaştırma verisi sağlar.

Geleneksel yatay eksenli rüzgâr türbinleri çiftlikleri yaklaşık 2–3 W/m² güç üretir. Dabiri'nin saha testleri, karşı yönlü düzenlenmiş 10 metrelik dikey eksenli rüzgâr türbinleri ile birim alan başına on kat daha yüksek güç yoğunluğu potansiyeli olduğunu göstermiştir. Bu

artış, türbinlerin yalnızca kendi verimliliklerinden değil, aynı zamanda yan rüzgâr girdaplarından kaynaklanmaktadır. [16]

6-DİKEY RÜZGÂR TÜRBİNİ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri bazı avantajlarına rağmen birkaç dezavantaja sahiptir. Öncelikle, rotor tasarımı nedeniyle tüm kanatlar aynı anda rüzgârdan enerji alamaz ve daha yüksek aerodinamik sürtünme nedeniyle dönüş verimliliği düşüktür. Genellikle yer seviyesinde kurulduğundan daha yüksek hızdaki rüzgârı kullanamaz ve bu yüzden elde edilebilecek enerji sınırlıdır. Yer seviyesinde ve yapılaşmış alanlarda çalıştıkları için kanatlar ve yataklar daha fazla stres ve titreşimle karşılaşır, bu da bakım ihtiyacını ve maliyeti artırır. Ayrıca, yatay eksenli türbinlere göre genel enerji dönüşüm verimlilikleri daha düşüktür; örneğin Savonius türbinleri Cp değerleri %10–17 iken Darrieus türbinleri %30–40 tır. Son olarak, bazı Darrieus türbinleri rüzgârla kendiliğinden dönmeyip başlatma mekanizmasına ihtiyaç duyar. [17]

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin avantajları, özellikle şehir içi ve küçük ölçekli enerji üretimi için onları cazip kılmaktadır. Bu türbinler, her yönden gelen rüzgârı yakalayabilen omnirölatif tasarımları sayesinde yön bağımsız çalışabilirler. Bu özellik, özellikle rüzgârın yönünün sık değiştiği şehir içi gibi ortamlarda önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca, VAWT'ler daha kısa aralıklarla yerleştirilebilir, bu da rüzgâr çiftliklerinde daha fazla enerji yoğunluğu elde edilmesine olanak tanır. Dikey tasarımları sayesinde daha düşük merkezkaç kuvvetine sahip olup, deniz üstü uygulamalarda daha stabil bir yapı sunar ve bakım işlemleri daha kolaydır. Bu türbinler, yer seviyesinde bulunan mekanik bileşenleriyle kurulumu ve bakımı daha erişilebilir hale getirir. Özellikle karanlık bölgelerde, güneş enerjisinin verimli olamayacağı yerlerde, VAWT'ler daha uygun bir alternatif sunar. [18]

SONUÇ

Bu derleme ve araştırmalardan elde edilen bulgularla yatay eksenli türbinlerin, getireceği avantajlar ile birlikte günümüzde yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Türbin üreticilerinin rekabetinde önemli bir parametre olan türbine uğrama sayısı, dikey eksenli türbinlerde ciddi oranda azalacağı öngörülmektedir. Bunun yanında rüzgâr gölgelenmesi konusunda zarardan çok fayda sağlayacağı çeşitli yazılarda gerek modelleme gerekse saha testleri ile ileri

sürülmektedir. Bu da enerji yoğunluğu anlamında dikey eksenli türbinlerin önemini vurgulamaktadır. Aynı şekilde küçük ölçekli uygulamalarda da düşük devreye giriş rüzgâr hızları ($V_{cut\text{-}in}$) ile avantaj sağlamaktadırlar. Yeni üretilen estetik görünümleri yanı sıra düşük desibelde çalışmaları da avantajları arasında sıralanmaktadır.

Araştırma ve üretimleri geçtiğimiz on yıllarda duraksamaya girmiş olsa da günümüzde birçok dikey eksenli rüzgâr türbini üretim firması faaliyetlerini hızlandırmışlardır. Bu gelişmelerin gerisinde kalmamak ülkemiz enerji ihtiyacı ve dışa bağımlılığı azaltma konusunda önemli yer teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Business Norway, "Wake effects and how they impact wind turbine performance," BusinessNorway.com, 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: https://businessnorway.com/articles/wake-effects-and-how-they-impact-wind-turbine-performance

(Erişim: 30.09.2025).

[2] S. Gunecha, "Exploring Wake Losses in Offshore Wind," Empire Engineering, 11 Ağu. 2023. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.empireengineering.co.uk/exploring-wake-losses-in-offshore-wind/

(Erişim: 30.09.2025).

[3] DTU Wind Energy, "Wind Sector Management," WASP, 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: https://wasp.dtu.dk/

(Erişim: 30.09.2025).

[4] Nabla Wind Hub, "Advanced Wind Sector Management (WSM) Strategies in Wind Turbines: Unlocking the Potential of Wind Assets," NablaWindHub.com, 07 Haz. 2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.nablawindhub.com/en/news/nabla-news/advanced-wind-sector-management-wsm-strategies-in-wind-turbines-unlocking-the-potential-of-wind-assets

(Erişim: 30.09.2025).

[5] F. Castellani, D. Astolfi, M. Peppoloni, F. Natili, D. Buttà ve A. Hirschl, "Experimental vibration analysis of a small scale vertical wind energy system for residential use," Machines, c. 7, s. 2, m. 35, 2019. doi: 10.3390/machines7020035.

[6] T. Tahzib, M. A. Hannan, Y. A. Ahmed ve I. Z. Mustaffa, "Performance analysis of H-Darrieus wind turbine with NACA0018 and S1046 aerofoils: Impact of blade angle and TSR," CFD Letters, c. 14, s. 2, ss. 10–23, Mar. 2022. doi: 10.37934/cfdl.14.2.1023.

[7] M. Ebrahimpour, R. Shafaghat, R. Alamian ve M. Safdari Shadloo, "Numerical investigation of the Savonius vertical axis wind turbine and evaluation of the effect of the overlap parameter in

both horizontal and vertical directions on its performance," Symmetry, c. 11, s. 6, m. 821, 2019. doi: 10.3390/sym11060821.

[8] E. Möllerström, P. Gipe, J. Beurskens ve F. Ottermo, "A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above," Renewable and Sustainable Energy Reviews, c. 105, ss. 1–13, May. 2019. doi: 10.1016/j.rser.2018.12.022.

[9] L. Blain, "1-MW floating vertical axis wind turbine to be deployed off Norway," New Atlas, 12 Eyl. 2022. [Çevrimiçi]. Erişim: https://newatlas.com/energy/seatwirl-vawt-norway/

(Erişim: 30.09.2025).

[10] A. Durakovic, "SeaTwirl cleared to install S2x prototype offshore Norway after appeal is rejected," OffshoreWind.biz, 26 Oca. 2023. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.offshorewind.biz/2023/01/26/seatwirl-cleared-to-install-s2x-prototype-offshore-norway-after-appeal-is-rejected/

(Erişim: 30.09.2025).

[11] M. Markosyan, "SeaTwirl gets EUR 15m in EU funds for floating wind demo," Renewables Now, 04 Eyl. 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: https://renewablesnow.com/news/seatwirl-gets-eur-15m-in-eu-funds-for-floating-wind-demo-1281139/

(Erişim: 30.09.2025).

[12] H. Chowdhury, I. Mustary, B. Loganathan ve F. Alam, "Adjacent wake effect of a vertical axis wind turbine," Procedia Engineering, c. 105, ss. 692–697, 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.05.058.

[13] V. Rolin ve F. Porté-Agel, "Wind-tunnel study of the wake behind a vertical axis wind turbine in a boundary layer flow using stereoscopic particle image velocimetry," J. Phys.: Conf. Ser., c. 625, m. 012012, 2015. doi: 10.1088/1742-6596/625/1/012012.

[14] S. Xie, C. L. Archer, N. S. Ghaisas ve C. Meneveau, "Benefits of collocating vertical-axis and horizontal-axis wind turbines in large wind farms," Wind Energy, c. 20, s. 1, ss. 45–62, 2016. doi: 10.1002/we.1990.

[15] M. M. Hansen, P. Enevoldsen ve M. Abkar, "Energy harvesting via co-locating horizontal- and vertical-axis wind turbines," J. Phys.: Conf. Ser., c. 1618, m. 032004, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1618/3/032004.

[16] J. O. Dabiri, "Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays," J. Renewable Sustainable Energy, c. 3, s. 4, m. 043104, 2011. doi: 10.1063/1.3608170.

[17] Luvside, "5 Disadvantages of vertical wind turbines," Luvside.de, 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.luvside.de/en/vawt-disadvantages/

(Erişim: 30.09.2025).

[18] A. Montanari, “The benefits of Vertical-Axis Wind Turbines: omnidirectional, close-packed, easier to maintain + more,” EnergyPost.eu, 08 May. 2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://energypost.eu/the-benefits-of-vertical-axis-wind-turbines-omnidirectional-close-packed-easier-to-maintain-more/

(Erişim: 30.09.2025).

ALANLAR ARASI SALINIMLAR KAPSAMINDA RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN ANALİZİ

İbrahim Nurettin Erdenk, Engin Karatepe

(ibrahimerdenk@gmail.com, engin.karatepe@ege.edu.tr)

Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Bornova, İzmir

ÖZET

Alanlar arası salınımların yetersiz sönümlenmesi, özellikle zayıf iletim hatlarına sahip güç sistemlerinde kararlılığı önemli ölçüde tehdit edebilmekte olup, bu salınımların erken tespiti ve etkin kontrolü, geniş çaplı sistem kesintilerinin önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerinde alanlar arası salınımların dinamik davranışları ile rüzgâr enerjisi santrallerinin bu salınımlar üzerindeki etkileri, santral seviyesindeki kontrolcü (PPC) varlığı ve yokluğu durumları ile birlikte şebekeye bağlantı noktası ve sistem arasındaki toplam iletim hattı empedansının değiştirilmesi senaryoları altında incelenmiştir. Analizler İsveç Ulusal Sistem Operatörü Svenska Kraftnät'ın test sistemi ve WECC (Western Electricity Coordinating Council) Tip 3 rüzgâr türbini modeli kullanılarak PSSE (Power System Simulator for Engineering) ortamında gerçekleştirilmiş ve çift beslemeli indüksiyon jeneratörlü (DFIG) rüzgâr enerji santrallerinin alanlar arası düşük frekanslı salınımların sönümlenmesindeki rolü araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, sistem topolojisi ve jeneratör konfigürasyonunun alanlar arası salınım dinamikleri üzerindeki belirleyici etkisi ortaya konmuş ve bu etkiler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Alanlar arası salınımlar, Çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG), Rüzgâr enerjisi entegrasyonu, PSSE, Güç sistemleri

1. GİRİŞ

Alanlar arası salınımlar (inter-area oscillations), enterkonnekte elektrik güç sistemlerinde, farklı bölgelere ait jeneratör kümelerinin birbirlerine göre düşük frekanslı (tipik olarak 0.1–1 Hz aralığında) karşıt yönlü salınımlar gerçekleştirmesiyle karakterize edilen karmaşık dinamik olaylardır [1]. Bu tür salınımlar, özellikle yüksek empedanslı ve uzun mesafeli iletim hatları aracılığıyla zayıf şekilde bağlanmış bölgesel sistemlerin varlığında ortaya çıkmakta olup, yeterli sönümleme sağlanmadığında sistemin senkron işletim bütünlüğünü tehlikeye sokabilecek boyutlara ulaşabilmektedir [2]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle rüzgâr enerjisi santrallerinin artan entegrasyonu, güç sistemlerinin yapısal dinamiklerini etkilemekte ve bu durum alanlar arası düşük frekanslı salınımların analizini ve yönetimini daha da önemli hâle getirmektedir. Bu bağlamda, alanlar arası salınımların analizi ve yönetimi, modern güç sistemlerinin dinamik performansının sürekliliği açısından kritik bir mühendislik problemi olarak önem arz etmektedir [3-6].

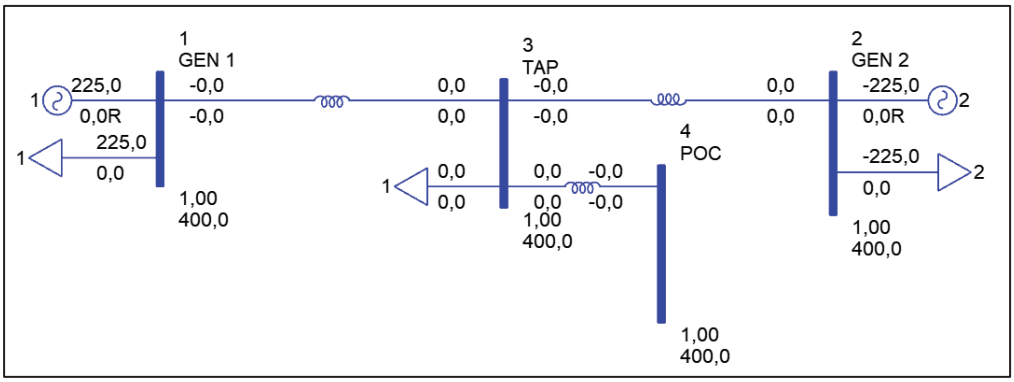
Literatürde yapılan çalışmalar, sistemdeki üretim kaynaklarının konumlandırılması, bağlantı mesafesi, güç yoğunluğu ve jeneratör konfigurasyonu gibi etmenlerin bu salınımların davranışı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır [7-9]. Özellikle çift beslemeli indüksiyon jeneratör (DFIG) tipi rüzgâr enerjisi

santrallerinin iletim sistemine olan mesafesi ve bağlanma noktası, sistemdeki alanlar arası salınım modlarının frekans ve sönümleme özelliklerini doğrudan etkilemektedir [10]. Rüzgâr enerjisi santralinin şebekeye uzaklığı arttıkça alanlar arası salınımlar daha zayıf şekilde sönümlenmekte, bazı yerleşim senaryolarında ise sistem kararlılığı ciddi şekilde azalabilmektedir [11]. Benzer şekilde, sistemdeki tüm jeneratör kümelerinin coğrafi dağılımı ve bu jeneratörlerin hangi iletim yolları üzerinden sisteme bağlandığı da, alanlar arası salınımların sönümlemesini önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan bazı çalışmalarda, rüzgâr enerjisi santrallerinin iletim sistemine olan bağlantı konumlarının değiştirilmesinin, belirli modların güçlenmesine ya da zayıflamasına neden olduğu gösterilmiştir [12]. Bu bağlamda, iletim hattı empedansları ile rüzgâr enerjisi santralinin konumu arasındaki ilişkinin alanlar arası salınım modlarının davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan, sistemdeki rüzgâr gücü penetrasyon seviyesinin artırılmasıyla birlikte, belirli alanlar arası düşük frekanslı modların sönümleme karakteristiklerinin daha hassas hâle geldiği gözlemlenmektedir. Bu durum, özellikle rüzgâr enerjisi santralleri ile sistem arasındaki bağlantı empedansının yüksek olduğu senaryolarda daha belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır [13]. Rüzgâr gücünün yoğun olarak sisteme entegre edildiği durumlarda, salınımların yapısı ve sönümlenme özellikleri üzerinde farklı etkiler görülebilmektedir. Bu etkiler yalnızca rüzgâr enerjisi santrali gücünün şebekeye giriş oranına değil, aynı zamanda üretim tesislerinin sisteme hangi noktalardan bağlandığına da bağlıdır. Bu doğrultuda, rüzgâr enerjisi santrallerinin bağlandığı noktaların konumuna göre alanlar arası salınım modlarının özelliklerinde yapısal farklılıklar gözlemlenebilmektedir [14]. Bu farklılıklar sistem içindeki güç akışlarının şekillenmesine neden olduğundan, alanlar arası salınımların sönümlenme analizlerinin daha itinalı gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır [15]. Sonuç olarak, iletim sistemi yapısının, üretim-güç yoğunluğu dağılımının ve jeneratörlerin yerleşim konumlarının birlikte değerlendirilmesi, sistemde ortaya çıkabilecek kararsızlık durumları açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, alanlar arası salınımların sistem davranışına etkileri, farklı yapısal ve dinamik koşullar altında incelenmiştir. Rüzgâr enerjisi santralinin sisteme bağlandığı noktanın elektriksel uzaklığının salınımların sönüm özellikleri üzerindeki etkisi analiz edilmiş, bu etki santral seviyesindeki kontrolcü (PPC) varlığı ve yokluğu durumları için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

2. TEST SİSTEMİ VE TİP 3 RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALİ MODELİ

Analizlerde, İsveç Ulusal Sistem Operatörü Svenska Kraftnät tarafından geliştirilen örnek test sistemi kullanılmış olup, rüzgâr enerji santralinin dinamik davranışlarını temsil etmek amacıyla çift beslemeli indüksiyon jeneratörlü (DFIG)



Şekil 1. Test Sistemi

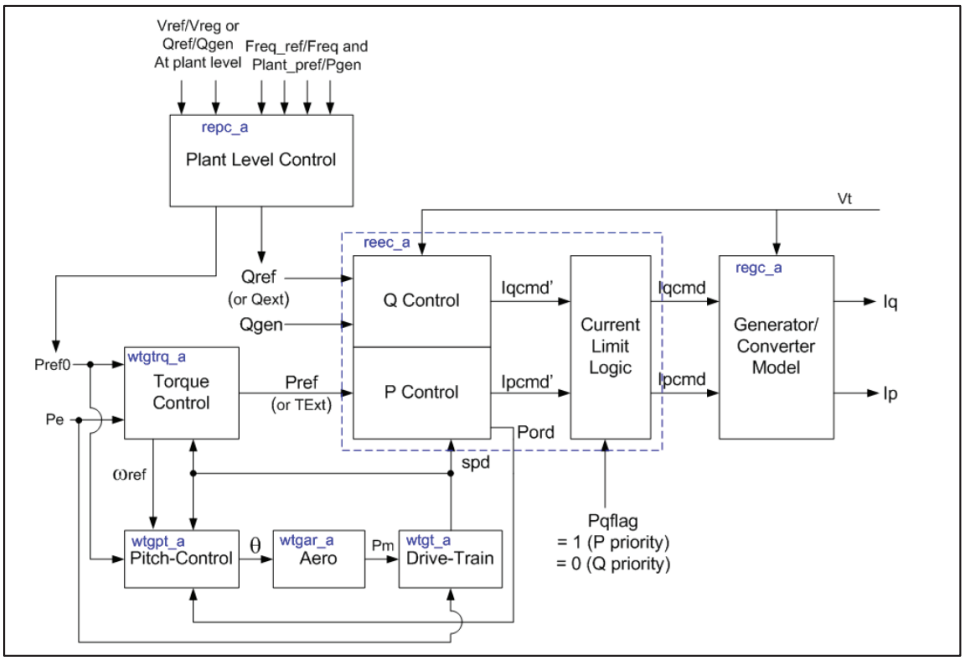
türbinler sisteme entegre edilmiştir. Simülasyon çalışmaları ise, iletim sistem dinamiklerinin detaylı olarak incelenmesine olanak tanıyan PSSE (Power System Simulator for Engineering) yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir.

2.1 Test Sistemi

Gerçekleştirilen analizlerde kullanılan alanlar arası salınımların incelenmesine olanak sağlayan test sistemi Şekil 1'de verilmiştir [16]. Bu sistem, farklı bölgelere yayılmış üretim ve yük noktaları arasında zayıf bir bağlantı hattının bulunduğu, bu sayede düşük frekanstaki salınımların kolaylıkla gözlemlenebileceği bir yapıdadır. Test sistemi, 225 MW'lık yük ve elekrik makineleri olmak üzere iki alandan oluşmaktadır. Test sisteminde yer alan senkron makineler, PSSE yazılımındaki klasik ''GENCLS'' makine yapısı ile temsil edilmektedir.

2.2 Tip 3 Rüzgâr Türbini Modeli ve Entegrasyonu

Bu çalışmada, DFIG tabanlı sistemlerin şebekeye entegrasyonunda, Batı Elektrik Koordinasyon Konseyi (WECC – Western Electricity Coordinating Council) tarafından geliştirilmiş ve yayınlanmış olan standart model referans alınmıştır [17]. WECC tarafından geliştirilen bu model seti, rüzgâr enerjisi santrallerinin şebeke üzerindeki etkilerini sistem düzeyinde analiz etmeye imkân tanıyan modüler ve detaylı bir yapı sunmaktadır. Model Şekil 2'de görüldüğü üzere, aerodinamik yapıyı, iki kütleli mekanik yapıyı (two-mass drive train), çift beslemeli indüksiyon jeneratörlü rüzgâr türbinlerinin elektriksel karakteristiklerini ve dönüştürücü tabanlı kontrol bloklarını kapsamaktadır. WECC modeli temelinde, jeneratör ve konvertör davranışlarını temsil eden REGCA1, gerilim ve reaktif güç kontrol stratejilerini içeren REECA1, mekanik model için WTDTA1 ve santral seviyesinde koordineli kontrol sağlayan REPCA1 modelleri kullanılmaktadır [18-20]. Bu koordineli kontrolü sağlayan yapı, sadece bireysel bir türbini değil, aynı zamanda bir rüzgâr enerjisi santralini temsil edebilecek (santral seviyesinde) dinamikleri de içerecek şekilde tasarlanmıştır. Rotor tarafı ve şebeke tarafı konvertörlerinin kontrol stratejileri, gerilim ve reaktif güç kontrolü, momentum tepkisi gibi önemli dinamik davranışlar model içinde detaylı olarak

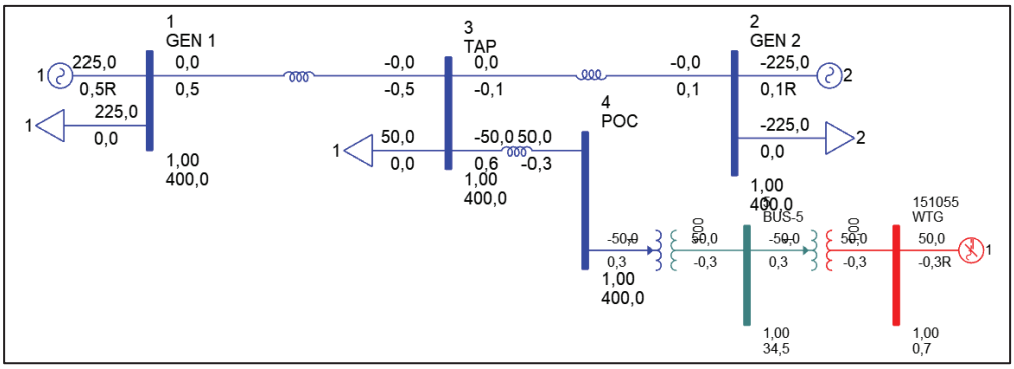


Şekil 2. WECC Tip 3 Rüzgâr Enerjisi Santrali Modeli [17]

tanımlanmıştır. Ayrıca WECC modeli, gerilim regülasyonu, frekans desteği ve arıza sonrası toparlanma gibi sistemin dinamik stabilitesini etkileyen faktörleri analiz edebilmek adına çeşitli sınırlandırıcılar ve koruma blokları da içermektedir.

Modelin entegrasyonu kapsamında, Şekil 3'teki gibi rüzgâr enerjisi santrali çıkışında yine birleştirilmiş yapıda olan 50 MVA'lık bir santral transformatörü tanımlanmış ve bu transformatör, santralin sisteme bağlandığı noktada yer alan toplam rüzgâr enerjisi santralinin %25 fazlası olacak şekilde 62,5 MVA'lık transformatör ile birlikte modellenmiştir. Bu yapıyla, rüzgâr enerjisi santralinin YG transformatörü ile şebekeyle olan bağlantısı sağlanmıştır. Bu sayede hem türbin içi hem de bağlantı noktası dinamikleri modellenebilmiş ve rüzgâr enerjisi santralinin sistem davranışı analiz edilebilmiştir.

Modelleme, toplam kurulu gücü 50 MW olan ve her biri 5 MW kapasiteli 10 adet rüzgâr türbininden oluşan bir santralin birleştirilmiş modeli olarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tüm santralin dinamik etkileri tek bir temsili türbin üzerinden analiz edilerek sistem düzeyinde karşılaştırmalı senaryoların yürütülmesi sağlanmıştır. Bu modelin kullanımı, sistem düzeyinde rüzgâr türbini etkilerini doğru bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılarken, aynı zamanda modelin yaygın kabul görmüş yapısı sayesinde farklı senaryo analizlerinin güvenilirliğini artırmaktadır. Özellikle bu çalışmada ele alınan alanlar arası salınımların modellenmesi ve bu salınımlara çift beslemeli indüksiyon jeneratör tabanlı rüzgâr türbinlerinin etkisinin incelenmesi açısından, WECC modeli hem jeneratör hem de dönüştürücü tabanlı kontrol dinamiklerini temsil edebilmesi nedeniyle uygun ve detaylı bir referans yapısı sunmaktadır.



Şekil 3. WECC Tip 3 Rüzgâr Türbinlerinden Oluşan Santralin Entegre Edildiği Test Sistemi

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE SENARYOLAR

Bu bölümde, test sistemi üzerinde gerçekleştirilen senaryolara ait simülasyon sonuçları ve ilgili analizler sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, sistemde alanlar arası salınımların ortaya çıktığı durumlar oluşturulmuş ve bu salınımların genliği ile sönüm karakteristikleri üzerine etkili olan belirli sistem parametreleri detaylı olarak incelenmiştir. Değerlendirilen senaryolar, senkron makinelerin farklı atalet (inertia) sabitleriyle modellenmesi, çift beslemeli indüksiyon jeneratör tabanlı rüzgâr enerjisi santralinin bağlantı hattı empedansının çeşitli seviyelerde tanımlanması durumlarını içermektedir. Yapılan analizler ile, her bir parametre değişikliğinin sistemdeki alanlar arası salınım modları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

3.1 Senaryolar

Alanlar arası güç salınımlarının karakteristiklerini ve çeşitli sistem parametrelerinin bu salınımlar üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla dört farklı senaryo tanımlanmıştır. Senaryolar, senkron makinelerin atalet sabiti (H), sisteme entegre edilen rüzgâr enerjisi santralinin kontrol mimarisi ve sistem bağlantı noktasındaki toplam iletim empedansı gibi değişkenler dikkate alınarak yapılandırılmıştır.

İlk iki senaryo referans durumları (base case) temsil etmekte olup, H atalet sabiti sırasıyla 12,5 s ve 0,777 s olarak belirlenirken rüzgâr enerjisi santrali kontrolcüsü aktif edilmemiştir.

Üçüncü ve dördüncü senaryolarda sistemin H atalet sabiti sabit tutulmuş (H = 12,5 s) ve çift beslemeli indüksiyon jeneratörlü rüzgâr enerjisi santralinin kontrolcüsü aktif edilerek şebekeye bağlantı noktası ile sistem arasındaki toplam iletim empedansı değiştirilmiştir. Böylece, rüzgâr enerjisi santralinin bağlandığı noktanın sistem geneline olan elektriksel uzaklığının, salınımların frekansı ve sönüm karakteristiği üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

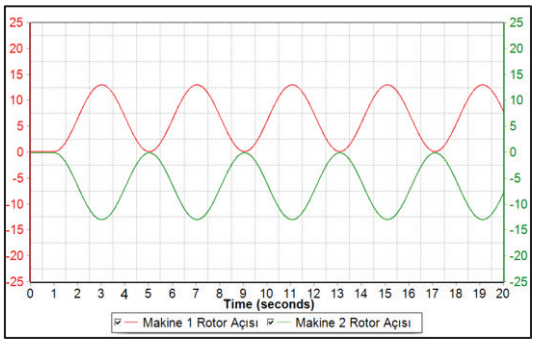
Tüm senaryolarda, Alan 1'de 225 MW, Alan 2'de ise 225 MW'lık negatif yük birinci saniyede devreden çıkarılarak alanlar arası güç salınımları başlatılmıştır. Simülasyon süresi 400 saniye olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Analizlerde Kullanılan Senaryolar

Senaryo No	Makine Atalet Sabiti (H)	Rüzgâr Enerjisi Santrali (DFIG)	Rüzgâr Enerjisi Santrali Santral Seviyesindeki Kontrolcü (PPC)	Bağlantı Noktası Empedansı
1	12,5 s	Yok	Yok	-
2	0,777 s	Yok	Yok	-
3	12,5 s	Var	Aktif	(0.1 pu X)
4	12,5 s	Var	Aktif	(0.01 pu X)

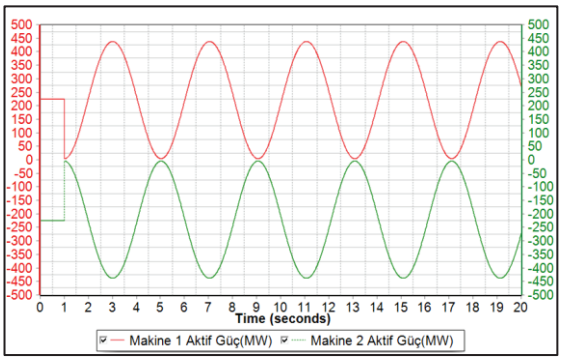
3.2 Test Sisteminin Temel Dinamik Davranışı

Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan test sistemi, alanlar arası salınım analizi için kurgulanmış iki elektrik makineli ve iki yük bölgeli basitleştirilmiş bir yapıdır. Alan 1 ve Alan 2, birbirine iletim hattı üzerinden bağlanmış olup her iki alanda da eşit büyüklükte üretim ve tüketim yer almaktadır. Bu yapı, birbirine benzer parametrelere sahip iki bölgenin, küçük bir bozucu etkiden sonra birbirine karşıt yönlü salınım göstermesine imkân tanıyarak tipik bir alanlar arası salınımların oluşmasına zemin hazırlamaktadır.



Şekil 4. Makine 1&2 Rotor Açıları

Sistemin dinamik davranışını gözlemlemek amacıyla yapılan testte, her iki alandaki yükler birinci saniyede devreden çıkarılmış ve makineler serbest dinamik cevaba bırakılmıştır.



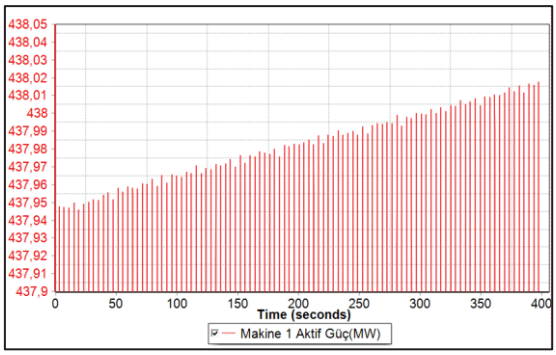
Şekil 5. Makine 1&2 Aktif Güç (MW)

Bunun sonucunda Şekil 4 ve 5'te görüldüğü üzere, iki alana ait rotor açıları ve aktif güçleri arasında zıt yönlü ve senkron bir salınım gözlemlenmiş, güç salınımlarının karakteristik olarak düşük frekanslı olduğu tespit edilmiştir.

3.3 Simülasyon Sonuçları

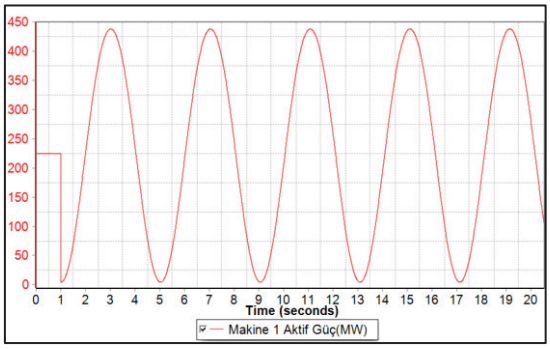
İlk iki senaryoda, senkron makinelerin H atalet sabitlerinin sistemin salınım davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, mevcut test sistemindeki iki makinenin birinci senaryoda H atalet sabiti

12,5 s olarak tanımlanmış, ikinci senaryoda ise bu değer 0,777 s seviyesine getirilmiştir. Ardından Alan 1'de 225 MW, Alan 2'de ise 225 MW'lık negatif yük birinci saniyede devreden çıkarılarak alanlar arası güç salınımları başlatılmıştır.



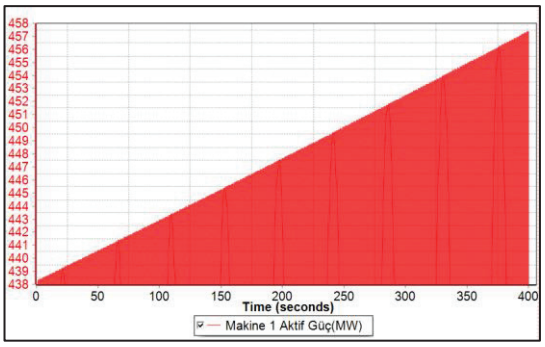
Şekil 6. Yük Atılması Sonrası Makine 1&2 H = 12,5 s İçin Senkron ve Genliği Artan Alanlar Arası Güç Salınımı

Şekil 6'da görüldüğü üzere, H atalet sabiti 12,5 s iken birinci saniyede Alan 1 ve 2'de bulunan iki yükün sistemden ayrılmasıyla birlikte makineler arasında senkron ve zamanla genliği artan bir güç salınımı başlamıştır. Bu durum, sistemde yeterli sönüm bulunmayan koşullar altında kararsız alanlar arası salınım modlarının oluşabileceğini göstermektedir.



Şekil 7. Makine 1&2 H = 12,5 s – Düşük Frekanslı (0,25 Hz) Aktif Güç Salınımı

Şekil 7'deki simülasyon sonuçlarında ise, H atalet sabiti 12,5 s olduğu durumda sistemdeki salınım periyodu yaklaşık 4 saniye olarak ölçülmüştür. Bu da 0,25 Hz'lik bir salınım frekans moduna karşılık gelmektedir.

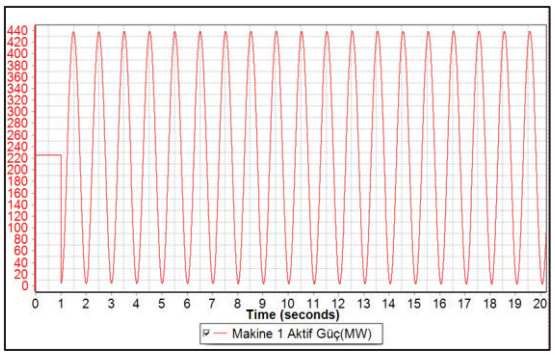


Şekil 8. Yük Atılması Sonrası Makine 1&2 H = 0,777 s İçin Senkron ve Genliği Artan Alanlar Arası Güç Salınımı

Şekil 8'de elde edilen sonuçlara göre, Alan 1'de 225 MW ve Alan 2'de negatif 225 MW büyüklüğündeki yüklerin birinci saniyede devreden çıkarılmasıyla birlikte sistemde alanlar arası güç salınımları tetiklenmiş, düşük ataletli durumda (H = 0,777 s) salınımların daha yüksek frekanslı (yaklaşık 1 Hz) bir karakter kazandığı gözlemlenmiştir. Bu durumda, salınım periyotları önemli ölçüde kısalmış, buna karşın salınım genliklerinin zamanla belirgin biçimde arttığı dikkat çekmiştir. Simülasyon 400 saniyeye kadar sürdürülmüş ve bu süre sonunda Makine 1'in aktif güç çıktısının yaklaşık 457 MW seviyesine ulaştığı tespit edilmiştir. Diğer yandan aynı koşullar altında, H atalet sabiti 12,5 s olduğu yüksek ataletli senaryoda bu değer yaklaşık 438 MW civarında kalmıştır.

Şekil 9'da ise düşük ataletli yapıdaki sistemin salınım periyodunun yaklaşık 1 saniye olduğu ve bunun 1 Hz'lik bir

salınım moduna karşılık geldiği görülmektedir.

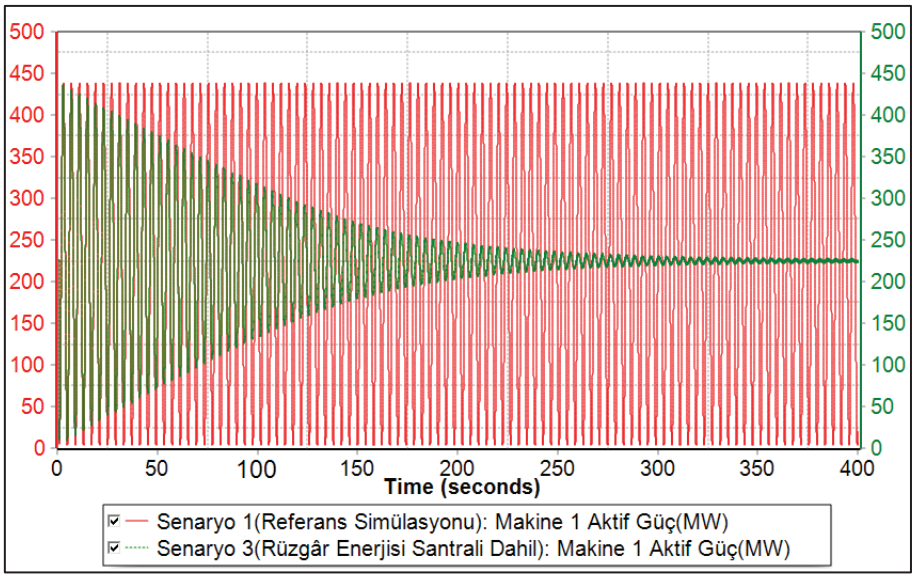


Şekil 9. Makine 1&2 H = 0,777 s – Düşük Frekanslı (1 Hz) Aktif Güç Salınımı

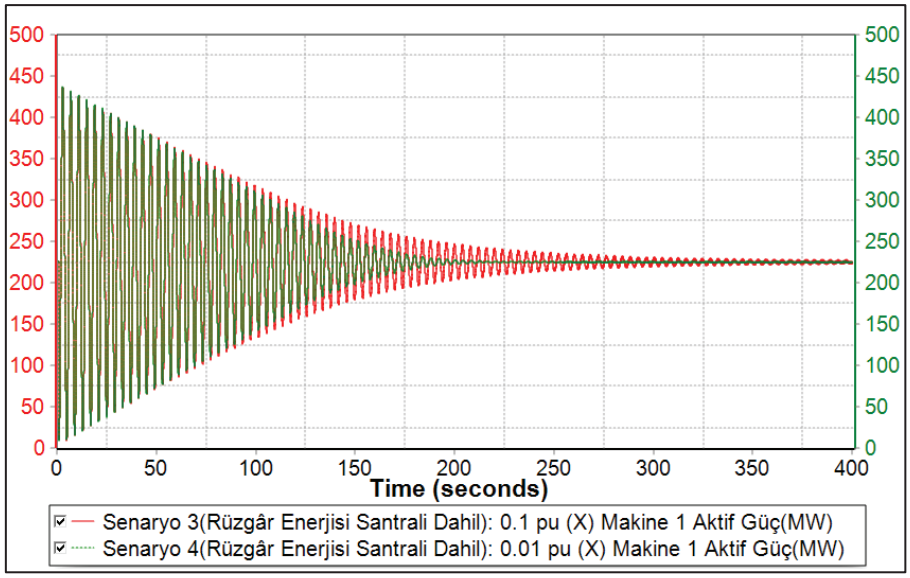
Elde edilen bulgular, sistemdeki toplam ataletin artmasıyla salınımların daha düşük frekanslı ve uzun süreli hale geldiğini, düşük atalet durumunda ise salınımların daha yüksek frekanslı, daha kısa süreli ve genliği artma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu durum, sistemin mekanik enerji depolama kapasitesinin ataletle doğru orantılı olmasıyla açıklanabilir. Ataleti yüksek makineler ani güç dengesizliklerine karşı daha dirençli davranmakta, bu direnç salınımların yayılımını geciktirerek geri kazanım sürecini uzatmakta ve sistemin doğal salınım frekansını düşürmektedir.

İlk iki senaryonun ardından, rüzgâr enerjisi santralinin mevcut test sistemine bağlandığı nokta ile 4 numaralı (POC) bara arasındaki iletim hattının farklı empedans değerleri altında sistem davranışı analiz edilmiştir. Üçüncü senaryoda, bu bağlantının elektriksel uzaklığı 0,1 pu büyüklüğünde bir reaktans ile modellenmiştir. Santralin elektrik şebekesine bağlantısı, iki kademeli transformatör yapısı ile gerçekleştirilmiştir. İlk kademe, türbin çıkışında yer alan ve 0,69/34,5 kV gerilim seviyelerinde çalışan, 50 MVA gücünde bir türbin transformatörüdür. Bu transformatör, 34,5 kV seviyesindeki iletim hattı üzerinden 5 numaralı bara aracılığıyla, 4 numaralı bara (POC) noktasında yer alan ikinci transformatöre bağlanmaktadır. İkinci kademeki transformatör ise 34,5/400 kV gerilim seviyelerine sahip olup 62,5 MVA güç kapasitesindedir. Her iki transformatör için empedans değerleri sabit tutulmuş ve 0,001 pu (R) ile 0,01 pu (X) olarak tanımlanmıştır. Bu yapı, rüzgâr enerjisi santralinin şebekeye bağlantı hattının temsilini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Buna ek olarak, rüzgâr enerjisi santralinden sisteme gönderilen 50 MW'lık aktif güce karşılık olarak, güç dengesinin sağlanabilmesi amacıyla sisteme aynı büyüklükte 50 MW'lık bir yük eklenmiştir. Böylece, yapılan salınım analizlerinde toplam aktif güç dengesi korunmuştur. Şekil 10'da görüldüğü üzere, rüzgâr enerjisi santralinin sisteme entegrasyonu sayesinde sistemdeki güç salınımları belirgin şekilde bastırılmış ve sönümleme özelliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu senaryoda, test sisteminde yer alan her iki senkron elektrik makinesinin H atalet sabiti, Senaryo 1'deki gibi 12, 5 s olarak alınmıştır.

Son olarak, Şekil 11'deki Senaryo 4 sonuçlarına göre, aynı rüzgâr enerjisi santrali yapısı ve kontrolcü korunmuş, yalnızca santralin bağlandığı iletim hattının empedansı 0,01 pu'ya düşürülmüştür. Bu 10 katlık empedans farkı, rüzgâr enerjisi santralinin şebekeye olan elektriksel uzaklığını belirgin biçimde azaltmıştır. Ayrıca, bu senaryoda da her iki senkron makinenin atalet



Şekil 10. Referans Simulasyonu(Senaryo 1) ve WECC Tip 3 Rüzgâr Enerjisi Santrali Entegrasyonu Sonucu Aktif Güç Salınım Davranışlarının Karşılaştırılması



Şekil 11. Rüzgâr Enerjisi Santralinin Şebekeye Bağlandığı İletim Hattı Empedansına Göre Aktif Güç Salınım Davranışlarının Karşılaştırılması

sabiti (H) yine 12,5 s olarak sabit kalmıştır. Bu sayede, empedans etkisi dışındaki tüm sistem parametreleri sabit tutularak karşılaştırmalı analiz yapılabilmiştir.

Bu değişiklik sonucunda, salınımların daha hızlı sönümlendiği ve sistemin kararlılığının belirgin biçimde iyileştiği gözlemlenmiştir. İletim hattı empedansı değişimi ile, rüzgâr enerjisi santralinin sisteme olan katkısı artmış ve sistemin dinamik performansında pozitif bir etki yaratmıştır. Ancak dikkat çekici biçimde, salınımın temel frekans modunun (yaklaşık 0,25 Hz) her iki senaryoda da sabit kaldığı görülmüştür.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, enterkonnekte elektrik güç sistemlerinde ortaya çıkan düşük frekanslı alanlar arası salınımların dinamik karakteristikleri ile rüzgâr enerjisi santrallerinin bu salınımlar üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Özellikle çift beslemeli indüksiyon jeneratörlü (DFIG) Tip 3 rüzgâr türbinlerinin sistem kararlılığına etkisi, farklı senaryolar altında değerlendirilmiş ve bu etkinin santralin bağlandığı noktadaki iletim empedansı gibi yapısal parametrelere bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Svenska Kraftnät test sistemi üzerinden yürütülen analizler, sistemin H atalet sabiti ile bağlantı empedansının alanlar arası salınım modları üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Ataletin düşürülmesi salınım frekansını artırmış, sistemin daha hızlı büyüyen salınımlar sergilediği görülmüştür. Buna karşılık, yüksek ataletli durumda daha yavaş ancak düşük frekanslı salınımlar oluşmuştur. Bu da salınım karakteristiğinin sistemin toplam ataletine doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın önemli bir diğer gözlemi WECC Tip 3 modeline sahip rüzgâr enerjisi santralinin entegrasyonuyla salınım genliğinin belirgin şekilde azalmasıdır. Ancak bu iyileşmenin sadece türbin tipi ya da kontrolcü ile değil, santralin sisteme bağlandığı noktanın elektriksel uzaklığı ve empedans değeriyle yakından ilişkili olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, sistemin toplam ataletinin azaltılması kararlılığı zayıflatırken, uygun kontrol stratejileriyle entegre edilen rüzgâr enerjisi santralleri bu zayıflamayı telafi edebilmektedir. Bağlantı empedansı ise sönümleme üzerinde kritik etkiye sahiptir ve frekansı değiştirmeksizin salınımların genliği ile sönüm hızını belirgin şekilde etkilemektedir. Bu bulgular, düşük ataletli ve yenilenebilir enerji entegrasyonuna sahip sistemlerde güvenli ve kararlı işletimin sağlanabilmesi için yapısal planlama ve kontrol stratejilerinin önemini göstermektedir. Bu nedenle, gelecekteki planlama ve sistem genişletme çalışmalarında sadece üretim teknolojilerinin değil aynı zamanda iletim altyapısının, sistemin genel dinamik yapısının ve kontrol altyapısının da birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

REFERANSLAR

[1] N. A. Azhari, A. A. Adam, Damping of Low Frequency Inter-Area Oscillations on Stressed Tie-Line using PSS, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), Vol. 4, no. 6, June 2017.

[2] M. Garmroodi, D. J. Hill, G. Verbič, and J. Ma, Impact of Tie-Line Power on Inter-Area Modes With Increased Penetration of Wind Power, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 4, pp. 3051–3059, July 2016.

[3] Ayyarao S. L. V. Tummala, A Robust Composite Wide Area Control of a DFIG Wind Energy System for Damping Inter-Area Oscillations, Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 5, no. 3, pp. 1–10, July 2020.

[4] M. Bernal-Sancho, M. P. Comech, and N. Galán-Hernández, Damping Control in Renewable-Integrated Power Systems: A Comparative Analysis of PSS, POD-P, and POD-Q Strategies,

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 162, 2024.

[5] S. Alalwani, S. Isik, and S. Bhattacharya, Inter-area oscillation damping controller for DFIG based wind power plants, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, Oct. 2022.

[6] G. Tsourakis, B. M. Nomikos, and C. D. Vournas, Contribution of Doubly Fed Wind Generators to Oscillation Damping, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 3, pp. 783–791, Sept. 2009.

[7] T. Xue, J. Zhang, and S. Bu, Inter-Area Oscillation Analysis of Power System Integrated With Virtual Synchronous Generators, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 39, no. 3, pp. 1761–1773, June 2024.

[8] G. Tsourakis, B. M. Nomikos, and C. D. Vournas, Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability, Electric Power Systems Research, vol. 79, no. 1, pp. 190–200, Jan. 2009.

[9] D. F. Gayme and A. Chakrabortty, Impact of wind farm placement on inter-area oscillations in large power systems, American Control Conference (ACC), Montreal, QC, Canada, 27–29 June 2012.

[10] P. He, F. Wen, G. Ledwich, Y. Xue, An investigation on interarea mode oscillations of interconnected power systems with integrated wind farms, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 78, pp. 148–157, June 2016.

[11] J. Chen, T. Jin, M. A. Mohamed, A. Annuk, U. D. Damapge, Investigating the Impact of Wind Power Integration on Damping Characteristics of Low Frequency Oscillations in Power Systems, Sustainability, vol. 14, no. 7, Art. no. 3841, Mar. 2022.

[12] A. K. Gupta, K. Verma, and K. R. Niazi, Impact analysis of DFIG location on low-frequency oscillations in power system, The Journal of Engineering, vol. 2017, no. 13, pp. 1413–1417, Nov. 2017.

[13] R. D. Fernández, R. J. Mantz, and P. E. Battaiotto, Potential contribution of wind farms to damp oscillations in weak grids with high wind penetration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, no. 6, pp. 1692–1711, 2008.

[14] S. Mukherjee, A. Chakrabortty, and S. Babaei, Modeling and quantifying the impact of wind penetration on slow coherency of power systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 2, pp. 1002–1012, Jan. 2021.

[15] S. Feleke, R. Satish, B. Pydi, D. Anteneh, A. Y. Abdelaziz, and A. El-Shahat, Damping of Frequency and Power System Oscillations with DFIG Wind Turbine and DE Optimization, Sustainability, vol. 15, no. 6, Art. no. 4751, Mar. 2023.

[16] Svenska Kraftnät, Kraftparksmodul: Bilaga 5 – Implementation Guide, Stockholm, Sweden, 2024.

[17] Western Electricity Coordinating Council (WECC), Second Generation Wind Turbine Models, 2014.

[18] P. Pourbeik, A. Ellis, J. Sanchez-Gasca, Y. Kazachkov, E. Muljadi, J. Senthil, D. Davies, Generic stability models for type 3 & 4 wind turbine

generators for WECC, IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, July 2013.

[19] WECC, Model User Guide for Generic Renewable Energy System Models, WECC White Paper, 2023.

[20] F. Jiménez-Buendía, R. Villena-Ruiz, A. Honrubia-Escribano, Á. Molina-García, and E. Gómez-Lázaro, Submission of a WECC DFIG Wind Turbine Model to Spanish Operation Procedure 12.3, Energies, vol. 12, no. 19, Art. no. 3749, Sep. 2019.

YER ALTI VARLIKLARINI TESPİT DESTEK SİSTEMİ AR-GE PROJESİ

Sümeyye İleri[1], Semih Kayabaşı[2], Eniscan Bubik[3], Pelin Bilgin[4]

Meram Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi Konya, Türkiye[1,2]
Dimus Proje Teknoloji Tasarım ve Danışmanlık Ltd. Şti. Ankara, Türkiye[3,4]

ÖZET

Ortak altyapıyı kullanan paydaşlar, operasyonel faaliyetlerinde Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) verilerini kullanmalarına rağmen bu veriler ile sahadaki gerçek konumları arasında uyumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, gerçekleştirilen kazı faaliyetleri sırasında paydaşların altyapı envanterlerine zarar verme riskini artırmaktadır. Bu tür tehlikeli kazaların önlenmesi için dünya genelinde çok sayıda yenilikçi çalışma sürdürülmektedir.

Bu çalışmada, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) desteğiyle yerli imkânlarla geliştirilen ve Meram Elektrik Dağıtım Şirketi ile Dimus Teknoloji Tasarım ve Danışmanlık Ltd. Şti.'nin paydaş olduğu "Yer Altı Varlıklarını Tespit Destek Sistemi" projesi anlatılmaktadır.

Proje kapsamında hassas konum tespiti yapabilen CORS RTK cihazı ile mobil harita uygulamaları ve yer altı haritalamasıyla GPR görüntülerinden elektrik envanterine ait konum tespitini yapabilen makine öğrenmesi tabanlı bir tespit destek sistemi olmak üzere üç ayrı geliştirme yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yer altı kazıları, CORS RTK, yapay zeka, yer altı haritalaması, yer altı envanter tespiti, GPR

ABSTRACT

Stakeholders sharing common infrastructure may experience discrepancies between Geographic Information System (GIS) data used in their operational activities and the actual field locations. This situation increases the risk of damage to stakeholders' infrastructure inventories during excavation works. To prevent such hazardous incidents, numerous innovative studies are being conducted worldwide.

This study presents the "Underground Assets Detection Support System" project, developed locally with the support of the Energy Market Regulatory Authority (EMRA) and in partnership with Meram Electricity Distribution Company and Dimus Technology Design and Consultancy Ltd.

Within the scope of the project, three separate developments were carried out: one involving a CORS RTK device capable of precise positioning, one involving mobile applications and the other one is amachine learning-based detection support system that can determine the location of electrical inventory from GPR images.

Keywords: underground excavations, CORS RTK, artificial intelligence, underground mapping, underground inventory detection, GPR

1. GİRİŞ

Yer altı elektrik dağıtım şebekelerinde; kablo eskimesi, kablo ek noktalarındaki izolasyon zayıflıkları, zamanla yaşlanan kabloların yalıtım malzemesindeki yorgunluk ve çatlamalar ile aşırı yüklenme sonucu oluşan termik hasar gibi nedenlerden dolayı arızalar oluşmaktadır. Bu faktörler, arızaların ani bir şekilde gelişmesine yol açabilir. Ancak, doğru haritalama ve periyodik testlerle bu arızalar önceden tespit edilip önlenebilir.

Elektrik dağıtım şirketlerinin şebekesinde bulunan tüm envanterlerin konum ve öznitelik bilgileri dağıtım şirketlerinin CBS veritabanında yer almaktadır. CBS'de bulunan verilerin konumları, genellikle gerçek konumlarla büyük oranda uyumlu olmakla birlikte özellikle nispeten eski tesislerin konum verileri zaman zaman farklılık gösterebilmektedir. CBS ile gerçek konum arasında fark bulunan bir arıza noktasının gerçek konumunun tespit edilip kazı çalışmalarının başlatılması, arızaya müdahale süresini uzatmakta ve hatalı kazılara yol açmaktadır. Hatalı kazı sonucunda, aynı altyapıyı paylaşan paydaşların birbirlerinin envanterine zarar verme riski bulunmaktadır. Bu durum elektrik, su, doğal gaz gibi altyapıların hasar görmesine ve kazı alanında patlamaların meydana gelmesine yol açabilir. Böyle bir durum, iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük riskler oluşturmakla birlikte çevre ve canlılar için ciddi tehlike arz etmektedir. Bu nedenle, hatalı kazıların önlenmesi yalnızca elektrik dağıtım şebekeleri için değil aynı altyapıyı paylaşan tüm paydaşlar için büyük önem taşımaktadır.

Yer altı elektrik envanterinin sahadaki gerçek konumu ile CBS'deki konumu arasındaki farklılıklar diğer ülkelerde de karşılaşılan bir durumdur. Birçok ülke yer altı envanterinin gerçek konumunu tespit edebilmek için EML (Electromagnetic Cable Locator), CORS RTK (Continuously Operating Reference Station, Real Time Kinematics), GPR (Ground Penetrating Radar), RFID/NFC etiketleri

(Radio Frequency Identification/Near Field Communication) ve dijital ikiz yöntemlerini kullanmaktadır.

Bu bildiride, "Yer Altı Varlıklarını Tespit Destek Sistemi" projesi çerçevesinde geliştirilen CORS RTK cihazları ve yer altı haritalaması ile elde edilen radargram görüntüleri kullanılarak elektrik kablolarının konum ve derinlik bilgilerini hassas bir şekilde tespit eden makine öğrenmesi tabanlı bir sistemin geliştirilmesi süreci anlatılmaktadır. Proje kapsamında, yüksek hassasiyetli (~1-2 cm) RTK teknolojisiyle, biri el terminaline diğeri ise jalona takılabilen iki CORS RTK cihazı tasarlanmış ve yerli imkânlarla üretilmiştir.

Geliştirilen tespit destek sistemi, saha operatörlerinin GPR kullanılarak elde edilen radargram görüntülerini analiz ederek elektrik kablolarını diğer yer altı varlıklarından ayırarak hassas konum ve derinlik bilgisi ile tespit etmektedir. Tespit edilen kabloların konum ve derinlik bilgisi, geliştirilen web platformu ve mobil uygulama ile doğrulandıktan sonra CBS'ye aktarılmaktadır.

2. YÖNTEM

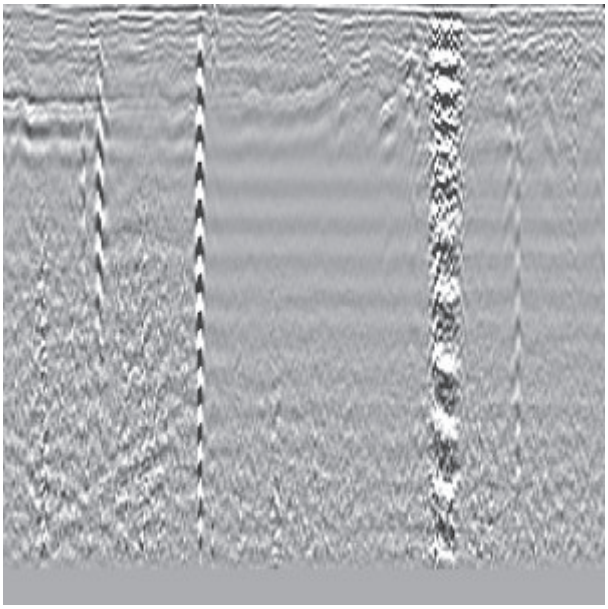
Proje kapsamındaki çalışmalara literatür taramasıyla başlanmıştır. Bu aşamada yer altı haritalamasında kullanılan cihazlar (EML-Electromagnetic Cable Locator ve GPR) teknolojilerinin kullanımları incelenmiş, haritalama metodolojileri için kullanılacak kriterler belirlenmiştir. Devam eden süreçte, hâlihazırda kullanılan DGPS (Differential Global Positioning System) ve RTK teknolojileri araştırılmış ve her iki yöntemin projede kullanımı ele alınmıştır. Bu kapsamda RTK teknolojisinin DGPS teknolojisine olan üstünlükleri göz önünde bulundurularak geliştirilecek CORS cihazlarının RTK destekli tasarlanmasına karar verilmiştir.

Makine öğrenmesi tabanlı tespit destek sisteminin kurgulanmasında, gözetimli öğrenme (Supervised Learning) kullanılarak bir tespit modeli geliştirmek üzere çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda makine öğrenmesi model, geliştirmede kullanılacak program dili ve kütüphaneler belirlenmiştir.

Literatür çalışmalarının tamamlanmasının ardından, CORS RTK cihazının geliştirme sürecine geçilmiştir. Bu kapsamda PCB kart tasarımı, dizgi işlemleri, haberleşme modüllerinin entegrasyonu ve elektriksel test çalışmaları tamamlanmıştır. Dizgi sürecinin ardından, CORS cihazına ait kabuk tasarımları gerçekleştirilmiş ve tüm bileşenler bir araya getirilerek cihazın montajı tamamlanmıştır.

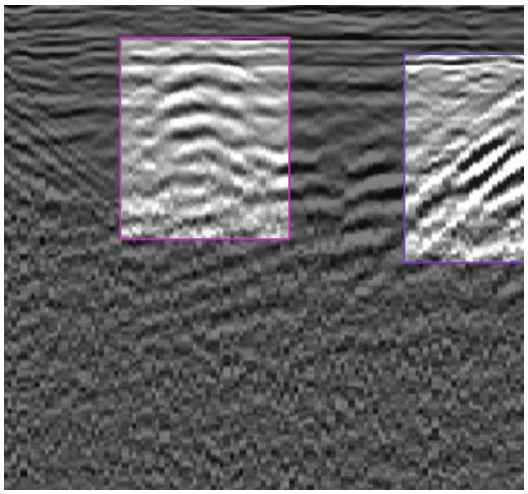
Tespit destek sisteminin geliştirilmesinde sistem mimarisi tasarımı gerçekleştirilmiş, R tabanlı programlama dili kullanılarak veri görselleştirme çalışmaları yürütülmüştür. Proje kapsamında yurt dışından temin edilen GPR cihazı tarama görüntüleri oluştururken bu görüntüleri aktarmak için bir

yazılım (GREDHD) kullanılarak yer altı radargram görüntüleri makine öğrenmesi modeline sunmak için oluşturulmuştur. Örnek bir radargram görüntüsü Şekil 1.'de verilmiştir.



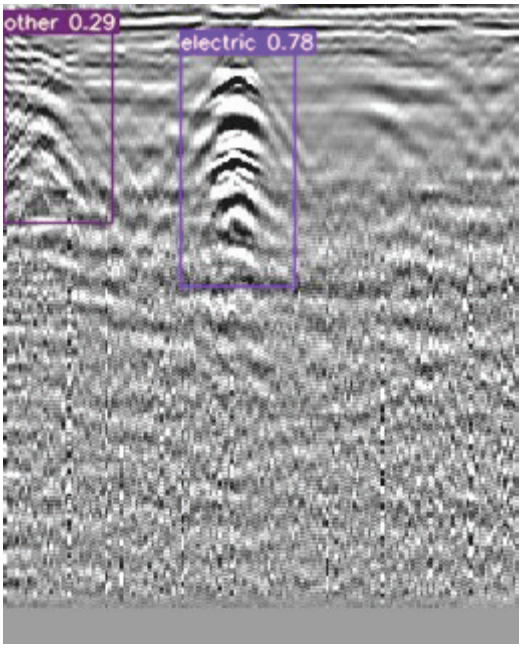
Şekil 1. GPR radargram görüntüsü

Proje kapsamında Konya ilinde pilot bölgeler belirlenerek 87 ayrı ölçüm bölgesinden 5412 adet özgün veri etiketlenerek algoritma eğitim süreci tamamlanmıştır. Bu ölçümler EML ve GPR cihazı ile birlikte gerçekleştirilmiş ve bulunmuş olan envanter konumları kaydedilmiştir. Kaydolan veriler hali hazırda CBS'de bulunan veriler ile kıyaslanarak incelenmiştir. Aşağıda (Şekil 2.) GPR görüntülemesi sonucunda oluşmuş bir ölçüm verisi paylaşılmıştır. Bu veride bulunan anomaliler farklı renk kodlarıyla tanımlanmış, kutular içine alınarak modele eğitim için gönderilmiştir. Görselde bulunan pembe kutu içinde elektrik envanteri olduğu tespit edilmiş obje bulunmaktadır. Sağda bulunan mor kutu ise başka bir obje olarak değerlendirilmiştir. Veriler etiketlenirken yalnızca elektrik hatlarının sisteme girdi olarak verilmesi durumunda, model bulduğu tüm anomalileri elektrik olarak işaretleyeceğinden elektrik envanteri haricinde bulunanlar "diğer" kategorisi altında eğitime dâhil edilmiştir.



Şekil 2. Eğitim için etiketlenmiş veri örneği

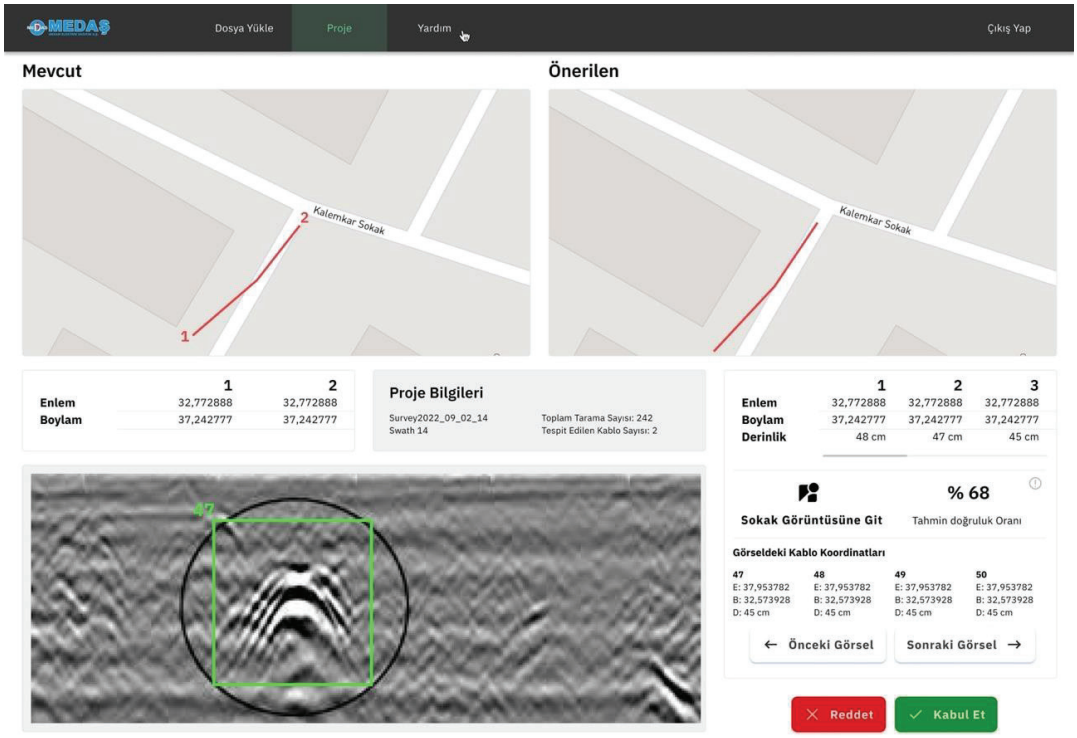
Eğitim sürecine verilerin dâhil edilmesi ile birlikte tespit başarısı artmış olup pilot uygulama çalışmalarında tespit edilen elektrik envanterine ait sistem, tespit ettiği objeleri “elektrik” ve “ diğer” olarak göstermektedir. (Şekil 3.)



Şekil 3. Pilot uygulama sonucunda tespit edilen varlıklar

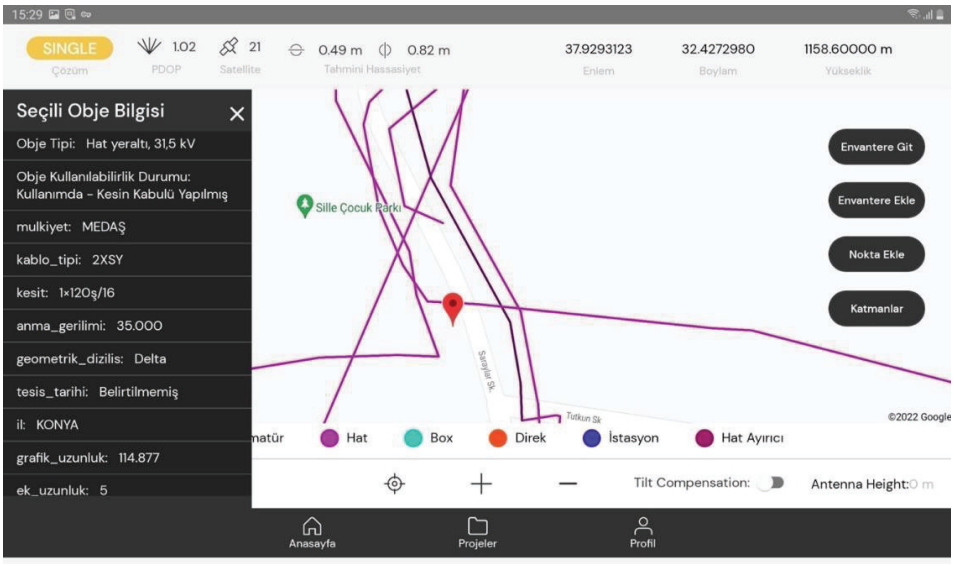
Proje kapsamında, GPR sisteminin topladığı verilerin yüklendiği ve yapay zekâ modelinin bu verileri işleyerek elektrik yer altı varlıklarının tespitini yaptığı bir platform geliştirilmiştir. Platformda, kullanıcı tespit edilen varlıkları seçerek kablo gruplarını otomatik olarak oluşturmakta ve bu varlıkların konum bilgileri, proje için oluşturulan CBS veri tabanına aktarılmaktadır. GPR verileri ölçümlere entegre edilen CORS/RTK verileriyle birlikte yüklenmektedir ve iş akışının sonunda yer altı varlıkları tespit edilmektedir.

Aynı arka uç yazılımı ve veri tabanı, mobil uygulama ile entegre bir şekilde kullanılmaktadır. Ortak veri tabanı sayesinde, GPR sistemiyle elde edilen ölçüm sonuçları doğrudan mobil uygulama üzerinden görüntülenebilmektedir. Bu verilerin sisteme kaydedilmesi için platform kullanıcısının onayı gerekmektedir. Kullanıcı onayı sonrası, tahminler sunucuya kaydedilmektedir. Geliştirilen platforma ait ekran görüntüsü Şekil 4'de yer almaktadır.



Şekil 4. Geliştirilen web platfomu

Proje kapsamında geliştirilen mobil uygulama, harita tabanlı bir platform olarak tasarlanmıştır. Uygulama üzerinde mevcut CBS verileri görüntülenebilir ve bu veriler üzerinde güncelleme talepleri oluşturularak, proje için ayrılan veri tabanına kayıt yapılabilmektedir. Geliştirilen mobil uygulamaya ait örnek ekran görüntüsü Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Mobil uygulama ekranı

Yer altı varlıklarını tespit destek sistemine ait görsel Şekil 6.'da, geliştirilen CORS RTK cihazları ise Şekil 7'de verilmiştir. Sistem aşağıda numaralandırılmış donanımlar bir araya getirilerek oluşturulmuştur.



Şekil 6. Yer altı varlıklarını tespit destek sistemi

No	Donanım
1	CORS/RTK cihazı
2	CORS/RTK cihazının sabitlenmesi amacıyla kullanılan jalon
3	GPR sisteminin kontrol ara yüzü olan bilgisayar
4	GPR kontrol ünitesi
5	GPR'ı besleyen batarya 1
6	GPR'ı besleyen batarya 2
7	GPR anteni 1 ve 2

Tablo 1. Yer altı varlıklarını tespit destek sistemi bileşenleri



Şekil 7. Proje kapsamında geliştirilen CORS RTK cihazları

3. BULGULAR

Proje kapsamında iki adet CORS RTK cihazı, makine öğrenmesi tabanlı yer altı varlıkları tespit destek sistemi algoritması, radargram verilerinin işlendiği yapay zekâ modeli, verilerinin işlenmesi ile elektrik envanterinin tespit edildiği ve CBS'ye aktarımının sağlandığı web platformu ve saha çalışmalarında kolaylık sağlaması amacıyla mobil uygulama geliştirilmiştir.

Ülkemizde ilk defa yerli imkânlarla Ar-Ge projesi kapsamında geliştirilen CORS RTK cihazlarının pilot uygulamalar sonucunda santimetre mertebesinde hassasiyetle konum tespiti yaptığı görülmüştür. Tespit destek sistemi ise CORS RTK cihazından aldığı konum verileriyle birlikte %68 güven oranıyla elektrik envanteri tespiti yapmıştır. Web platformu ve mobil uygulama ise başarıyla tamamlanmış olup web platformuna ait geliştirmeler projenin devam fazı olan "Yer Altı Varlıklarını Tespit Destek Sistemi Faz-2 projesinde de gerçekleştirilmiştir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Proje çıktılarının ülkemizde yer altı elektrik dağıtım şebekesinin güncel teknolojiler kullanılarak haritalandırılmasına, hatalı kazı kaynaklı envanter hasarının azalmasına fayda sağlayacağı görülmektedir. Tespit destek sisteminin ilk fazdaki %68 olan güven oranının, projenin devam fazıyla birlikte %90'a çıkartılması hedeflenmektedir.

Geliştirilen sistemle, elektrik envanterinin yanısıra doğalgaz, su, telekom altyapılarına ait envanterlerine ait hassas konum tespitiyle haritalandırılması amaçlanmaktadır. Tespit destek sistemi ile yapılan haritalama faaliyetlerinde noktasal konum verilerinin hat (line) oluşturacak şekilde 2B görselleştirilmesi yine devam fazında yapılan uygulamalar arasındadır.

5. KAYNAKLAR

1. [Bahadur, 2017] Bahadur, B. (2017). Improving the performance of precise poınt positioning with multi-gnss.

2. [Bo et al., 2016] Bo, Z., Shuang, X., Yang, A., and Wei, T. (2016). Dptsv: a dynamic priority task scheduling strategy for tss deadlock based on value evaluation. China Communications,13(1):161–175.

3. [Bostanudin, 2013] Bostanudin, N. J. F. (2013). Computational methods for processing ground penetrating radar data. PhD thesis, University of Portsmouth.

4. [Feng et al., 2020] Feng, J., Yang, L., Wang, H., Song, Y., and Xiao, J. (2020). Gpr-based subsurface object detection and reconstruction using random motion and depthnet. In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 7035–7041. IEEE.

5. [Hoffmann et al., 2020] Hoffmann, M., Kryszkiewicz, P., and Koudouridis, G. P. (2020). Modeling of real time kinematics localization error for use in 5g networks. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020(1):31.

6. [Karauguz, 2021] Karau˘guz, S. N. (2021). Küresel navigasyon uydu sistemleri (gnss) ölçümlerinde uydu yükseklik açısına ba˘glı a˘gırlıklandırma stratejilerinin hassas nokta konum belirleme (ppp) performansına etkisi. Master's thesis, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

7. [Pan et al., 2019] Pan, L., Zhang, X., Li, X., Li, X., Lu, C., Liu, J., and Wang, Q. (2019). Satellite availability and point positioning accuracy evaluation on a global scale for integration of gps, glonass, beidou and galileo. Advances in space research, 63(9):2696–2710.

8. [Rajani Devi and Rama, 2020] Rajani Devi, T. and Rama, B. (2020). Software reusability development through nfl approach for identifying security based innerrelationships of affecting factors. International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708), 10(1).

ENERJİ NAKİL HATLARINDA İZOLATÖR ARIZALARININ KAÇAK AKIM ANALİZİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ERKEN TESPİTİ

Mustafa Uğur TORUNER[1], Bilal BAĞCI[1], Metin KERİMOĞLU[1], Turgay Özzeftci[2], Tuğbanur TAŞDEMİR ÖZDEMİR[2]

ugur.toruner@pronerji.com, bilal.bagci@pronerji.com, metin.kerimoglu@pronerji.com, turgay.ozzeftci@gdzelektrik.com.tr, tugbanur.tasdemir@gdzelektrik.com.tr

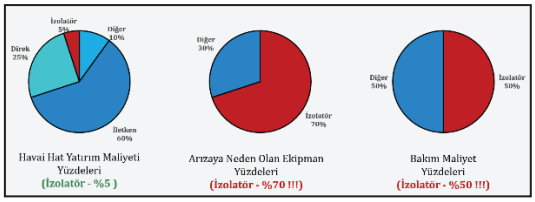
[1]Pronerji Elektrik Mühendislik Arge Danışmanlık A.Ş.
[2] Gdz Elektrik Dağıtım A.Ş.

Özet

Enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin güvenilirliği, büyük ölçüde havai hatlarda kullanılan izolatörlerin sağlığına bağlıdır. İzolatörlerde çevresel kirlenme veya fiziksel hasar sonucu meydana gelen arızalar, ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Bu çalışma, orta gerilim dağıtım hatlarındaki izolatör arızalarını proaktif olarak tespit etmek amacıyla geliştirilen, sensör tabanlı ve yapay zeka destekli bütünleşik bir erken uyarı sistemini sunmaktadır. Önerilen sistem, izolatör yüzeyinden akan kaçak akımı (LC) yüksek hassasiyetle ölçerek, elde edilen sinyalleri LoRaWAN protokolü aracılığıyla merkezi bir analiz birimine iletmektedir. Bu birimde, ham sinyalden çıkarılan öznitelikler, altı farklı makine öğrenmesi (ML) algoritması kullanılarak analiz edilmektedir. Sistemin performansı, laboratuvar ortamında oluşturulan farklı arıza senaryoları (temiz, çeşitli kirlilik seviyeleri, deşarj ve fiziksel hasar) altında test edilmiştir. Sonuçlar, test edilen modeller arasında Yapay Sinir Ağı (ANN) algoritmasının, %96.0 gibi üstün bir doğruluk oranıyla farklı arıza modlarını başarıyla sınıflandırdığını göstermiştir. Bu bütünleşik yaklaşım, tek bir sensör verisi kullanarak hem kirlenme hem de fiziksel hasar gibi çeşitli arıza türlerini ayırt edebilme yeteneğiyle, kestirimci bakım stratejilerine geçişi mümkün kılarak şebeke güvenilirliğini artırma ve işletme maliyetlerini düşürme yönünde önemli bir potansiyel taşımaktadır.

1. GİRİŞ

Orta gerilim (OG) enerji dağıtım altyapısı, modern toplumların ekonomik ve sosyal devamlılığı için hayati bir role sahiptir. Türkiye'de OG enerji dağıtımının yaklaşık %90'ı, maliyet etkinliği nedeniyle havai hatlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak bu hatlar, atmosferik ve çevresel koşullara doğrudan maruz kalmaları sebebiyle önemli zorluklarla karşı karşıyadır. İzolatörler, bu sistemin en hassas bileşenlerinden biridir. Toplam hat maliyetinin yalnızca %5-10'unu oluşturmalarına rağmen, havai hat arızalarının yaklaşık %70'i ve bakım maliyetlerinin %50'si doğrudan izolatör kaynaklı sorunlardan ileri gelmektedir [7].



Şekil 1 Havai hat izolatörlerinin maliyet, arıza ve bakım yüzdeleri

İzolatör yüzeylerinde zamanla biriken endüstriyel atıklar, tuz, toz ve nem, bir iletken tabaka oluşturarak kaçak akımlara yol açar. Bu durum, yüzey deşarjı (flashover) ve kuru bant arklanması gibi olaylara neden olarak kalıcı arızalara sebebiyet verir [3]. Ayrıca, mekanik zorlanmalar ve ani sıcaklık değişimleri, izolatörlerde gözle tespiti zor olan mikro çatlaklar ve kırıklar oluşturabilir. Mevcut bakım stratejileri genellikle arıza sonrası müdahale veya uzun periyotlarla yapılan görsel denetimlere dayanmaktadır. Bu yaklaşımlar, hem yetersiz kalmakta hem de özellikle ulaşımı zor olan kırsal ve dağlık arazilerde yüksek maliyet ve iş gücü gerektirmektedir.

Bu bağlamda, arızaları önceden tahmin edebilen, anlık izleme sağlayan ve kestirimci bakım stratejilerine olanak tanıyan akıllı sistemlerin geliştirilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu makalede, izolatörlerdeki fiziksel ve çevresel kusurları eş zamanlı olarak tespit edebilen, sensör teknolojisi ve yapay zeka algoritmalarını birleştiren bütünleşik bir izleme ve erken uyarı sistemi sunulmaktadır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

İzolatör arızalarının tespiti, güç sistemleri alanında uzun yıllardır devam eden bir araştırma konusudur. Literatürdeki çalışmalar, genellikle arıza mekanizmalarını anlama ve bu arızaları tespit etme yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Kaçak akım analizi, izolatör yüzeyindeki kirlenme ve nem seviyesinin bir göstergesi olarak kabul edilmekte ve en yaygın kullanılan online izleme yöntemlerinden biridir [6]. Suda, yapay olarak kirletilmiş izolatörlerdeki kaçak akım dalga formlarının frekans karakteristiklerini incelemiş ve flashover öncesinde özellikle tek sayılı harmonik bileşenlerin (150 Hz, 250 Hz) genliğinde belirgin bir artış olduğunu tespit etmiştir [1].



a) b)

Şekil 2. İzolatörlerde meydana gelen arıza çeşitleri
a) Yüzey deşarjı (flashover) hasarı
b) Kirlenmeye bağlı yüzey deşarjı

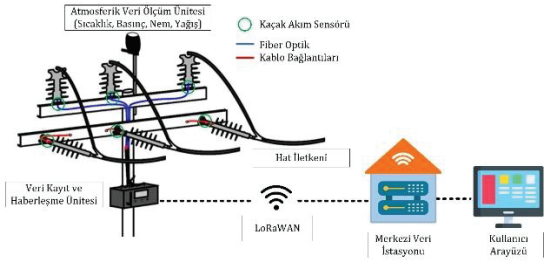
Bu bulgu, kaçak akım harmoniklerinin, arıza tahmini için güvenilir bir gösterge olabileceğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Karady vd. [2] ve Shah [3] tarafından yapılan çalışmalar da kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri ile kuru bant arklanması arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Bu

çalışmalar, projemizin temelini oluşturan kaçak akım ölçümünün bilimsel geçerliliğini desteklemektedir.

Son yıllarda, yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin güç sistemleri problemlerine uygulanmasıyla birlikte izolatör arıza tespiti alanında da önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Zhang vd., izolatör arızalarının tespiti için kenar bilişim (edge computing) ve derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım önermiştir [4]. Qiu vd. ise YOLOv7-tiny gibi hafifletilmiş nesne tespit modelleri kullanarak %98'in üzerinde bir başarı oranıyla görsel izolatör kusurlarını (kırık, eksik kapak vb.) gerçek zamanlı olarak tespit edebilen bir sistem geliştirmiştir [5]. Bu çalışmalar, yapay zekanın arıza tespitindeki yüksek potansiyelini göstermekle birlikte, genellikle tek bir arıza türüne odaklanmaktadır.
Waaled vd. tarafından sunulan kapsamlı bir derleme makalesi, termal görüntüleme, ultraviyole (UV) sensörler ve akustik analiz gibi çok çeşitli online ve offline izleme tekniklerini incelemektedir [6]. Bu derleme, her yöntemin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarken, birden fazla arıza modunu aynı anda ve güvenilir bir şekilde tespit edebilen bütünleşik sistemlere olan ihtiyacı vurgulamaktadır.

3. YÖNTEM VE SİSTEM MİMARİSİ

Bu çalışmada geliştirilen sistem, donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşan bütünleşik bir yapıya sahiptir.



Şekil 3. Tasarlanacak İzleme Sistemi

Donanım ve Veri Toplama: Sistemin saha tarafı, izolatörlerin direk bağlantı noktalarına entegre edilen yüksek hassasiyetli akım sensörlerinden oluşmaktadır. Bu sensörler, izolatör yüzeyinden toprağa akan miliamper seviyesindeki kaçak akımı sürekli olarak ölçer. Ölçülen analog akım sinyali, bir veri toplama (DAQ) kartı aracılığıyla dijitalleştirilir. Elde edilen dijital veri, bir mikrodenetleyici tarafından işlenir ve kablosuz iletişim için hazırlanır.

Veri iletimi için, Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarında yaygın olarak kullanılan LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) protokolü tercih edilmiştir. LoRaWAN, düşük güç tüketimi, uzun menzil ve lisanssız frekans bandında çalışması gibi avantajları sayesinde, özellikle şebeke altyapısının zayıf olduğu geniş ve dağınık coğrafyalardaki güç sistemi izleme uygulamaları için ideal bir çözümdür [10].

Yazılım ve Yapay Zeka Katmanı:

Sahanın farklı noktalarından toplanan veriler, merkezi bir sunucuda toplanır. Bu sunucuda, gelen ham kaçak akım verileri bir öznitelik çıkarma sürecinden geçirilir.

Bu süreçte, sinyalin RMS değeri, tepe değeri, frekans spektrumu ve özellikle 3. ve 5. harmonik bileşenlerin genlikleri gibi öznitelikler hesaplanır. Elde edilen bu öznitelik vektörleri, eğitilmiş makine öğrenmesi modelleri için girdi olarak kullanılır.

Bu çalışmada, izolatör durumunu (Temiz, Az Kirli, Çok Kirli, Kuru Deşarj, Islak Deşarj, Fiziksel Hasar) sınıflandırmak amacıyla altı farklı denetimli öğrenme algoritması test edilmiştir: k-En Yakın Komşu (k-NN), Destek Vektör Makineleri (SVM), Karar Ağaçları (DT), Rastgele Orman (RF), Aşırı Gradyan Arttırma (XGBoost) ve Yapay Sinir Ağları (ANN). Modellerin eğitimi, farklı kirlilik ve hasar senaryolarının laboratuvar ortamında simüle edilmesiyle elde edilen veri setleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

Geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin performansı, test veri seti üzerinde yapılan çapraz doğrulama ile değerlendirilmiştir. Her bir modelin farklı izolatör kusurlarını sınıflandırmadaki doğruluk oranları TABLO 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Makine Öğrenmesi Modellerine Ait Doğruluk Oranları

Makine Öğrenme Yöntemi	Doğruluk (Accuracy) (%)
Yapay Sinir Ağları (ANN)	**96.0**
Rastgele Orman (RF)	94.6
Destek Vektör Makineleri (SVM)	92.3
k-En Yakın Komşu (k-NN)	88.1
Karar Ağaçları (DT)	85.2
Naive Bayes	82.4

Sonuçlar, **%96,0**'lık doğruluk oranıyla en yüksek performansı **Yapay Sinir Ağı (ANN)** modelinin gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu başarı, ANN'nin kaçak akım sinyallerindeki karmaşık ve doğrusal olmayan desenleri öğrenme konusundaki üstün yeteneğini kanıtlamaktadır. **Random Forest (RF)** modeli de **%94,6** gibi oldukça yüksek bir doğruluk oranıyla ANN'yi takip ederek, bu problem için güçlü bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Model performansını daha detaylı analiz etmek için RF modeline ait hata matrisi incelenmiştir. Hata matrisi, modelin "Temiz" ve "Çok Kirli" gibi belirgin sınıfları neredeyse hatasız bir şekilde ayırt ettiğini, ancak "Orta Kirli" ve "Fiziksel Hasar" gibi bazı sınıflar arasında çok düşük oranda da olsa karışıklıklar yaşandığını göstermektedir. Bu durum, bu sınıflara ait kaçak akım profillerinin birbirine benzer özellikler taşıyabildiğini düşündürmektedir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, kaçak akım analizinin ve yapay zeka modellerinin, izolatör arızalarının proaktif

tespiti için son derece etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Yapay Sinir Ağı (ANN) modelinin %96,0'lık sınıflandırma başarısı, sistemin pratik uygulanabilirliğinin yüksek olduğuna işaret etmektedir.

Projenin en önemli pratik çıktısı, enerji dağıtım şirketlerinin bakım stratejilerini kökten değiştirme potansiyelidir. Mevcut durumda arıza sonrası reaktif veya zaman tabanlı periyodik bakımlar yerine, bu sistem sayesinde koşul tabanlı ve kestirimci bakıma geçiş mümkün olacaktır. ABD Enerji Bakanlığı tarafından yapılan çalışmalar, benzer otomasyon ve teşhis sistemlerinin uygulanmasının, SAIFI'de %11 ila %49 arasında ve SAIDI'de %56'ya varan oranlarda iyileşme sağlayabildiğini göstermektedir [9]. Bu, bakım ekiplerinin yalnızca gerçekten risk altında olan izolatörlere yönlendirilmesini sağlayarak iş gücünden ve zamandan tasarruf ettirecek, gereksiz saha operasyonlarını ortadan kaldıracaktır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, orta gerilim havai hatlarındaki izolatörlerin durumunu anlık olarak izlemek ve olası arızaları önceden tespit etmek için sensör teknolojisi ile yapay zekayı birleştiren yenilikçi bir erken uyarı sistemi başarıyla tasarlanmış ve test edilmiştir. Kaçak akım verilerini analiz eden sistem, özellikle Yapay Sinir Ağı modeli ile %96,0 gibi yüksek bir doğruluk oranına ulaşarak hem yüzey kirlenmesini hem de fiziksel hasarları güvenilir bir şekilde sınıflandırabildiğini kanıtlamıştır.

Gelecekteki çalışmalar, geliştirilen sistemin farklı coğrafi ve iklimsel koşullara sahip pilot bölgelerde uzun süreli saha testlerinin yapılmasını içerecektir. Ayrıca, sisteme sıcaklık, nem ve ultraviyole gibi ek sensör verilerinin entegre edilmesiyle bir "veri füzyonu" yaklaşımı benimsenebilir. Bu çok modlu veri, daha gelişmiş yapay zeka mimarileri kullanılarak sistemin tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini daha da artırabilir.

7. KAYNAKLAR

[1] T. Suda, "Frequency characteristics of leakage current waveforms of an artificially polluted suspension insulator," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, no. 4, pp. 705-709, Aug. 2001.

[2] G. G. Karady, H. M. Schneider, ve F. A. M. Rizk, "Review of CIGRE and IEEE research into insulator pollution," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 604-614, Apr. 1999.

[3] M. Shah, "The pollution flashover on high voltage insulators," Yüksek Lisans Tezi, Dept. Elect. Eng., Univ. of Manchester, Manchester, U.K., 1996.

[4] C. Zhang, Y. Wang, ve J. Wang, "Online Monitoring Method for Insulator Self-explosion Based on Edge Computing and Deep Learning," *Journal of Electronics & Information Technology*, vol. 39, no. 11, pp. 2686-2692, 2017.

[5] H. Qiu, Y. Xu, Y. Liu, ve L. Wang, "Online insulator defects detection and application based on YOLOv7-tiny algorithm," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 2024.

[6] M. Waaled, A. A. Al-Arainy, ve I. Qureshi, "Condition Monitoring of Outdoor High Voltage Insulators, Online and Offline Techniques: A review," *NUST Journal of Engineering Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 1-13, 2021.

[7] TEİAŞ, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş. 2019 Yılı Faaliyet*

Raporu, Ankara, Türkiye, 2020.

[8] Milsoft Utility Solutions, "Improving SAIFI & SAIDI Scores: How Engineering Software Enhances Grid Reliability," [Online]. Available: https://www.milsoft.com/improving-saifi-saidi-scores/. [Erişim: 27 Haziran 2025].

[9] U.S. Department of Energy, *Reliability Improvements from the Application of Distribution Automation Technologies - Initial Results*, Washington, D.C., 2012.

[10] Semtech, "Elvexys Releases Monitoring Solution Detecting Power Grid Failures with Semtech's LoRa® Devices and the LoRaWAN® Standard," [Online]. Available: https://www.semtech.com/company/press/elvexys-releases-monitoring-solution-detecting-power-grid-failures-with-semtechs-lora-devices-and-the-lorawan-standard. [Erişim: 27 Haziran 2025].

[11] A. Ahmadi, M. Al-Shukaili, ve S. Al-Mandhari, "Thermal image, partial discharge and leakage current correlation of ceramic insulator under different contamination level," *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Heraklion, Yunanistan, 2017, pp. 1-6.

[12] S. Venkataraman ve R. S. Gorur, "Prediction of flashover voltage of non-ceramic insulators under contaminated conditions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 1, pp. 159-166, Feb. 2006.

YENİ TİP YERLİ İZOLATÖR TASARIM VE ÜRETİMİ AR-GE PROJESİ

Adnan Canlı[1], Furkan Gültekin[2]

Meram Elektrik Dağıtım A.Ş. Konya, Türkiye[1]
Yonca Teknoloji Mühendislik ve Elektronik Hizmetleri Ltd. Şti. Ankara, Türkiye[2]

ÖZET

Yeni Tip Yerli İzolatör Tasarım ve Üretim Ar-Ge Projesi Temmuz 2022 döneminde EPDK başvurusu yapılmış ve kabul edilmiştir. Proje kapsamında tasarımı yapılmış ve üretimi tamamlanmış olan Mengene Bağlantılı Mesnet Polimer İzolatörler belirlenen pilot bölgelerde uygulanmıştır. Proje, 25.01.2025 tarihinde başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır.

Proje, dağıtım şebekelerinde sıklıkla meydana gelen sıkı bağ düşmeleri ve porselen izolatörlerden kaynaklı arızaların önüne geçmek amacıyla yapılmıştır. Tasarlanan ve üretimi gerçekleşen mengene bağlantılı mesnet polimer izolatör sayesinde çift taraflı vidalama sistemi ile iletken mengenenin arasına yerleştirilerek montaj edilebildiğinden dolayı sıkı bağ gereksinimi ortadan kalkmıştır. Bu sayede hem işlem süresi hem de iş yükü azaltılmıştır. İzolatörlerin polimer hammadde içerikli olarak üretilmesi ise porselen izolatörlere göre dış etkenlere karşı dayanıklılık sağlamıştır. Proje sonucunda ortaya çıkan bu ürün ile SAIDI ve SAIFI değerlerinin iyileştirilmesi de sağlanmıştır.

Proje süresince izolatör için hammadde araştırması yaparak tasarım gerçekleştirilmiş ardından kalıp üretimi süreci sonrası üretim yapılmış ve akredite laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda izolatörlerin takip edilmesi amacıyla bir platform geliştirilmiş ve izolatörlerin üzerinde yer alan karekod ile platforma işlenmesi sağlanmıştır. Testlerden sonra ise seçilen lokasyonlarda pilot uygulama yapılmıştır.

Yeni Tip Yerli İzolatör Tasarım ve Üretim Ar-Ge projesi başlangıç hedeflerini geliştirerek son halinde tasarımsal ve işlevsel olarak beklenen çıktıların üzerinde sonuçlar vermiştir.

ABSTRACT

July 2022 Dec New Type Domestic Insulator Design and Production R&D Project Application was made to EMRA and accepted. Within the scope of the project, the Vise-Connected Support Polymer Insulators, which have been designed and manufactured, have been applied in the designated pilot regions.2022 Dec New Type Domestic Insulator Design and Production R&D Project Application was made to EMRA and accepted. Within the scope of the project, the Vise-Connected Support Polymer Insulators, which have been designed and manufactured, have been applied in the designated pilot regions. The project was successfully completed on 25.01.2025.

The project was carried out to prevent the frequent tight bond failures and malfunctions caused by porcelain insulators in distribution networks.he project was carried to prevent the frequent tight bond failures and malfunctions caused by porcelain insulators in distribution networks. Thanks to the designed and produced vise-connected support polymer insulator, the need for a tight bond has been eliminated since it can be mounted between the conductohe project was carried out to prevent the frequent tight bond failures and malfunctions caused by porcelain insulators in distribution networks. Thanks to the designed and produced vise-connected support polymer insulator, the need for a tight bond has been eliminated since it can be mounted between the conductor and the vise with a double-sided screwing system by placing it in between. In this way, both the processing time and workload have been reduced. The production of insulators with polymer raw material content provided resistance to external factors compared to porcelain insulators. The improvement of SAIDI and SAIFI values has

also been achieved with this product, which has emerged as a result of the project.

During the project, the design was carried out by researching the raw materials for the insulator, then production was carried out after the mold production process and accredited laboratory tests were carried out.e improvement of SAIDI and SAIFI values has also been achieved with this product, which has emerged as a result of the project.

During the project, the design was carried out by researching the raw materials for the insulator, then production was carried out after the mold production process and accredited laboratory tests were carried out. At the same time, a platform has been developed for tracking the insulators and it has been ensured that the insulators are processed to the platform with the square code located on it. After the tests, a pilot application was carried out at the selected locations.

The New Type Domestic Isolator Design and Production R&D project has developed its initial goals and in its final form, it has given results that are above the expected outputs in terms of design and functionality.

1. GİRİŞ

Alçak gerilim (AG) ve orta gerilim (OG) havai hatlarında gerçekleşen arızaların kök sebepleri incelendiğinde önümüze geçici ve kalıcı arızalar olmak üzere iki ana neden ortaya çıkmaktadır. İzolatör kaynaklı kalıcı arızaların alt kırılımlarına bakıldığında bunların yaklaşık yarısını sıkı bağ kopması sonucu iletken düşüklüklerinin oluşturduğu görülmektedir. Bu arızalar nedeniyle de can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Sıkı bağın en çok kullanıldığı bölgeler izolatör iletken bağlantılarıdır. Bu yüzden sahada yapılan çalışmalar (yeni tesis çalışmaları ve bölgesel bakım çalışmaları vb.) dikkate alındığında izolatör ile havai hat iletkenin düzgün bir işçilik ile monte edilmesi önem arz etmektedir. Aksi takdirde bu durum havai hatta işletmesel problemlere yani arızalara sebep olmaktadır. Geliştirilen bu izolatör sayesinde AOB ekiplerine montaj kolaylığı sağlanarak zamandan tasarruf edilecek ve aynı zamanda izolatör kaynaklı arızaların minimum düzeye indirgenerek kalite parametrelerinde iyileşmeler sağlanacaktır.

2. GEREKÇE

Havai hat ile izolatör montajının doğru yapılamamasından kaynaklanan arızalar uzun süreli kesintilere sebep olmaktadır. Özellikle hava şartlarının ağır olduğu bölgelerde (nem, toz ve kimyasal kirliliği, buz yükü, yüksek sıcaklığın vb.) bu arızalar daha sık karşımıza çıkmaktadır. Bu da doğrudan SAIDI ve SAIFI parametrelerini etkilemektedir. Mevcut durumda kullanılan mesnet izolatörlerin bağlantı şekli ise genel olarak sıkı bağdır. Sıkı bağ yapımı diğer yöntemlere göre daha dikkat ve detay gerektiren bir işlem olduğu için montaj süresi ve devreye alma süreleri uzayabilmekte olup işlem için uzman personele ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumlar operasyonel kayba neden olmaktadır.

3. AMAÇ

Elektrik dağıtım sistemi işletmesinde elektrik enerjisinin sürekliliği hem dağıtım şirketi hem de tüketiciler için önem arz etmektedir. Sürekliliğin bozulma nedenlerinin biri de havai dağıtım hatlarındaki hat düşmesi olarak

tabir edilen sıkı bağ tipi izolatörlerin bağının kopması ya da seramik/cam izolatörlerin bütünlüğünün bozularak görevini yapamamasıdır. Benzer nitelikteki izolatörlerin yurtdışı alım maliyetinin yüksek olması ve ülkemizde iletim/dağıtım bakım onarım tedarikçi firmalarının arttırılması amacıyla yeni tip izolatörlerin ülkemizde tasarlanıp üretilmesi hedeflenmiştir.

Ayrıca geliştirilmiş olan izolatör süreç yazılımı ile yerli olarak üretimi yapılan yeni tip izolatörün takibi gerçekleştirilerek varlık yönetimi sağlanmış olacaktır. Varlık yönetimi çalışması ise izolatör üzerine yerleştirilecek karekod ile ulaşılacak veri tabanında üretim ve montaj tarihi, montaj lokasyonu, mekanik özellikler ve geri dönüşüm bilgileri saklanabilecektir. Bu sistem sayesinde envanter takibi, bakım ve arızalar sonrası istatistiklere göre çözüm durumları değerlendirilebilecektir.

Yurt içinde yerlileştirilmiş yeni tip izolatörlerin yaygınlaşması ile iletken düşmesi sorunu büyük ölçüde ortadan kaldırılacak, yaşanan arızaların önüne geçilecek, bu arızalardan kaynaklanan zararlar azaltılacak ve müşteri memnuniyeti arttırılacaktır.

4. KAPSAM

Proje kapsamında gerçekleştirilen AR-GE faaliyetleri 3 aşamada toparlanabilir:

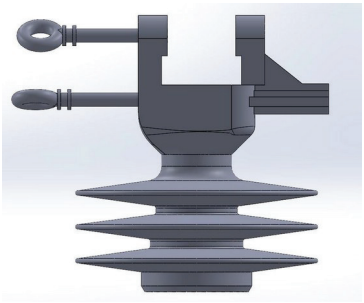
1.Aşama: Teknik ve akademik hazırlık

Farklı ülkelerde farklı şekillerde kullanılan "İzolatör" çeşitlerinin yapısı, boyutları, içerikleri Türkiye'deki mevcut standart ve uygulamalar göz önüne alınarak araştırılmıştır. En uygun kriterler belirlenerek ardından tasarıma geçilmiştir.

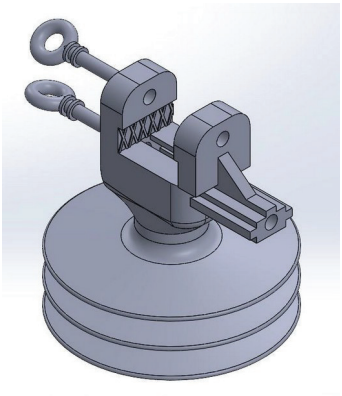
2. Aşama: Kriterlerin belirlenip, tasarım ve üretimin yapılması

Birinci aşamada gerçekleştirilen araştırmalarının ışığında uygulanacak olan sistemin teknik kriterleri detaylandırılmıştır.

İlgili kriterler baz alınarak tasarım ve üretim yapılmıştır.



Şekil-1 Tasarım Görseli-1



Şekil-2 Tasarım Görseli-2



Şekil-3 Üretim Görseli-3

3. Aşama: Pilot uygulama ve sonuç değerlendirmesi

Farklı hava koşulları, farklı ortam kirliliği, kimyasal gaz, tozlanma miktarı, nem vb. durumlarına sahip bölgelerde izolatör ve çevresel kaynaklı arızalar yaşayan yerler tespit edilerek geliştireceğimiz yeni izolatörün kullanılacağı yerler belirlenmiştir.

Proje bünyesinde üretilen "İzolatör" analizlere dayalı elde edilecek sonuçlar ışığında sahada denemeleri yapılarak kağıt üzerinde çözüm olan sistemlerin sahadaki performansları değerlendirilmiştir. Saha denemeleri sonucunda fayda-maliyet raporu hazırlanmış ve ürünün proje sonrası ticarileşme ve geliştirme süreçlerine katkı sağlanmıştır.

Geliştirilen "İzolatör" projesi kapsamında, sistem işletimine yönelik malzeme teknolojisi sayesinde bu projenin Türkiye elektrik dağıtım sektöründe öncü nitelikte olacağı değerlendirilmektedir.



Şekil-4 Pilot Uygulama Görseli-1



Şekil-5 Pilot Uygulama Görseli-2

5. SONUÇ

"Havai Hat İletkenlerinin İzolatörlere Bağlantıları için Yeni Yöntemlerin Araştırılması ve Pilot Uygulama" projesinde gelinen noktanın yerlileştirilmesi hedefiyle başlanan bu proje tasarımı ve üretimi yerli imkanlarla yapılmış, testleri başarıyla geçmiş ve saha uygulamaları yapılmış bir ürün haline gelmiştir. Yeni Tip Yerli İzolatör'ün saha performansı bir önceki projedeki ithal ürünün saha performansı ile şu ana kadar benzer şekilde seyretmektedir. Ürünün performansının sağlıklı değerlendirilmesi için soğuk ve sıcak hava koşullarında sahada montaj edilmiş olması gerekmektedir. Saha performanslarının gözlemlenmesinin yanında ürünün geliştirmelerine de devam edilecektir.

Mevcut durumda özellikle tasarım ve üretim süreçlerinin tamamlanarak seri üretim altyapısı oluşturulmuş, saha performansı gözlemlendikten sonra geleneksel izolatörlerin yerini alacak şekilde revizesi planlanmaktadır. Bu süreçte TEDAŞ ile ortak çalışma yürütülerek şartnamesinin çıkması konusu da projenin bir hedefi olarak konulmuş ve bu hedef doğrultusunda TEDAŞ MLZ 96-023 O.G. "Hava Hatti

Mesnet İzolatörleri Teknik Şartnamesi"nin yenilenmesi için bir öneri dokümanı da hazırlanmıştır. Bu dokümana yönelik testler belirlenmiş ve tasarım bağımlı testler yapılmıştır. TEDAŞ ile ürünün birim fiyat kitabına girmesi için görüşmeler planlanarak 2025 yılı sonunda TEDAŞ tarafından EDAŞ'lardan talep edilen "Birim Fiyat Kitabı" revize talepleri aşamasında talep yapılacaktır.

ŞEBEKEYE BAĞLI AKTİF KENETLEMELİ YUMUŞAK ANAHTARLAMALI FLYBACK MİKRO EVİRİCİ TASARIMI

Büşra DEMİR[1], Melih AYDEMİR[2], Mutlu BOZTEPE[3]

Ege Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100 İzmir, TÜRKİYE

[1]busrademiir8@gmail.com, [2]mlh_02_aydemir@hotmail.com, [3]mutlu.boztepe@ege.edu.tr

ÖZET

Güneş enerjisi, küresel erişilebilirliği ve enerji ithalatını azaltıcı etkisiyle öne çıkan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Yakıt maliyeti riski içermez, arz güvenliği sağlar ve uzun vadede fiyat dalgalanmalarına karşı istikrar sunar. Fotovoltaik (PV) sistemler, sera gazı emisyonu oluşturmamaları nedeniyle çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunur. Ancak kısmi gölgelenme ve süreksizlik, bu sistemlerin temel zayıf yönlerindendir. Bu çalışmada, PV sistemler için aktif kenetlemeli flyback topolojisine dayalı şebeke bağlantılı bir mikro evirici yapısı sunulmuştur. Aktif kenetleme devresi, ana anahtarın, çıkış kapasitörü üzerinden ters akıma izin vererek, sıfır gerilimde anahtarlanmasını (ZVS) sağlar ve anahtarlama kayıplarını azaltır. Flyback topolojisinin sağladığı galvanik izolasyon ve tek kademeli dönüşüm, sistem verimliliği ve güvenilirliğini artırmaktadır. Önerilen yapı, analitik hesaplamalar, benzetim çalışmaları ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel testlerle doğrulanmıştır.

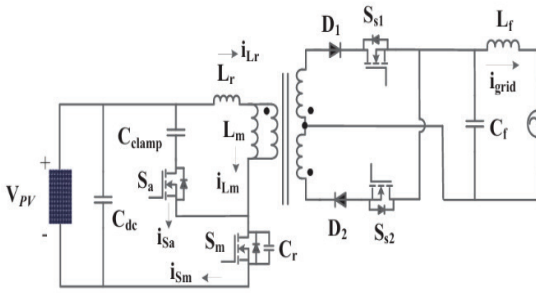
Anahtar Kelimeler: Mikro Evirici, Aktif Kenetlemeli Flyback, Şebeke Bağlantılı PV, Sıfır Gerilim Anahtarlama (ZVS)

1 GİRİŞ

Günümüzde artan enerji talebi, fosil yakıtların çevresel ve ekonomik risklerini artırmakta, bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmaktadır. Özellikle güneş enerjisi; yaygın uygulanabilirliği, modüler yapısı ve doğrudan enerji üretimi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Fotovoltaik (PV) sistemler, çevre dostu yapıları ve düşük işletme maliyetleri nedeniyle stratejik öneme sahiptir. Ancak değişken ışınım koşulları, kısmi gölgelenme ve sıcaklık farklılıkları gibi çevresel faktörler nedeniyle üretimde dalgalanmalar oluşmakta ve bu durum şebeke entegrasyonu açısından güç elektroniği desteğini zorunlu kılmaktadır.

Mikro inverter yapıları, panel bazında MPPT imkânı, gölgeleme etkilerinden daha az etkilenme ve izlenebilirlik gibi avantajlarıyla bu ihtiyaca yanıt verirken; maliyet, ısıl yönetim, anahtarlama kayıpları ve EMI gibi zorluklar da barındırmaktadır. Bu bağlamda, flyback topolojisi mikro inverter sistemlerinde sade yapısı, düşük bileşen ihtiyacı ve izolasyon avantajı nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak klasik flyback yapılarında kaçak endüktans ve sert anahtarlama kaynaklı verimlilik kayıpları ve EMI sorunları sıkça karşılaşılmaktadır.

Bu sorunların azaltılması için aktif kenetleme ve yumuşak anahtarlama (ZVS/ZCS) teknikleri kullanılmaktadır. Aktif kenetleme yapıları, kaçak endüktans enerjisini geri kazanarak MOSFET üzerindeki gerilim stresini sınırlar, böylece sistem verimliliğini artırır. Literatürde bu yapıların %3–4'e kadar verim artışı ve daha düşük THD ile daha



Şekil 1. Mikro-invertör devre şeması [6]

kaliteli çıkış dalga formları sağladığı rapor edilmiştir. Ayrıca ZVS/ZCS teknikleri, geçiş kayıplarını azaltarak hem EMI seviyesini düşürmekte hem de anahtarlama elemanlarının ömrünü uzatmaktadır.[6]

Sistem kararlılığı açısından ise, MPPT algoritmaları (özellikle P&O ve artan iletkenlik yöntemleri) düşük işlem yüküyle mikrodenetleyicilerde kolayca uygulanabilmekte; şebeke senkronizasyonu için ise genellikle PLL temelli yapılar kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, aktif kenetleme ve yumuşak anahtarlama teknikleriyle geliştirilen flyback mikro inverterler, düşük güçlü PV sistemler için yüksek verimli, düşük maliyetli ve kompakt çözümler sunmaktadır. Bu çalışma, flyback topolojisine dayalı, aktif kenetlemeli ve yumuşak anahtarlamalı bir mikro inverter sisteminin tasarımı, simülasyonu ve deneysel doğrulamasını kapsamaktadır.[1],[5],[3]

2 FLYBACK EVİRİCİ TOPOLOJİSİ

Bu çalışmada, fotovoltaik (PV) panellerden elde edilen doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen, izolasyonlu ve mikrodenetleyici kontrollü bir mikro flyback evirici sistemi tasarlanmıştır. Düşük güçlü PV sistemler için flyback topolojisi; yapısal sadeliği, galvanik izolasyon sağlaması ve geniş gerilim dönüşüm aralığı nedeniyle yaygın olarak tercih edilir [1], [2]. Tipik bir flyback evirici devresi, Şekil 1'de görüldüğü üzere, transformatör, MOSFET, doğrultucu ve giriş/çıkış kondansatörlerinden oluşur. Çıkıştaki LC filtre yardımıyla harmonik bileşenler bastırılmaktadır. Enerji transferi, iki fazda gerçekleşir: primer mosfet iletimdeyken enerji mıknatıslama endüktansında depolanır ve kesime gittiğinde sekondere aktarılır [3],[7].

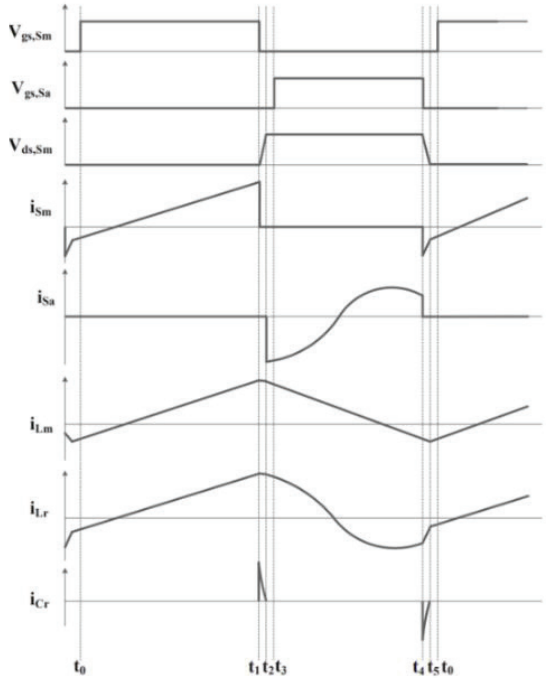
Bu çalışmada tercih edilen DCM modu, mıknatıslama akımının sıfırlandığı her döngü sonunda doğrusal kontrol avantajı sağlar. Ayrıca doğal olarak oluşan ZCS (Zero Current Switching) sayesinde EMI gürültüsü ve anahtarlama kayıpları düşer [4]. Ancak yüksek tepe akımları, MOSFET üzerinde stres oluşturabilir [5].

Flyback yapının zayıf noktası olan kaçak endüktans kaynaklı gerilim sıçramaları, aktif kenetleme (active clamp) ve yumuşak anahtarlama (soft switching) teknikleriyle azaltılır [6]. Böylece verimlilik artar ve anahtarlama elemanlarının ömrü uzar.

2.1 Aktif Kenetleme

Flyback dönüştürücülerde yüksek anahtarlama frekanslarında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, transformatörün kaçak endüktansından kaynaklanan ani gerilim sıçramalarıdır. Bu sıçramalar, anahtarlama elemanlarında yüksek gerilim stresine ve elektromanyetik girişime (EMI) yol açar. Geleneksel pasif snubber yapıları bu enerjiyi dirençle tüketerek sistem verimliliğini düşürürken, aktif kenetleme devreleri bu enerjiyi geri kazanarak önemli bir avantaj sağlar [1], [2].

Bu projede kullanılan aktif kenetleme yapısı, primer sargıya paralel bağlanan yardımcı bir anahtar (S_a) ve bir kenetleme kondansatöründen (C_{clamp}) oluşmaktadır (Bkz Şekil 2). Sm anahtarı kapanmadan hemen önce S_a açılarak, kaçak endüktansın



Şekil 2. Temel dalga formları [6]

enerjisi C_{clamp} üzerine aktarılır. Bu süreçte oluşan rezonans sayesinde hem S_m hem de S_a anahtarları ZCS-ZVS (Zero Current/Voltage Switching) koşullarında çalışır ve yumuşak anahtarlama sağlanır [3]. Ek olarak, dönüştürücünün kesikli iletim modunda (DCM) çalıştırılması, doğal olarak sıfır akımda anahtarlama koşullarını sağlamaktadır. Bu yapı hem anahtarlama kayıplarını azaltmakta hem de kontrol algoritmasının sadeliğini korumaktadır [3].

Ayrıca, rezonans sırasında oluşan voltaj sıçramaları, eklenen rezonans kondansatörü (C_r) tarafından sınırlandırılarak hem MOSFET'lerin korunması hem de verimin artırılması hedeflenmiştir [4]. Bu yapı, sistemin daha düşük anahtarlama kayıplarıyla, daha az EMI üretimiyle ve daha yüksek güvenilirlikle çalışmasını mümkün kılar.

Sistemin genel devre yapısı Şekil 2'de sunulmuştur. PV panelden gelen doğru akım enerjisi, flyback yapısı üzerinden işlenmekte; aktif kenetleme devresi ile anahtarlama kayıpları azaltılmakta ve sekonder tarafta sinüzoidal modülasyon uygulayan SPWM sinyalleri ile MOSFET'ler senkronize olarak sürülmektedir.

2.2 Çalışma Modları

Şekil 2, dönüştürücünün ideal anahtarlama döngüsünü ve yumuşak anahtarlama koşullarında çalışan temel gerilim-akım dalga formlarını [6] göstermektedir. Şekil 1'deki şema üzerinde devrenin çalışma modları incelenebilir.

Mod-1 ($t0<t<t1$): Mod 1, ana anahtar Sm' nin iletime geçirilmesiyle başlar. Bu sırada yardımcı anahtar Sa kapalıdır. Şebekenin pozitif yarım çevriminde Ss1, negatif yarım çevriminde ise Ss2 iletimdedir. PV kaynağından gelen doğru gerilim, dönüştürücünün primer endüktansı Lm üzerine uygulanır ve enerji depolanmaya başlanır. Sm iletimde kaldığı sürece primer akımı doğrusal olarak artar [5],[6]. Bu artış şu şekilde gösterilir:

$$i_{Sm}(t) = i_{Lm}(t) = \frac{V_{PV}}{Lm+Lr}(t - t_0) - i_{Lm}(t_0) \quad (1)$$

$$i_{Sm-Peak} = \frac{V_{PV}}{Lm+Lr}(D_1 T_s) - i_{Lm}(t_0) \quad (2)$$

Mod-2 ($t_1<t<t_2$): Mod 2, ana anahtar S_m' nin kapanmasıyla başlar. Sekonder anahtarlar henüz iletime geçmemiştir. Bu sırada primer sargıda biriken enerji, akımın sürekliliğini sağlamak amacıyla rezonans kapasitörü C_r üzerinden akar. Bu akım, C_r'de gerilim biriktirerek S_m anahtarının uçları arasındaki V_{DS} geriliminin rezonans etkisiyle yavaşça yükselmesini, yani ZVS koşulunu sağlar.

Bu davranış, L_m ve C_r ile oluşturulan rezonans tankı sayesinde gerçekleşir ve gerilim/akım ani değişim yerine yumuşak geçişli bir eğriyle artar. Rezonansın sonunda $V_{Cr} \approx V_{PV} + V_{grid} / n$ olur ve bu süreçte LLC tipi rezonans karakteri görülür [5],[6].

$$V_{Cr}(t) = V_{PV}\left(1 - cos\left(\omega_{r1}(t-t_1)\right)\right) + i_{Lr}(t_1)Z_{i1}sin\left(\omega_{r1}(t-t_1)\right) \quad (3)$$

$$i_{Lr}(t) = i_{Lm}(t_1)cos\left(\omega_{r1}(t-t_1)\right) + \frac{V_{PV}}{Z_{i1}}sin\left(\omega_{r1}(t-t_1)\right) \quad (4)$$

$$V_{Cr}(t_2) \approx i_{Lr}(t_1)(t_2-t_1)/C_r = V_{PV} + V_{grid}/n \quad (5)$$

$$i_{Lr}(t_2) \approx i_{Lm}(t_1) + \frac{V_{PV}}{Z_{i1}}\omega_{r1}(t_2-t_1) \approx i_{Lm}(t_1) \quad (6)$$

$$\omega_{r1} = 1/\sqrt{C_r\,(L_m + L_r)} \quad (7)$$

$$Z_{i1} = \sqrt{(L_m + L_r)/C_r} \quad (8)$$

Mod-3 (t_2<t<t_3): Mod 3, ana anahtar S_m kapandıktan sonra, rezonans kapasitörü üzerindeki gerilimin yardımcı anahtar S_a' nın gövde diyodunu iletime zorlamasıyla başlar. Bu sayede yardımcı anahtar yolu aktifleşir ve L_m, L_r ve C_{clamp} elemanlarının oluşturduğu rezonans tankı devreye girer. Bu modda, primerde biriken enerji, hem sekonder yüke hem de kenetleme kapasitörüne transfer edilir. Rezonans akımı, C_{clamp} üzerinden geçerek bu kapasitörün gerilimini artırır ve Sa'nın aktif iletime geçmesi için gerekli koşulları hazırlar. Mod, C_{clamp} gerilimi eşik değere ulaştığında sona erer ve sistem bir sonraki enerji geri dönüşüm fazına geçer [5],[6].

$$i_{Lr}(t) = i_{Lr}(t_2)cos(\theta_{r2}) - \frac{\left(\frac{V_{grid}}{n}\right)}{Z_{i2}}sin(\theta_{r2}) \quad (9)$$

$$V_{clamp}(t) = \frac{V_{grid}}{n}cos(\theta_{r2}) + i_{Lr}(t_2)Z_{i2}sin(\theta_{r2}) \quad (10)$$

$$i_{Lr}(t) \approx i_{Lr}(t_2) - \frac{V_{grid}}{n(L_m+L_r)}(t-t_2) \quad (11)$$

$$V_{clamp}(t) \approx \frac{V_{grid}}{n} + \frac{i_{Lr}(t_2)}{C_{clamp}}(t-t_2) \quad (12)$$

Mod-4 (t_3<t<t_4): Mod 4, yardımcı anahtar S_a' nın aktif olarak iletime geçirilmesiyle başlar. Bu modda sistem hâlâ primer tarafta depolanan enerjiyi sekondere aktarmaya devam etmektedir. Sa'nın iletimde olması, rezonans akımı yolunu genişletir ve sistemin rezonans karakteristiğini değiştirir. Bu modun temel amacı, ana anahtar S_m' nin sıfır voltaj altında (ZVS) anahtarlanmasını mümkün kılmaktır. Bunun için S_a, rezonans akımı sıfıra ulaşmadan önce kapatılmalıdır. Böylece S_m anahtarı bir sonraki çevrimde $V_{DS} \approx 0$ V koşulunda iletime geçebilir, anahtarlama kayıpları ve EMI azalır. Mod, S_a kapatıldığında sona erer ve sistem bir sonraki enerji depolama evresine hazırlanır [5],[6].

$$i_{Lr}(t) = i_{Lr}(t_3)cos(\theta_{r3}) - \frac{V_{clamp}(t_3)-V_{grid}/n}{Z_{i3}}sin(\theta_{r3}) \quad (13)$$

$$i_{Lm}(t) = i_{Lm}(t_3) - \frac{V_{grid}}{nL_m}(t-t_3) \quad (14)$$

$$\theta_{r3} = (t-t_3)/\sqrt{(C_{clamp}L_r)} \quad (15)$$

$$Z_{i3} = \sqrt{L_r\,/\,C_{clamp}} \quad (16)$$

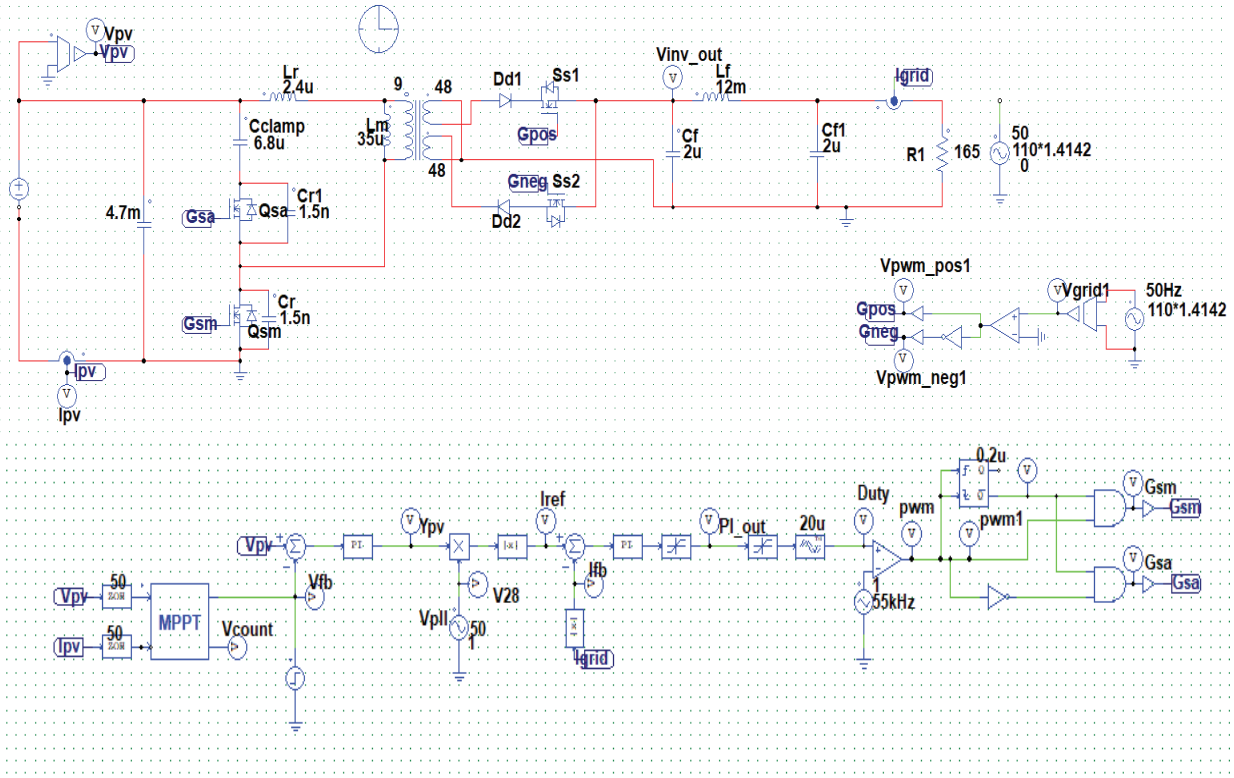
Mod-5 (t_4<t<t_5): Mod 5, yardımcı anahtar S_a kapatıldıktan sonra başlar. Bu aşamada sistemdeki rezonans akımı, artık ana anahtar S_m'nin parazitik kapasitansı olarak modellenen C_r kapasitörü üzerinden akar. Bu akım, C_r üzerindeki pozitif gerilimi rezonansla deşarj ederek S_m'nin Drain-Source geriliminin kontrollü şekilde sıfıra düşmesini sağlar. Bu modun temel amacı, S_m anahtarının bir sonraki döngüde sıfır voltaj altında (ZVS) anahtarlanmasını sağlamaktır. C_r üzerindeki gerilimin sıfıra inmesiyle ZVS koşulları sağlanır, anahtarlama kayıpları azaltılır ve anahtar ömrü uzatılır. Mod, C_r gerilimi sıfırlandığında sona erer [5],[6].

$$V_{Cr}(t) \approx V_{Cr}(t_4) + \frac{i_{Lr}(t_4)}{C_r}(t-t_4) \quad (17)$$

$$i_{Lr}(t) \approx i_{Lr}(t_4) - \frac{V_{Cr}(t_4)-(V_{PV}+V_{grid}/n)}{L_r}(t-t_4) \quad (18)$$

$$\frac{1}{2}C_r\left(V_{PV} + V_{grid}/n\right)^2 \le \frac{1}{2}{i_{Lr}}_p{}^2 L_r \quad (19)$$

Mod-6 (t_5<t<t_6): Mod 6, rezonans kapasitörü C_r'nin tamamen deşarj olmasıyla başlar. Bu noktada ana anahtar S_m' nin uçlarındaki gerilim sıfırlanmış durumdadır ve paralelindeki gövde diyodu iletime geçer, böylece sistem ZVS (Zero Voltage Switching) koşulunu sağlar. Bu esnada, hâlen devam eden küçük rezonans akımı, L_r



Şekil 3. PSIM simülasyon devresi

üzerinden akarak enerji geçişini kontrollü şekilde sürdürür. Kritik nokta, S_m anahtarının, bu sıfır gerilim anında diyot üzerinden akım geçerken iletime geçirilmesidir. Böylece, anahtar sıfır voltaj altında anahtarlanır, anahtarlama kayıpları ve dv/dt stresleri azaltılır. Mod, S_m tekrar iletime geçtiğinde sona erer ve sistem yüksek verimle yeni bir döngüye geçer [5],[6].

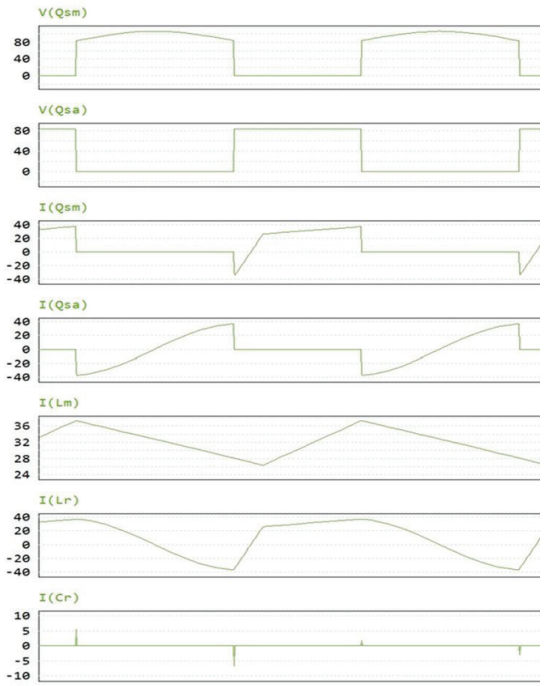
$$i_{Lm}(t) = i_{Lm}(t_5) - \frac{V_{grid}}{nL_m}(t - t_5) \quad (20)$$

$$V_{Lr} = V_{PV} + V_{grid}\ /n \quad (21)$$

$$i_{Lr}(t) = i_{Lr}(t_5) + \frac{V_{PV}+V_{grid}/n}{L_r}(t - t_5) \quad (22)$$

3 SİMULASYON ÇALIŞMALARI

Anahtarlama frekansı (f_s) 55 kHz olarak belirlenmiştir. Sarım oranı (n=Np/Ns=9:48), primer ve sekonder taraflardaki maksimum gerilim stresleri dikkate alınarak seçilmiştir. Rezonans indüktansı (L_r) ve mıknatıslanma endüktansı (L_m), devrenin çalışma modu (DCM) ve enerji transfer karakteristikleri doğrultusunda Lr=2.4uH ve Lm=35uH



Şekil 4. Temel anahtarlama sinyalleri

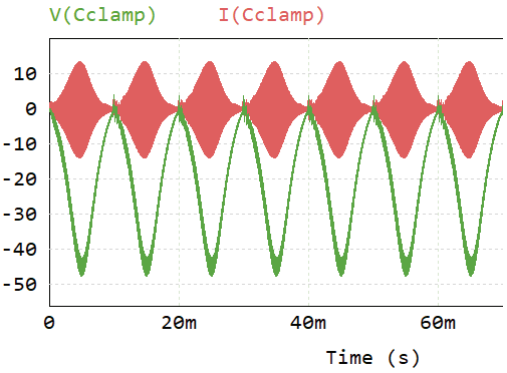
olarak belirlenmiştir. PSIM ortamında Şekil 3'te verilen PSIM devresi oluşturulmuş ve temel anahtarlama sinyalleri Şekil 4'teki gibi elde edilmiştir. Şekil 5'teki C_{clamp} gerilim ve

akım çıktıları, rezonans sırasında kapasitörün periyodik olarak şarj-deşarj olduğunu ve ZVS koşullarını desteklediğini göstermektedir. Şekil 6'da, Q_{Sm} ve Q_{Sa} anahtarlarının ZVS koşullarında çalıştığı görülmektedir. Gerilim sıfıra yaklaştığında anahtarlar iletime geçmekte, böylece anahtarlama kayıpları azalmakta ve sistem verimliliği artmaktadır. Şekil 7'de, V(R1) çıkış gerilimi görülmektedir. 110Vrms için elde edilen bu dalga şeklinin sinüsoidal olması gerekmektedir. Ancak yük olarak şebeke yerine bir rezistif yük kullanıldığından önemli miktarda bir distorsiyon meydana gelmektedir. Evirici çıkışında yük olarak şebeke kullanılırsa dalga şekli sinüsoidal olmaktadır.

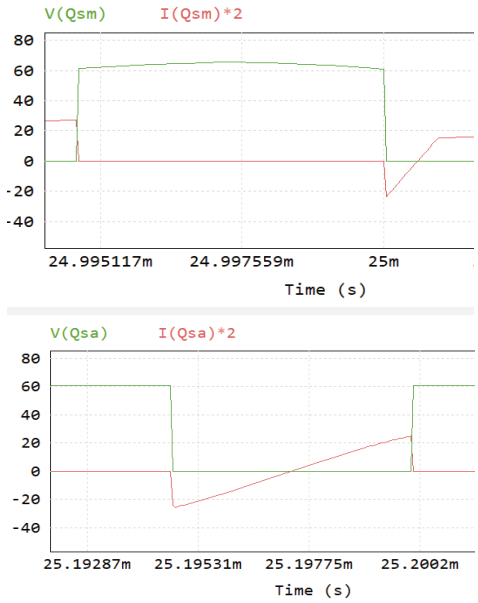
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sistemde, PV panel yerine DC güç kaynakları kullanıldığı için, MPPT algoritması uygulanmamıştır. Bu nedenle enerji dönüşümü sabit bir çalışma noktası üzerinden gerçekleştirilmekte, giriş gücüne göre adaptasyon yapılmamaktadır. Sekonder tarafta elde edilen sinüzoidal sinyal, LC filtre ile harmonik bileşenlerden arındırılarak düşük distorsiyonlu bir AC çıkış elde edilmiştir.

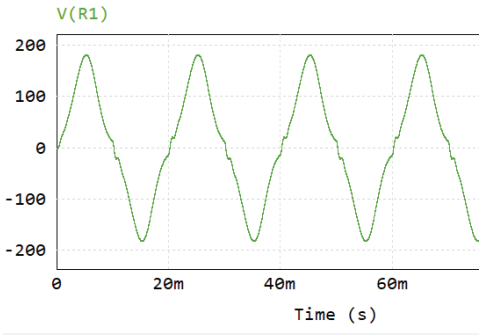
Şekil 8'de fotoğrafı verilen deneysel sistemin kontrolü STM32F072B-DISCO geliştirme kartı ile gerçekleştirilmiştir. Bu mikrodenetleyici, primer taraftaki ana MOSFET'leri sinüzoidal PWM (SPWM) yöntemiyle sürmekte ve sekonder taraftaki MOSFET'lerin senkron tetiklenmesi için zamanlama referansı oluşturmaktadır. SPWM sinyali, sabit frekanslı taşıyıcı dalga ile yazılımda oluşturulan sinüs referans tablosunun karşılaştırılması yoluyla elde edilmektedir. Primer tarafta IRFP260 Si mosfet ve sekonder tarafta C2M0160120 SiC mosfet kullanılmıştır.



Şekil 5. C_{Clamp} ve Lm Çıktıları



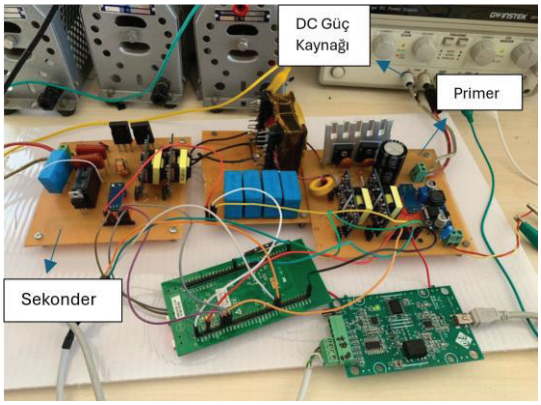
Şekil 6. Qsm ve Qsa'nın ZVS çalışması



Şekil 7. Çıkış Gerilimi

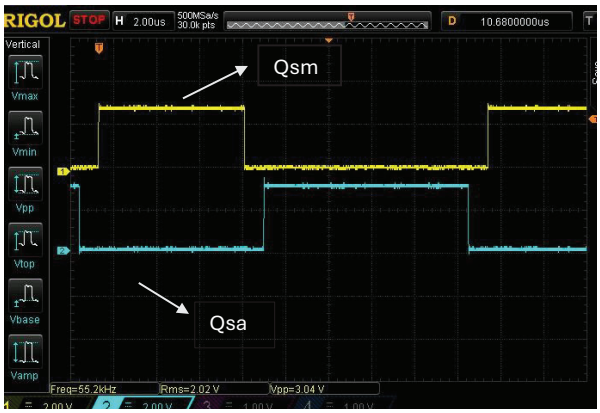
IEC 61000-3-2 standardında belirtilen toplam harmonik bozulma (THD) sınırlarına yaklaşılması hedeflenmiştir.

Şebeke ile senkronizasyon için PLL (Phase Locked Loop) algoritması yerine, kontrolcü tarafından üretilen sabit frekanslı SPWM sinyali referans alınarak sistem faz ve frekansı belirlenmiştir. Ayrıca dış sistemlerle haberleşme ve veri izleme işlemleri, Modbus RTU protokolü üzerinden sağlanmıştır.

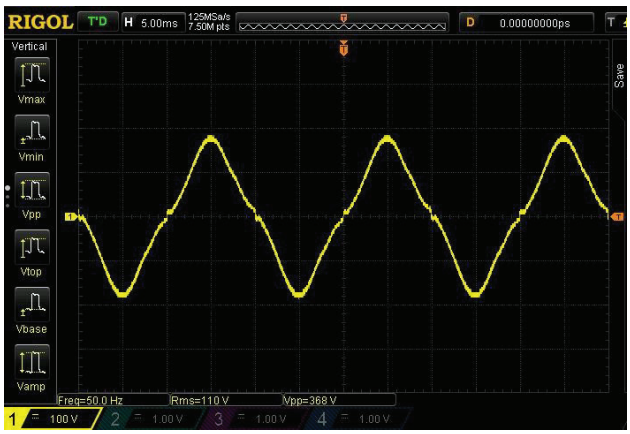


Şekil 8. Deneysel prototipin görünümü

Deneysel bulgular, ana anahtarda ZVS koşullarının sağlandığını ve sistemin kararlı çalıştığını göstermiştir. Şekil 9'da primer anahtarların kapı sinyalleri arasındaki süreler açıkça görülmektedir. Evirici çıkış geriliminin rezistif yükte iken osiloskop ekran görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir. Bu gerilimin sinuzoidal dalga şekline sahip olması beklenirken, farklı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, yükün AC gerilim kaynağı değil bir rezistif yük olmasıdır. Bu dalgaformu Şekil 7'de verilen simulasyon sonucu ile uyumludur. Deneysel çalışmada şebekeye bağlantı yapılmayıp rezitif bir yük kullanıldığı için böyle bir sonuç elde edilmiştir. PWM modülasyonu uygun şekilde değiştirilerek bu dalga formunun sinüzoidal yapılabilmesi mümkündür. Elde edilen sonuçlar, simülasyon ve teorik analizlerle uyumludur.



Şekil 9. Primer anahtarları kapı sinyalleri



Şekil 10. 275 Ω dirençli yük altında, LC filtre sonrası elde edilen AC çıkış gerilimi

5 SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, düşük güçlü fotovoltaik sistemler için izolasyonlu, kompakt ve yüksek verimli bir mikro evirici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Flyback topolojisine dayalı yapıda aktif kenetleme ve yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılarak, anahtarlama kayıpları azaltılmış ve sistem verimliliği artırılmıştır. Simülasyon ortamında 110 V_{rms} çıkış gerilimi hedeflenerek yapılan analizlerde, maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve faz kilitlemeli çevrim (PLL) algoritmaları simülasyon dabaşarıyla uygulanmıştır. Donanımsal prototipte ise bu algoritmalar donanım sınırlamaları nedeniyle entegre

edilememiştir. Uygulanan LC filtre sayesinde çıkışta sinüse yakın bir gerilim elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda sistem verimi %80–85 aralığında gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yapının düşük güçlü yenilenebilir enerji uygulamaları için uygun ve geliştirilmeye açık bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

6 REFERANSLAR

[1] Çelik, Ö., Teke, A., & Tan, A., *Overview of Micro-inverters as a Challenging Technology in Photovoltaic Applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 82, pp 3191–3206, 2018.

[2] S. Zengin, F. Deveci, and M. Boztepe, "Decoupling Capacitor Selection in DCM Flyback PV Microinverters Considering Harmonic Distortion," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 816-825, 2013

[3] Ned Mohan, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Wiley, 2003.

[4] Texas Instruments, "Grid-Connected Micro Solar Inverter Implement Using a C2000 MCU," TI Reference Design, 2014.

[5] M. H. Lessing, E. Agostini and I. Barbi, "An active-clamping single-stage DC-AC flyback converter," 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Curitiba, PR, Brazil, 2016, pp. 1-6,

[6] R. Hasan, S. Mekhilef, M. Nakaoka and K. Nishida, "Soft-switching active-clamp flyback microinverter for PV applications," 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), Auckland, New Zealand, 2016, pp. 1-6,

[7] S. Zengin, F. Deveci, M. Boztepe, "Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler İçin Flyback Mikro Evirici Tasarımı," Pamukkale Univ. Müh. Bilim Dergisi, Vol. 21(2), pp. 30-36, 2015.

ENERJİ HATLARINDA HATA ORANININ AZALTILMASI HABERLEŞME (PLC) TABANLI AKILLI ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Beril Yetiş[(1)]	Sarp Namdar[(1)]	S. Bora Günden[(1)]	Berk Baykal[(2)]	Hacer Öztura[(1)]
yyetis.beril@gmail.com	namdarsarp@gmail.com	gundenbora@gmail.com	berk.baykal@landisgyr.com	hacer.sekerci@yasar.edu.tr

[(1)]Yaşar Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bornova İzmir
[(2)] Luna A.Ş. Çiğli İzmir

***ÖZET**: Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, Güç Hattı İletişimi (PLC), mevcut enerji iletim hatları üzerinden veri aktarımını mümkün kılarak ek iletişim altyapısına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Bu özellik, akıllı sayaçların ve kamu hizmeti sağlayıcılarına ait kontrol sistemlerinin anlık veri alışverişinde bulunması gereken akıllı şebeke uygulamalarında özellikle önem arz etmektedir. Ancak, donanım bileşenleri ve çevresel kaynaklardan yayılan yüksek frekanslı elektromanyetik girişimler, G3-PLC tabanlı sistemlerin güvenilir iletişim kurmasını önemli ölçüde zorlaştırmaktadır.*

Anahtarlamalı güç kaynakları (SMPS), harmonik bozunumlar, impulsif parazitler ve geniş bantlı beyaz gürültü gibi kaynaklardan gelen parazitler, özellikle kamu hizmetlerine yönelik PLC uygulamaları için ayrılmış olan 35–95 kHz frekans aralığında sinyal kalitesini ciddi şekilde düşürmektedir.

Bu çalışmada istenmeyen gürültü bileşenlerini azaltmak ve iletişim kalitesini artırmak amacıyla üç farklı bant durdurucu filtre tasarımı gerçekleştirilmiş, uygulanmış ve performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece hem akademik hem de endüstriyel bakış açısıyla, PLC sistemlerinin güvenilirliğini artırmaya yönelik etkili filtre tasarımı yaklaşımlarını ortaya koymakta ve dijital ile analog filtre çözümlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirerek gelecek nesil akıllı şebeke altyapıları için güçlü, ölçeklenebilir ve gürültüye dayanıklı haberleşme platformlarının geliştirilmesine katkı sağlanmaktadır.

1.GİRİŞ

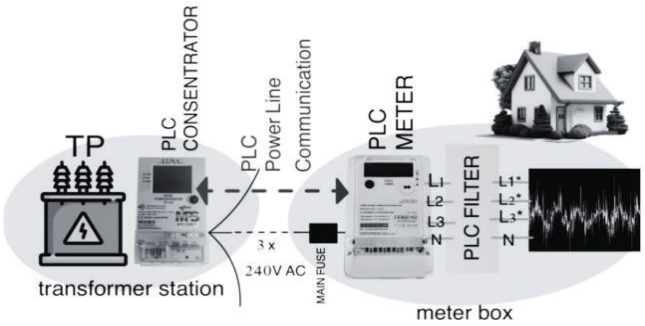
Güç Hattı İletişimi (PLC), mevcut elektrik altyapısı üzerinden veri iletimine imkan tanıyarak, ek kablolama ihtiyacını ortadan kaldıran verimli bir haberleşme yöntemidir. G3-PLC standardı, Avrupa'da kamu hizmeti ile ilgili veri iletimi için ayrılmış olan 35-95 kHz frekans bandında çalışan yaygın bir protokoldür. Bu sistemler, akıllı şebekelerde sayaçlar ve kontrol merkezleri arasında veri alışverişini gerçekleştirerek enerji yönetiminin dijitalleşmesini destekler [1].

Ancak, enerji hatlarının karmaşık elektriksel ortamları, özellikle SMPS (anahtarlamalı güç kaynağı) parazitleri, harmonik bozulmalar, impulsif sinyaller ve genliği geniş bantlara yayılan beyaz gürültüler nedeniyle haberleşmeyi olumsuz etkiler [2]. Bu tür gürültüler sinyal- gürültü oranını düşürerek bit hata oranını (BER) artırmakta ve iletimin doğruluğunu sarsmaktadır. Özellikle G3-PLC tabanlı sistemlerin yaygınlaştığı alanlarda, bu parazitlerin bastırılamaması, sistem performansını ve verimliliğini önemli ölçüde düşürebilir [1].

Bu nedenlerle, PLC tabanlı sistemlerdeki özellikle 35-95 kHz aralığındaki paraziti etkili şekilde azaltabilecek filtre çözümlerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Geleneksel filtreleme yöntemleri; ya yüksek ölçüte donanım karmaşıklığı getirmekte, ya da dar bantlı çözümlerle sınırlı kalmaktadır. Bu projenin çıkış noktası, söz konusu bantta etkin bastırma sağlayabilen, gerçek sistemlerle uyumlu, uygulanabilirliği yüksek filtre tasarımlarını karşılaştırmalı olarak incelemektir [3-5].

Amaç; dijital, pasif ve aktif filtre alternatiflerini teknik performans, karmaşıklık, enerji tüketimi ve

uygulama uyumluluğu gibi kriterlere göre değerlendirerek, G3-PLC sistemlerinde gürültünün azaltılmasına yönelik optimum filtre çözümlerini belirlemektir.



***Şekil 1**. Filtre tasarımı kullanılan Güç Hattı İletişimi(PLC)*

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, bant durdurucu filtre tasarımı için üç farklı yaklaşım izlenmiştir: dijital filtreleme, pasif LC filtreleme ve aktif analog filtreleme. Her bir tasarım, belirli uygulama senaryolarına uygun şekilde gerçekleştirilmiş ve benzetim ortamında analiz edilmiştir.

2.1 Dijital Eliptik Filtre

Python kullanılarak, 35–95 kHz arasındaki bantta yaklaşık 60 dB zayıflatma sağlayan altıncı dereceden dijital bir eliptik bant durdurucu filtre tasarlanmıştır. “ellip” ve “filter” komutları yardımıyla uygulanan bu filtre, yüksek geçiş bandı keskinliği sayesinde hedeflenen frekanslarda verimli bastırma sağlarken, çevresel bozulmaları da minimize etmiştir[6,7].

```
# 3. Digital Elliptic Filter Design (6th Order Band-Stop)

digital_filter_order = 6
elliptic_passband_ripple_db = 0.1
elliptic_stopband_attenuation_db = 60

# Calculate Elliptic filter coefficients (b and a)
b_dig, a_dig = signal.ellip(digital_filter_order, elliptic_passband_ripple_db, elliptic_stopband_attenuatio

# Apply the filter to the signal
filtered_digital_signal = signal.lfilter(b_dig, a_dig, composite_input_signal)

print(f"Digital (Elliptic {digital_filter_order}th Order) filter designed and applied.")

#  Cell 4: FFT Analysis and Spectrum Calculation

#4. FFT Analysis

fft_original_signal = np.fft.fft(composite_input_signal)

mag_spectrum_original = 2.0/num_samples * np.abs(fft_original_signal[0:num_samples//2])
freq_axis_khz_plot = Fs * np.arange(0, num_samples//2) / num_samples / 1e3
fft_digital_filtered_signal = np.fft.fft(filtered_digital_signal)
mag_spectrum_digital_filtered = 2.0/num_samples * np.abs(fft_digital_filtered_signal[0:num_samples//2])

print("Signal spectra calculated.")
```

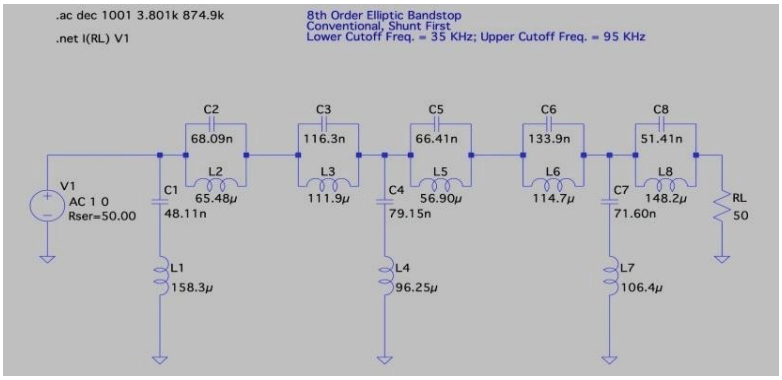
***Şekil 2.** Dijital Eliptik Filtre Tasarımı*

Ayrıca filtreleme sürecinde kullanılan sentetik test sinyali; 60 kHz’de modüle SMPS gürültüsü, 40–80 kHz harmonik bileşenleri, rastgele konumlandırılmış impulsif sinyaller ve geniş bant beyaz gürültü gibi çoklu parazit kaynaklarını içerecek şekilde gerçek uygulama koşullarına uygun biçimde oluşturulmuştur. Bu sinyal, filtre öncesi ve sonrası FFT analizleriyle değerlendirilmiş ve filtre performansları bu spektral farklara göre sayısal olarak incelenmiştir.

2.2 Pasif LC Eliptik Filtre

Pasif LC bant durdurucu filtre tasarımında, LTspice ortamında her biri farklı merkez frekanslara ayarlanmış toplam altı adet LC direnç paralel olarak bağlanmıştır. Bu yapı, 38 kHz, 48 kHz, 58 kHz, 68 kHz, 78 kHz ve 88 kHz frekanslarında etkin bastırma sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Her rezistör, belirli bir frekansta rezonansa girerek sinyalin o frekans bileşenini zayıflatmakta ve topluca bir bant durdurucu etki oluşturmaktadır [5, 8].

Bu yapının sayısal modeli MATLAB ortamında geliştirilmiş olup, her LC çiftinin empedansı frekans fonksiyonu cinsinden hesaplanmıştır. Bu empedans değerleri birleştirilerek toplam transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Ardından bu transfer fonksiyonu, bileşik sinyalin frekans spektrumuna (FFT) uygulanarak genlik bazlı zayıflatma sağlanmış ve zaman alanına geri dönüştürülmüştür. Bu yöntem, LC filtre yapısının teorik bastırma profilinin, sinyal üzerindeki pratik etkisini gözlemlemeye olanak tanımıştır.



Şekil 3. *Pasif Eliptik Filtre Tasarımı*

2.3 Aktif Butterworth Filtre

Aktif Butterworth bant durdurucu filtre tasarımında, öncelikle 8.dereceden teorik Butterworth transfer fonksiyonu MATLAB çevresinde hesaplanmış ve frekans bandının şekilsel özelliklerine uygun şekilde 35–95 kHz arasında bant durdurucu bir yanıt üretilmiştir. Bu transfer fonksiyonu dijital ortamda bileşik sinyale uygulanarak, zamana bağlı bastırma etkisi gözlemlenmiştir.

Ayrıca, bu filtre devresi LTspice ortamında gerçekleşebilir bir şekilde, her biri ikinci dereceden olacak şekilde kademeli olarak düzenlenmiş 4 adet op-amp temelli sekme ile tasarlanmıştır. Bu sayede hem istenilen bastırma seviyesine ulaşılmış, hem de devrenin fiziksel uygulanabilirliği korunmuştur. Her sekmenin merkez frekansı ve bant genliği ayrı ayrı hesaplanarak simüle edilmiştir [3, 5, 8].

Simülasyonlar, filtre kararlılığını ve frekans cevabının zamanla değişmediğini göstermiştir. Bu da aktif filtre tasarımının özellikle istikrarlı ve tekrar edilebilir bastırma ihtiyacı duyulan uygulamalarda kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

2.4 Sentetik Parazitli Sinyal Oluşturma

Gerçekçi koşullar altında filtre performansını değerlendirmek amacıyla hem Python hem de MATLAB ortamlarında iki farklı sentetik parazit sinyali oluşturulmuştur. İlk olarak, Python ortamında geliştirilen sinyal (Şekil 4), dijital eliptik filtre tasarımının test edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

```python
# 1. White Noise
white_noise = 0.2 * np.random.randn(num_samples)
# 2. Impulse Noise
impulse_noise = np.zeros(num_samples)
impulse_indices = np.random.randint(0, num_samples, 20)  # 20 random impulses
impulse_noise[impulse_indices] = 3  # Higher amplitude for impulses
# 3. Harmonic Noise (common in power lines)
harmonic_noise = 1.0 * np.sin(2*np.pi*40e3*time_vector_s) + 0.7*np.sin(2*np.pi*80e3*time_vector_s)
# 4. SMPS Noise (Simulated as AM-modulated noise around a carrier, e.g., 60 kHz)

smps_noise = 0.5 * np.sin(2*np.pi*60e3*time_vector_s) * (1 + 0.5*np.sin(2*np.pi*5e3*time_vector_s))

# 5. G3-PLC Like Signal (signals we want to preserve)
f_plc1_hz = 45e3
f_plc2_hz = 65e3
f_plc3_hz = 85e3
clean_plc_signal = 0.8 * np.sin(2 * np.pi * f_plc1_hz * time_vector_s) + \
                   1.0 * np.sin(2 * np.pi * f_plc2_hz * time_vector_s) + \
                   0.6 * np.sin(2 * np.pi * f_plc3_hz * time_vector_s)

composite_input_signal = clean_plc_signal + white_noise + impulse_noise + harmonic_noise + smps_noise

print("Synthetic signal generated.")
```

Şekil 4. *Sentetik Parazitli Sinyal Oluşturma Kodu (Dijital)*

Bu sinyal; 45 kHz, 65 kHz ve 85 kHz frekanslarında iletişim amaçlı taşıyıcı tonları, 40 kHz ve

80 kHz frekanslarında harmonik parazit bileşenlerini, 60 kHz merkezli modüle SMPS gürültüsünü, rastgele yerleştirilmiş impulsif gürültü darbelerini ve geniş bant beyaz Gauss gürültüsünü içermektedir [2, 9]. Python'da bu sinyalin oluşturulması, hızlı prototipleme yapılmasına ve filtreleme algoritmasının frekans bazlı etkinliğinin değerlendirilmesine imkân tanımıştır.

İkinci olarak, MATLAB ortamında oluşturulan sentetik sinyal (Şekil 5), üç filtrenin karşılaştırmalı analizlerinde kullanılmıştır.

```
%% Sentetik Gürültü Üretimi
white_noise = 0.2 * randn(size(t));
impulse_noise = zeros(size(t));
impulse_indices = randi([1, N], 1, 20);
impulse_noise(impulse_indices) = 3;
harmonic_noise = sin(2*pi*40e3*t) + 0.7*sin(2*pi*80e3*t);
smps_noise = 0.5 * sin(2*pi*60e3*t) .* (1 + 0.5*sin(2*pi*5e3*t));
f_plc1 = 45e3; f_plc2 = 65e3; f_plc3 = 85e3;
plc_signal = 0.8*sin(2*pi*f_plc1*t) + sin(2*pi*f_plc2*t) + 0.6*sin(2*pi*f_plc3*t);
composite_signal = plc_signal + white_noise + impulse_noise + harmonic_noise + smps_noise;

```

Şekil 5. *Sentetik Parazitli Sinyal Oluşturma Kodu (Karşılaştırma)*

Bu sinyal, filtreleme işlemlerinin eşit koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. İletişim ve parazit bileşenleri, enerji iletim hatlarında karşılaşılabilecek gerçek dünya senaryolarına benzer şekilde seçilmiştir.

Her iki sinyal de 0.02 saniyelik bir zaman aralığında, 500 kHz örnekleme frekansı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yapı sayesinde, filtreleme öncesi ve sonrası spektral analizlerle bastırma performansları ayrıntılı olarak incelenebilmiştir.

2.5 Karşılaştırma Metodolojisi

Her bir filtre, sentetik olarak oluşturulmuş aynı test sinyali üzerine ardışık olarak uygulanmış; filtre öncesi ve sonrası sinyallerin frekans spektrumları FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) aracılığıyla hesaplanmıştır. Elde edilen spektrumlar, mutlak genlik farkı esas alınarak dB cinsinden bastırma grafiklerine dönüştürülmüştür. Bu sayede her filtrenin 35–95 kHz bandındaki etkinliği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş, spektral bastırma kapasitesi nicel olarak ortaya konmuştur [6, 7].

Her bir filtre, frekans cevabındaki davranışı ve durdurma bandında sağladığı zayıflatma düzeyi (desibel cinsinden), geçiş bandında oluşan bozulmalar ve sinyal bütünlüğünü koruma kapasitesi, faz cevabı karakteristikleri ile grup gecikmesi profili, uygulama açısından karmaşıklığı (içerdiği bileşen sayısı, devre tasarımında gereken çaba ve yazılım algoritmalarının işlem yükü dâhil) ve son olarak da PLC tabanlı akıllı sayaç sistemlerine entegrasyonundaki pratik uygulanabilirliği gibi teknik kriterlere göre kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir [1, 5].

```
plot(f_plot/1e3, 20*log10(P1_pass+eps), 'r', 'DisplayName', 'Pasif (LC)');
plot(f_plot/1e3, 20*log10(P1_act+eps), 'g', 'DisplayName', 'Aktif (Butterworth)');
grid on; xlim([0 150]); ylim([-80 10]);
xlabel('Frekans (kHz)'); ylabel('Genlik (dB)');
title('Filtrelenmiş Sinyallerin Frekans Cevapları');
legend;

subplot(2,1,2);
plot(f_plot/1e3, 20*log10(P1_dig+eps) - 20*log10(P1_orig+eps), 'b', 'DisplayName', 'Dijital Azalma');
hold on;
plot(f_plot/1e3, 20*log10(P1_pass+eps) - 20*log10(P1_orig+eps), 'r', 'DisplayName', 'Pasif Azalma');
plot(f_plot/1e3, 20*log10(P1_act+eps) - 20*log10(P1_orig+eps), 'g', 'DisplayName', 'Aktif Azalma');
grid on; xlim([0 150]); ylim([-80 5]);
xlabel('Frekans (kHz)'); ylabel('Zayıflama (dB)');
title('Gerçek Zayıflama (Filtre Sonrası - Öncesi)');
legend;

1e3, 20*log10(P1_pass+eps); 'r', 'DisplayName', 'Pasif (6 LC Notch)';
plot(f_plot/1e3, 20*log10(P1_act+eps), 'g', 'DisplayName', 'Aktif (Butterworth)');
xlabel('Frekans (kHz)');
ylabel('Genlik (dB)');
title('FFT Spektrum Karşılaştırması');
legend('Location', 'best');
grid on;
xlim([0 150]); ylim([-80 10]);

subplot(2,1,2);
sup_d = 20*log10(P1_dig + eps) - 20*log10(P1_orig + eps);
sup_p = 20*log10(P1_pass + eps) - 20*log10(P1_orig + eps);
sup_a = 20*log10(P1_act + eps) - 20*log10(P1_orig + eps);
plot(f_plot/1e3, sup_d, 'b', 'DisplayName', 'Dijital Bastırma'); hold on;
plot(f_plot/1e3, sup_p, 'r', 'DisplayName', 'Pasif Bastırma');
plot(f_plot/1e3, sup_a, 'g', 'DisplayName', 'Aktif Bastırma');
xlabel('Frekans (kHz)');
ylabel('Zayıflatma (dB)');
title('Gerçek Gürültü Bastırma Karşılaştırması');
legend('Location', 'best');
grid on;
xlim([0 150]); ylim([-80 10]);
```

Şekil 6. *Üç Filtrenin Karşılaştırılma Analizi MATLAB Kodu*

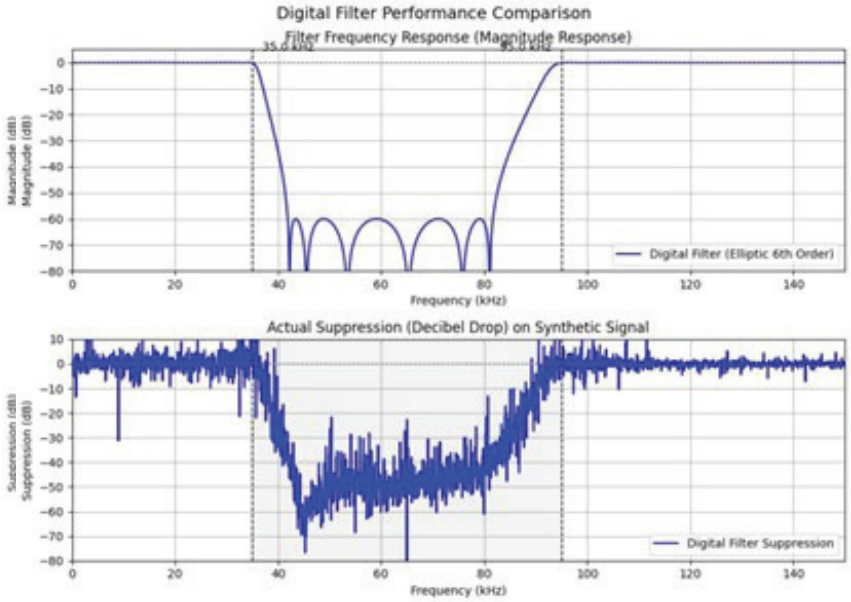
3. BULGULAR

Bu bölümde, geliştirilen üç farklı bant durdurucu filtrenin hem teorik hem pratik performansı, oluşturulan sentetik parazitli sinyal üzerindeki etkileri bağlamında ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Değerlendirme, filtrelerin bastırma başarımı, faz davranışı, grup gecikmesi, geçiş bandı karakteristikleri ve uygulama açısından avantaj/dezavantaj yönlerini içerecek şekilde yapılmıştır. Uygulama aşamasında ikili bir yaklaşım benimsenmiş; yazılım tabanlı dijital filtre tasarımı Python ortamında, analog filtrelerin tasarımı LTspice ve MATLAB ortamlarında simülasyonları

gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, dijital eliptik, pasif LC ve aktif Butterworth filtrelerinin CENELEC-A frekans bandındaki parazitleri bastırma hedeflerine karşı kapsamlı ve uygun doğrulamalarının yapılmasına olanak sağlamıştır.

3.1 Dijital Eliptik Filtre Performansı

Dijital filtre, Python ortamında ellip algoritması ile altıncı dereceden eliptik yapıda tasarlanmıştır. Bu yapı, yaklaşık 60 dB zayıflatma sağlayarak 35–95 kHz arasındaki hedef bantta yüksek bastırma performansı sunmuştur. Frekans cevabında elde edilen geçiş bandı keskinliği, bastırma verimliliğini artırmakla birlikte çevresel geçiş bölgelerinde minimal etki sağlamıştır. FFT analizleri, filtre öncesi ve sonrası spektrumlar arasında belirgin bastırma farklarını ortaya koymuştur.



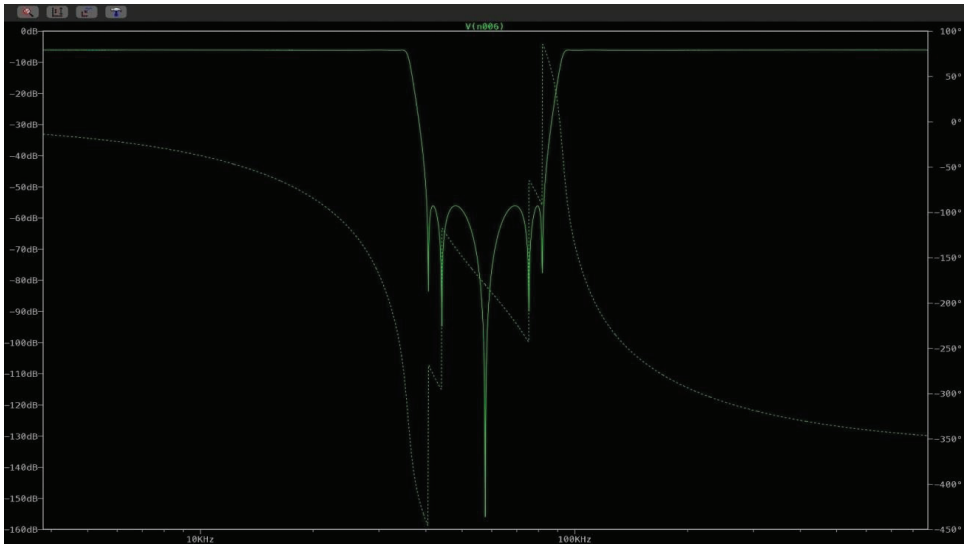
Şekil 7. *Dijital eliptik filtrenin performansı: İdeal yanıt (üstte) ve gerçek baskılama (altta).*

Ancak, eliptik filtrelerin doğası gereği, faz cevabında ani değişimler ve yüksek grup gecikmeleri gözlemlenmiştir. Bu durum, gerçek zamanlı sinyal iletim uygulamalarında faz bozulmalarına neden olabileceğinden, uygulama ortamına göre değerlendirme yapılması gerekmektedir [4, 5].

3.2 Pasif LC Filtre Performansı

Pasif filtre tasarımı, paralel bağlı altı farklı LC direnç oluşan bir yapıdadır. Her rezistör belirli bir merkez frekansta ayarlanarak, 38, 48, 58, 68, 78 ve 88 kHz frekans bileşenlerini bastıracak şekilde optimize edilmiştir. LTspice simülasyonları ve MATLAB analizleri, bu yapının belirlenen merkez frekanslarda efektif bastırma sağladığını ve filtreleme karakteristiğinin rezistör sayısıyla birlikte arttığını göstermektedir [1, 2, 8].

Enerji tüketimi bulunmayan bu pasif yapı, elektromanyetik uyumluluk açısından avantaj sağlarken, tasarım hassasiyeti ve her LC bileşeninin doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Teorik transfer fonksiyonu kullanılarak bileşik sinyale uygulanan bastırma etkisi, FFT tabanlı ölçümlerle doğrulanmıştır.



Şekil 8. *LTspice simülasyonundan elde edilen pasif LC filtrenin frekans ve faz tepkisi*

Pasif filtre, LTspice frekans tarama verileriyle de doğrulandığı üzere belirgin notch (çentik) noktaları sergilemiştir (Şekil 8). Bu şekilde, genlik (düz çizgi) ve faz (kesikli çizgi) yanıtları birlikte sunulmuştur. Genlik yanıtı, belirli frekanslarda zayıflatmanın 70 dB'nin altına düştüğünü doğrulamakta ve hedefe yönelik yüksek seçicili bir bastırma sağladığını ortaya koymaktadır.

3.3 Aktif Butterworth Filtre Performansı

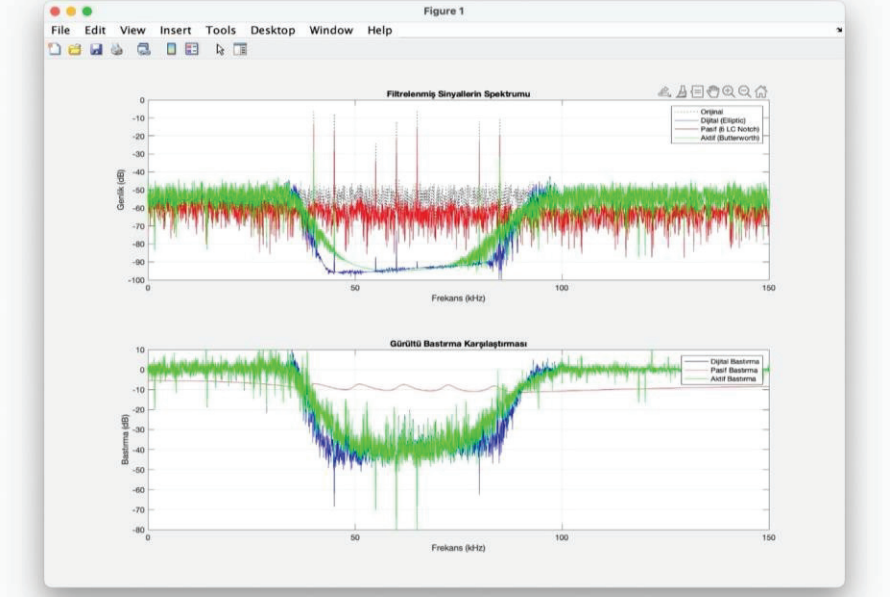
Butterworth yapısında incelenen aktif filtre, sekizinci dereceden bant durdurucu bir yapı olarak değerlendirilmiştir. Ancak bu filtre LTspice ortamında modellenmemiş, yalnızca karşılaştırmalı analizlerde dijital ve pasif filtrelerle birlikte performans değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, aktif filtre yaklaşık 30–40 dB arasında orta seviyede bastırma sağlamıştır. Ancak op-amp bant genişliği kısıtları nedeniyle, özellikle üst frekans sınırına yakın bölgelerde bastırma performansında azalma gözlenmiştir [4, 6, 7]. Bu filtreye ait bireysel bir transfer fonksiyonu grafiği sunulmamış olsa da karşılaştırmalı performansı ‘Şekil 9’da açıkça gösterilmektedir.

Aktif yapı, enerji ihtiyacı ve karmaşıklık açısından bazı uygulamalarda dezavantaj oluştursa da, uzun vadeli stabilite ve tekrar edilebilirlik açısından üstünlük sunmaktadır [6, 7]. Her sekme ayrı ayrı analiz edilerek filtre devresinin toplam faz ve genlik cevabı optimize edilmiştir.

3.4 Karşılaştırmalı Değerlendirme

Her üç filtre ayrı ayrı, oluşturulan aynı parazitli sinyal üzerinde uygulanarak, filtre öncesi ve sonrası spektrumlar karşılaştırılmıştır ve filtrelerin performansları Şekil 9’da gösterilmiştir.

Üstteki grafik olan "Filtrelenmiş Sinyallerin Spektrumu" başlıklı çizimde, her filtrenin aynı parazitli sinyale uygulanmasından sonra elde edilen çıkış spektrumları gösterilmektedir. Noktalı çizgi ile temsil edilen orijinal sinyale kıyasla, üç filtrenin de 35–95 kHz bandındaki parazit seviyesini belirgin şekilde azalttığı görülmektedir. Alt grafikte yer alan "Gürültü Bastırma Karşılaştırması" başlıklı çizim ise, her filtrenin bastırma profillerini doğrudan karşılaştırmalı olarak sunmakta ve bastırma farklarını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 9. *Filtre çıkış spektrumlarını (üstte) ve gürültü bastırma profillerini (altta) gösteren karşılaştırmalı analiz*

Elde edilen sonuçlar, her bir filtrenin performans özellikleri açısından dikkat çekici farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Dijital eliptik filtre, durdurma bandında 60 dB'nin üzerinde dikkat çekici bir bastırma sağlarken, geçiş bandında bozulma yaratmadan çalışmıştır [3, 5]. Ancak, bu filtrenin uygulanabilirliği özel dijital sinyal işleme (DSP) donanımı gerektirdiğinden sınırlı olabilir.

Dijital eliptik filtre, bastırma düzeyi bakımından en başarılı sonuçları verirken, aktif filtre grup gecikmesini minimize etme ve kararlı geçiş sunma konusunda öne çıkmıştır. Pasif filtre ise donanımsal sadeliği, düşük maliyeti ve enerji ihtiyacının bulunmaması gibi nedenlerle sistem entegrasyonunda avantaj sunmuştur.

Pasif LC eliptik filtre, dikkatlice ayarlanmış rezonans noktalarında 70 dB'nin üzerinde bastırma sağlayarak yüksek performans sergilemiştir. Bu bastırma, geçiş bandında minimum bozulma ile birlikte elde edilmiş olup, frekans hassasiyeti sayesinde oldukça seçici bir filtreleme gerçekleştirilmiştir. Buna karşın, bu yapı bileşen toleranslarına son derece duyarlı olduğu için uygulama karmaşıklığı artmaktadır [7].

Aktif Butterworth filtre ise, 30–40 dB düzeyinde orta seviye bastırma sunmakla birlikte geçiş bandında oldukça düzgün bir davranış göstermiştir. Bu yapı, operasyonel yükselteçler (opamp) kullanılarak kolayca devreye alınabilmekte ve düşük tasarım karmaşıklığı sayesinde yüksek zayıflatmanın öncelikli olmadığı durumlarda uygun bir seçenek hâline gelmektedir [6].

Filtre topolojileri arasında belirgin karşılıklı avantajlar-dezavantajlar mevcuttur. Dijital filtre maksimum bastırma sağlarken daha fazla hesaplama gücü ister; pasif filtre yüksek seçicilik sunarken uygulama hassasiyeti gerektirir; aktif filtre ise sadelikle birlikte makul bastırma düzeyleri sunar. Uygulama alanına göre filtre seçimi bu teknik parametrelere göre yapılmalıdır.

4.SONUÇ

Bu tez çalışmasında, G3-PLC sistemlerinde parazit bastırmaya yönelik olarak üç farklı bant durdurucu filtre tasarlanmış, her biri hem teorik olarak hem de pratik senaryolar üzerinden değerlendirilmiştir. Dijital eliptik, pasif LC ve aktif Butterworth yapıdaki filtrelerin, CENELEC-A bandı üzerindeki gürültü bileşenlerini bastırma performansları analiz edilmiştir.

Çalışmanın başında Python ve MATLAB kullanılarak, PLC haberleşme sistemlerinde karşılaşılabilecek gerçek dünya senaryolarını modelleyen sentetik parazitli sinyaller oluşturulmuştur. Bu sinyallerde, istenilen haberleşme frekanslarına ek olarak harmonik, SMPS kaynaklı, impulsif ve beyaz Gauss gürültü bileşenleri bir araya getirilmiştir. Böylece tüm filtrelerin eşit koşullarda test edilmesine olanak sağlanmıştır.

Uygulanan testler sonucunda, dijital eliptik filtre yaklaşık 60 dB üzeri zayıflama sağlayarak yüksek bastırma başarımı göstermiştir. Ancak bu yapı, faz cevabında düzensizlikler ve grup gecikmesi gibi dezavantajlar nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda dikkatli kullanılmalıdır. Pasif LC filtre ise belirli çentik frekanslarında 70 dB'ye varan zayıflatmalar sunarak yüksek frekans seçiciliği sergilemiş, ancak bileşen toleranslarına olan duyarlılığı uygulama karmaşıklığını artırmıştır. Aktif Butterworth filtresi, 30–40 dB arasında tutarlı bir zayıflama sağlayarak üstün geçiş bandı düzlüğü ve faz doğruluğu sergilemiştir. Bu durum, sinyal bozulmasının en aza indirilmesinin öncelikli olduğu ve aşırı bastırmanın gerekmediği uygulamalar için dengeli ve uygun bir çözüm sunmaktadır.

Filtreleme performansına ilişkin karşılaştırmalı analizler, filtrelerin bastırma profillerini görsel olarak ortaya koymuş ve her yapının belirli senaryolarda farklı avantajlar sunduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, filtre seçimi yalnızca bastırma düzeyine değil; uygulama karmaşıklığı, enerji tüketimi, frekans seçiciliği ve faz davranışı gibi kriterlere göre bütüncül bir şekilde yapılmalıdır. Bu bağlamda çalışma, PLC tabanlı sistemlerde parazit yönetimi açısından mühendislik düzeyinde filtre seçiminin önemini vurgulamaktadır.

5.KAYNAKÇA

[1] L. Lampe, A. M. Tonello, and T. G. Swart (Editors), "Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid." John Wiley & Sons, 2016.

[2] Lampe, M., & Hrasnica, H. (2020). "Noise Mitigation Techniques for Powerline Communications in the CENELEC A-Band." IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC).

[3] R. Schaumann, M. E. Van Valkenburg, "Design of Analog Filters." Oxford University Press, 2001.

[4] M. S. Ghaffari, S. M. Nabavi, and A. Safavi, "Design and implementation of a tunable digital notch filter for power line communication systems." AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 68, no. 7, pp. 631–637, July 2014.

[5] Franco, S. (2002). Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated circuits. McGraw-Hill.

[6] A. V. Oppenheim and R. W. Schafer, "Discrete-Time Signal Processing." 3rd ed, Pearson, 2009.

[7] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2007). Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. Pearson Prentice Hall.

[8] Zverev, A. I. (1967). Handbook of Filter Synthesis. Wiley.

[9] Cortés, J. A., et al. (2018). "A Review of EMC and Filtering Solutions in Power Line Communications for Smart Grids." Energies, 11(12), 3321.

OG ŞEBEKENİN 5G İLE İZLENİLMESİ VE KONTROLÜ

Büşra TÖRE[1],Vedat ELİŞ[2], Tuğbanur TAŞDEMİR ÖZDEMİR[2]

busra.tore@eltemtek.com.tr, vedat.elis@gdzelektrik.com.tr,
tugbanur.tasdemir@gdzelektrik.com.tr

[1]ELEMTEK Elektrik Tesisleri Mühendislik Müt. Dan. ve Tic. A.Ş.

[2]GDZ Elektrik Dağıtım A.Ş.

ÖZET

Elektrikli araçların ve teknolojik cihazların çoğalması ile enerji ihtiyacın artmasının yanında enerji üretiminde yaşanılan kısıtlılık problemleri mevcut şebekenin verimliliğinin optimum olarak kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Küresel iklimin değişmesiyle ortam koşullarından dolayı yaşanılan arızaların sayısı gün geçtikçe artmakta ve uzun süreli kesintilere sebebiyet vermektedir. Günümüzde hızla değişen dünyada elektrik şebekesinin manuel işletilmesi zorlaşmakta ve dijitalleşme konusunda problemlerin çözümüne yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Akıllı şebekelere giden yolda enerji sektörü kullanımına uygun yeni sensör tasarımları, veri iletiminin hızlandırılmasının yanında izolasyon-güvenirliliğin üst seviye olduğu haberleşme sistemleri, bilgi teknolojileri sistemleri kullanılması gerekmektedir

Bu bildiride enerji sektöründe dijitalleşmeyi sağlayacak kilometre taşlarının detaylarına yer verilmiştir. Gelecekte elektrik şebekesinin izlenebilir ve uzaktan kontrol edilebilir elde edilen veriler doğrultusunda öngörülebilir bakım çalışmalarının yapılabildiği bir enerji yönetim sistemi oluşturulmasını hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: *Öngörülebilir bakım çalışmaları, varlık yönetimi, PIoT, 5G, enerji yönetim sistemi*

ABSTRACT

In addition to the increase in energy needs with the proliferation of electric vehicles and technological devices, the limitation problems experienced in energy production make it mandatory to use the efficiency of the existing grid optimally. With the change of global climate, the number of failures experienced due to environmental conditions is increasing day by day and causes long-term interruptions. In today's rapidly changing world, manual operation of the electricity grid is becoming more difficult and efforts are being made to solve problems related to digitalization.

On the way to smart grids, new sensor designs suitable for the use of the energy sector, communication systems where isolation-reliability is at a high level in addition to accelerating data transmission, information technology systems should be used.

In this statement, the details of the milestones that will enable digitalization in the energy sector are explained. In the future, it aims to create an energy management system in which predictable maintenance work can be carried out in accordance with the data obtained, which can be monitored and remotely controlled by the electricity grid.

Keywords*: Predictable maintenance work, asset management, PIoT, 5G, energy management system*

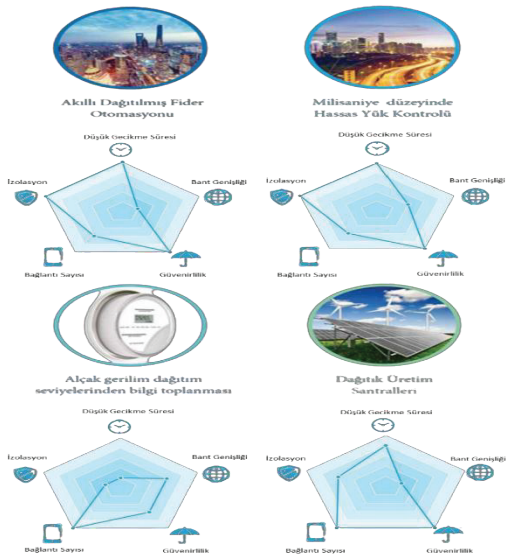
1. GİRİŞ

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla artan entegrasyonu, dağıtık üretim sistemlerinin yaygınlaşması ve IoT tabanlı akıllı cihazların (örneğin akıllı sayaçlar, sensörler, RTU'lar, IED'ler) enerji altyapısına entegre edilmesi, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin sayısal dönüşümünü zorunlu kılmaktadır. Bu dijitalleşme süreciyle birlikte kontrol merkezleri; izleme, analiz ve karar alma süreçlerini gerçek zamanlı veriye dayalı şekilde yöneten, büyük veri ve yapay zekâ destekli platformlara dönüşmektedir. Daha önce erişilemeyen ya da gecikmeli elde edilen veriler artık yüksek çözünürlüklü, sürekli ve zaman etiketli olarak toplanabilmekte; bu da işletmecilere daha hızlı, doğru ve proaktif karar alma imkânı sunmaktadır. Ancak bu veri yoğunluğu, enerji sistemlerinde kullanılan haberleşme altyapıları üzerinde ciddi bir kapasite baskısı oluşturmaktadır. Şekil 1'de de görüldüğü gibi haberleşme yönünden yaşanan zorluklara da yeni çözümler üretilmektedir.



Şekil 1. PIoT Ağının Temel Zorlukları

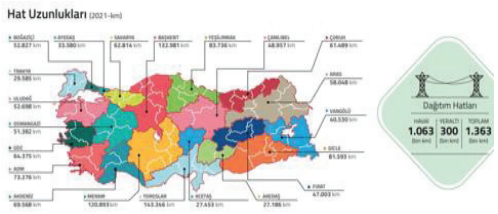
Artan veri trafiği, daha kısa veri iletim süreleri, yüksek doğruluk ve güvenilirlik beklentisi; haberleşme sistemlerinin bant genişliği, gecikme (latency), veri bütünlüğü ve güvenlik gibi temel performans parametrelerini ön plana çıkarmaktadır. Bu nedenle modern enerji sistemlerinde hem alan seviyesi (substation-level) hem de merkezden-uzak istasyonlara uzanan haberleşme ağlarında; zaman senkronizasyonlu, olay odaklı, önceliklendirilebilir ve birlikte çalışabilir (interoperable) veri iletim altyapılarının kullanılması kaçınılmaz hâle gelmiştir. Ayrıca bu altyapılar, yalnızca ham verinin taşınmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda iletilen verinin güvenliği, doğruluğu ve analize uygunluğu açısından da önemli işlevler üstlenmektedir. İşletme senaryolarına göre baktığımızda sistemin yaşayacağı zorluklar da farklılık göstermektedir. Akıllı şebekelerde gerçekleşecek olan 4 ana senaryo Şekil 2'deki gibi gösterilmiştir.



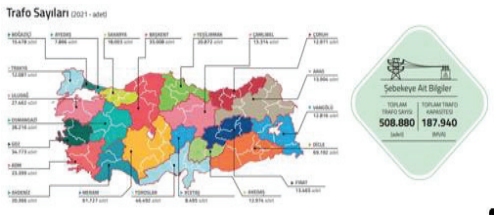
Şekil 2. Akıllı Şebeke İşletme Senaryoları

2.TÜRKİYE'DE ŞEBEKE DURUMU

Türkiye elektrik sisteminde iletim şebekesinde (>36 kV) 1000'in üzerinde şalt ve transformatör merkezleri, dağıtım şebekesinde (≤36 kV), ise 1 milyonun üzerinde dağıtım merkezi ve KÖKler bulunmaktadır. Bu merkezlerde, kesici, ayırıcı, transformatör, hücre, akım transformatörü, gerilim transformatörü gibi farklı cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlara ait gerilim, akım, frekans, enerji kalitesi, vb. bilgiler belirlenen değer aralığında değişim olduğunda alınabilmektedir. Bunun sebebi de cihazlara sürekli sorgu atıldığında gecikme süresinden dolayı sistemin yanıt vermemesidir. Bu durum, elektrik şebekesinin artan karmaşıklığı ve coğrafi yaygınlığı göz önüne alındığında, haberleşme gecikmelerini en aza indirerek sahadan anlık veri toplanmasını mümkün kılacak yüksek hızlı, düşük gecikmeli ve geniş kapsama alanına sahip yeni nesil iletişim teknolojilerine duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

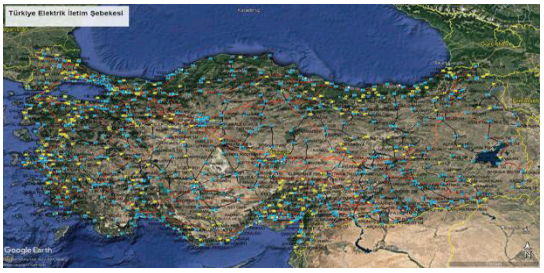


Şekil 3. Türkiye Şebekesinin Fiziki Durumu-Hat



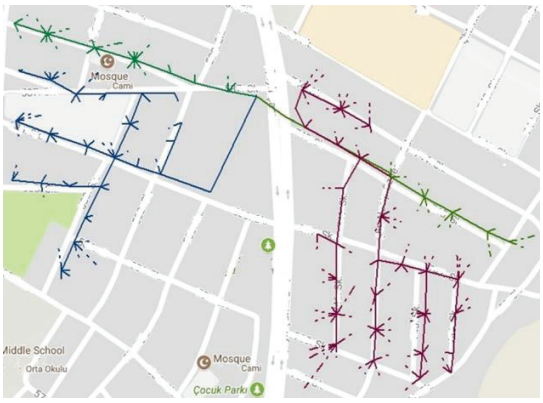
Şekil 4. Türkiye Şebekesinin Fiziki Durumu-Trafo

Bu bağlamda, Türkiye elektrik sistemi bütün coğrafyamıza dağıtık durumdadır. Son zamanlarda küresel iklim değişikliklerinden kaynaklanan ani sıcaklık değişimleri, fırtına, sel gibi doğal afet sayılarının artması, kış mevsimlerinin daha sert koşullarda geçmesi elektrik şebekesinde bulunan enerji iletim ve nakil hatlarında uzun süreli kesintilere sebep olabilmektedir. Bu nedenle bu tür afetlere maruz kalan bölgelerde farklı atmosferik ortam koşullarının izlenmesi ve cihazların işletme ömrünün hesaplanması için sensör ve yazılımlar gerekmektedir. Anlık verinin coğrafyamızın her noktasından alınabilmesi için 5G'nin veri alma hızı ve yüksek kapasitesi sayesinde sağlanabilecektir. Uç noktalardan anlık veri alınmaya başlanacak ve makine öğrenmesi ile öngörülebilir kestirimci bakım çalışmaları yapılabilecektir. Aynı zamanda cihazların M2M haberleşmesi sağlanacak ve enerji sektörüne ait sensör ağ haberleşme yapısı kurulmuş olacaktır.Tüm bu gelişmelerin yanı sıra, elektrikli araçlar ve teknolojik cihazların yaygınlaşması doğrultusunda izlenen ulusal enerji politikaları, enerji altyapısı üzerinde ek yükler oluşturmakta ve özellikle alçak gerilim seviyelerinde izleme-kontrol sistemlerine olan ihtiyacı daha da artırmaktadır.



Şekil 5. Türkiye Elektrik İletim Şebekesi

Bu gelişmelere ek olarak, Türkiye'de elektrikli araçlar ve teknolojik cihazların üretimi, yaygınlaştırılması amacıyla siyasi politika izlenmektedir. Bu politikanın enerji sektörüne getireceği yük ve faz açısı problemlerinden dolayı izleme-kontrol sistemleri daha önemli hale gelecektir. Alçak gerilim seviyesinde (<=0,4 kV) yaşanacak olan bir arıza orta gerilime geçebilir ve zamanında müdahale edilmediğinde yüksek gerilim seviyesinde arızaya sebep olabilecektir. Arızaların önüne geçebilmek büyük önem arz etmektedir. Alçak gerilim panolarından ve prizlerden gerilim, akım verilerinin ölçülmesi, enerji açma/kapama müdahalesini sağlayacak cihaz geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sistemin devreye alınabilmesi için veri yoğunluğunu kaldırabilecek ve yüksek hızla veri atabilecek bir haberleşme yapısı olmalıdır. Şartları sağlayan haberleşme yapısı da 5G ile gelmektedir. Alçak gerilim seviyesi izlenebilir ve kontrol edilebilir olması, enerji arz talep probleminin çözülmesi amacıyla hangi noktalara enerji depolama sistemleri yapılması gerektiği, hangi noktalarda şebeke yatırımları yapılmasını gerektiği konularında da yol gösterici olacaktır.



Şekil 6. Alçak Gerilim Şebekesi

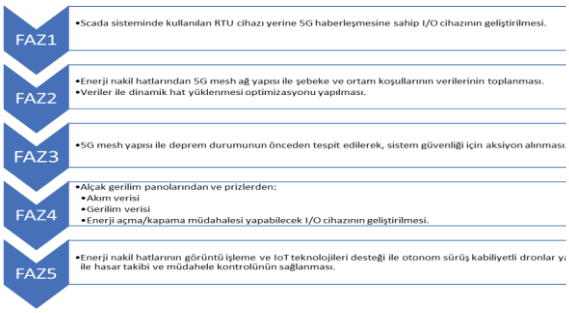
Mevcut şebeke durumu göz önüne alındığında, proje kapsamında hem akademik hem de sektörel açıdan önemli boşlukların doldurulması amaçlanmaktadır. Akademik olarak, alçak ve orta gerilim düzeylerinde gerçek zamanlı veri toplama, haberleşme altyapısının optimizasyonu ve bu verilerin yapay zekâ tabanlı kestirimci bakım sistemlerine aktarılması konularında literatürde sınırlı sayıda uygulamalı çalışma bulunmaktadır.

Geliştirieln proje ile bu alandaki bilimsel eksikliklerin giderilmesi ve özgün yazılım-donanım çözümleriyle desteklenmesi hedeflenmektedir. Sektörel açıdan ise, Türkiye'de henüz yaygınlaşmamış olan alçak gerilim izleme sistemlerinin geliştirilmesi, bu sistemlerin 5G teknolojisi ile bütünleştirilmesi ve enerji altyapısının dijital dönüşümüne katkı sağlanması öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Bu sayede hem enerji güvenliği artırılacak hem de gelecekte yapılacak olan şebeke yatırımlarının verilere dayalı, sürdürülebilir bir şekilde planlanmasına olanak tanınacaktır.

Sonuç olarak, Türkiye'de mevcut elektrik şebekesi yapısının güvenli, verimli ve sürdürülebilir şekilde işletilebilmesi için izleme, haberleşme ve kontrol altyapılarının 5G gibi yeni nesil teknolojilerle desteklenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu teknolojik dönüşüm; enerji talebi güvenliği, arıza yönetimi, yatırım planlaması ve dijital enerji altyapılarının oluşturulması yönünde atılması hedeflenen kritik bir adımdır.

3.PROJE PLANLAMASI

5G haberleşme altyapısının diğer sektörlere getirmiş olduğu verimlilik, sürdürebilirlik ve etkileri dikkate alındığında enerji sektöründe istenilen özelliklere sahip olduğu gözükmektedir. Enerji sektöründe dönüşümü sağlamak için en kritik noktalardaki ihtiyaçları dikkate alarak projemizi oluşturulmaktadır. Geniş kapsamlı ve büyük alanlara etki edeceğinden projemiz 5 fazlı olarak planlanılmaktadır. Fazların detayları şekilde verilmektedir.



Şekil 7. Proje Fazları

RTU'lar SCADA sistemlerinde uzun yıllardır stabil ve güvenilir veri toplama birimleri olarak kullanılmaktadır 5G destekli I/O cihazları ise gerçek zamanlı, yüksek bant genişliğine sahip, çok sayıda cihazı destekleyen, kablosuz ve esnek altyapıları sayesinde geleceğin akıllı şebeke ve endüstri 4.0 uygulamaları için ideal çözümler sunmaktadır.

Proje fazlarının tamamlanması ile Türkiye elektrik sisteminde sahadaki verilerin IoT teknolojisi ve Endüstri 4.0'a uygun olarak alınması, yeni teknolojilere uyumlu olacak cihaz tasarımlarının ve yazılımlarının yapılması, enerji sisteminin en uç noktaya kadar izlenebilmesi, uzaktan müdahale edilmesi, arızaların ve işgücünün öngörülebilir olması, risk tabanlı değerlendirme ile yatırımların minimize edilmesi, milli ve yerli bir sistem oluşturulması ile siber saldırı ve güvenlik açığı oluşmasının engellenmesi hedeflenmektedir.

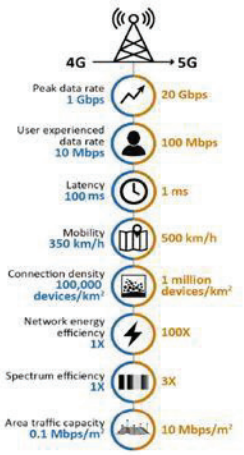
Enerji nakil hatları ve şebeke altyapısında gerçek zamanlı izleme ve kontrol için 5G tabanlı mesh ağ mimarisi kullanılması hedeflenmektedir. Bu yapı, dağıtık sensörlerden (akım, gerilim, sıcaklık, titreşim) toplanan verilerin ≤1 ms gecikme ile merkeze iletilmesini sağlamakta olup dinamik hat yüklenmesi optimizasyonu ile termal limit kontrolü gibi algoritmalarda kullanılmaktadır Ayrıca, sismik sensörlerle entegre edilen sistem, deprem erken uyarısı ve otomatik koruma işlevleriyle kritik altyapı güvenliğini destekler niteliktedir. Alçak gerilim seviyesinde geliştirilen gömülü sistem tabanlı I/O cihazları, 5G'nin URLLC profili üzerinden MQTT/CoAP protokolleriyle haberleşerek, uzaktan enerji açma/kapama kontrolü sağlamaktadır. Hasar tespiti için görüntü işleme ve otonom sistemler, 5G bağlantısı ile anlık veri aktarımı yaparak hızlı müdahale planlamasına katkı sunmkatadır. Böylece şebeke güvenliği, esnekliği ve bakım etkinliği önemli ölçüde artırılmkatadır.

4. YÖNTEM

Elektrik iletim ve dağıtım kuruluşları yalnızca izleme ve kontrol işlevlerini değil, aynı zamanda sistem güvenilirliğini artırma ve operasyonel verimliliği maksimize etme potansiyeline sahip, gelişmiş haberleşme altyapılarına yönelmektedir. Kriterler dikkate alındığında aşağıdaki üç yeni haberleşme teknolojisinin öne çıktığı görülmektedir.

- 5G
- NB-IoT
- Wifi-6

5G, kablosuz ağların hızını ve yanıt verebilirliğini büyük ölçüde artırmak için tasarlanmış hücresel teknolojinin geldiği en son seviyedir. 5G ile kablosuz geniş bant bağlantıları üzerinden iletilen veriler, bazı tahminler ile saniyede 20 gigabit (Gbps) kadar yüksek potansiyel hızları ile multigigabit hızlarda hareket edebilir. Bu özellik ile yüksek çözünürlüklü içeriklere çok daha hızlı erişmemize imkân sağlanıyor olacaktır. 5G teknolojisinin barındırdığı bir diğer özellik ise gecikme süresinin 1 milisaniyenin altına indirgenmesidir. Günümüz teknolojisindeki 4G ortalama olarak 100 milisaniye gecikme süresine sahiptir. 5G tümüyle real-time uygulamalarında fark yaratan teknolojidir. Bir diğer kazandırılan özellik ise yüksek bağlantı sayısıdır. Bağlantı sayısının yüksekliği verimi de etkiliyor olacaktır. Yani bağlantı sayısı ne kadar çok arttırabilirse o alanda o kadar çok IoT uygulaması yapılabilecektir.5G ile hedef kilometrekare başına yüz binlerce cihaz nitelendirilmektedir. Bu özellikleri sayesinde PIoT ağında kullanılacak temel haberleşme sistemi olacaktır. 5G mimarisi akıllı yazılımlar ve "sanal" donanımları temel alır. Verileriniz, güvenliği ihlal edilebilecek özel donanımlar yerine gerektiğinde hızla taşınabilen veya değiştirilebilen sanal hub'lar ve anahtarlar aracılığıyla yönlendirilir.



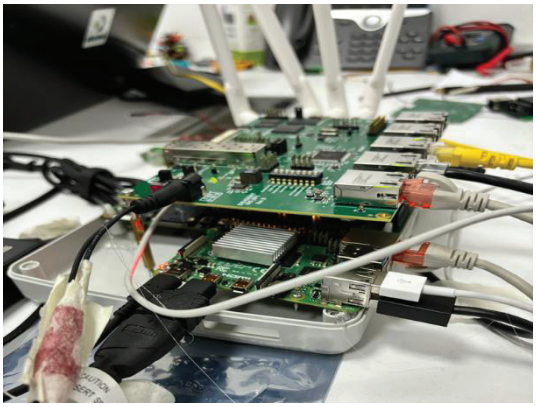
Şekil 12. 4G ile 5G Karşılaştırması

Literatür incelendiğinde, geliştirilen cihazla doğrudan ilişkili birkaç çalışma bulunmaktadır. ArXiv'deki çalışmada, 5G destekli yapay zekâ tabanlı yöntemlerle şebeke verilerinin gerçek zamanlı toplanabildiği ve gecikmelerin azaltılabildiği gösterilmiştir. Grafik sinir ağları ile klasik modeller karşılaştırılarak 5G'nin şebeke stabilitesine katkısı analiz edilmiştir. Öte yandan, Applied & Computational Engineering kaynaklı bir derlemede veri güvenliği ve büyük veri analitiği gibi alanlarda önemli açıklar bulunduğu vurgulanmaktadır. Bu durum, alçak gerilim düzeyinde gerçek zamanlı izleme için kritik bir engeldir.

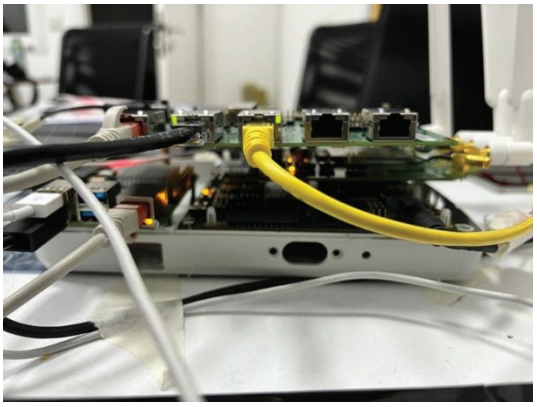
5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Türkiye'deki enerji iletim ve dağıtım şebekesinin mevcut durumu analiz edilmiş ve özellikle alçak gerilim seviyelerinde izleme ve kontrol sistemlerinin yetersizliği ortaya konmuştur. Gerçek zamanlı veri toplama, kestirimci bakım ve uzaktan müdahale gibi uygulamaların etkin biçimde gerçekleştirilebilmesi için, 5G tabanlı mesh ağ mimarisinin sunduğu yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi ve çoklu cihaz desteği gibi avantajlardan yararlanılması gerektiği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, alçak gerilim panoları ve priz noktalarından akım-gerilim verisi toplayabilen, enerji açma/kapama işlemlerini uzaktan gerçekleştirebilen gömülü sistem tabanlı I/O cihazları geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Geliştirilen sistemin fonksiyonel doğrulaması ilk olarak ofis ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında, cihazın 5 adet Ethernet ve 1 adet fiber girişinden oluşan donanım altyapısı ile 5G bağlantısı üzerinden ulaştığı indirme hızı 65 Mbps, yükleme hızı ise 20 Mbps olarak ölçülmüştür. Bu değerler, cihazın yüksek hızlı ve düşük gecikmeli iletişim performansını başarıyla sağladığını göstermektedir.



Şekil 8. Cihaz Ofis Testi-1



Şekil 9. Cihaz Ofis Testi-2

Ofis testlerinin ardından, saha uygulamasına geçilmiş ve GDZ EDAŞ iş birliğiyle İzmir ili Selçuk ilçesindeki TOKİ konutları bölgesinde yer alan, veri alımında sıklıkla sorun yaşanan bir dağıtım merkezine cihaz kurulumu gerçekleştirilmiştir. Saha testi kapsamında cihazın çevresel koşullara adaptasyonu, veri iletim kararlılığı ve uzaktan kontrol işlevleri başarıyla test edilmiştir. Sistem, hat yüklenme optimizasyonu, çevresel koşulların anlık takibi ve afet öncesi koruma senaryoları gibi kritik işlevleri başarıyla yerine getirmesi hedeflenmektedir.



Şekil 10. Cihaz Saha Testi-1



Şekil 11. Cihaz Saha Testi-2

Bu bulgular, geliştirilen 5G tabanlı sistemin enerji şebekesinin dijitalleşme sürecine önemli katkılar sağlayabileceğini ve gelecekteki akıllı şebeke mimarilerine geçişte temel bir yapı taşı olabileceğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalar kapsamında, sistemin farklı iklim ve coğrafi koşullarda test edilmesi, yapay zekâ tabanlı kestirimci bakım algoritmalarıyla entegrasyonu ve enerji depolama sistemleri ile mikroşebeke yönetimi gibi gelişmiş uygulamalarla desteklenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, kullanıcı taraflı enerji yönetimi, blokzincir tabanlı veri güvenliği ve sürdürülebilirlik odaklı optimizasyon konularında da çalışmalar planlanmaktadır.

Projenin, 2022 yılında EPDK Ar-Ge Projeleri kapsamında onaylanmış olması, geliştirilen çözümün ulusal düzeyde yaygınlaştırılabilirliğini artırmaktadır. Bu kapsamda, sistemin başarılı saha uygulamaları doğrultusunda ticarileştirilmesi ve EPDK tarafından desteklenen diğer dağıtım şirketlerine önerilmesi hedeflenmektedir. Böylece Türkiye genelinde enerji altyapısının dijital dönüşümüne katkı sağlayacak ölçeklenebilir, güvenli ve yenilikçi bir teknoloji çözümü ortaya konmuş olacaktır.

6. KAYNAKÇA

[1] O. Kundacina, M. Forcan, M. Cosovic, D. Raca, M. Dzaferagic, D. Miskovic, M. Maksimovic ve D. Vukobratovic, "Near Real-Time Distributed State Estimation via AI/ML-Empowered 5G Networks," *arXiv preprint* arXiv:2207.11117, Tem. 2022.

[2] H. Liao, "5G technology to help the development of smart grids: A review," *Applied and Computational Engineering*, cilt 6, s. 467–474, 2023.

[3] 5G PPP, https://5g-ppp.eu/wpcontent/uploads/2014/02/Advanced-5GNetworkInfrastructure-PPP-inH2020_Final_November-2013.pdf, 2013,

[4] 5G Network Slicing Enabling the Smart Grid, https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/News/5g-networkslicing-enabling-the-smart-grid.pdf

SÜPER HÜCRE TABANLI OPTİMAL DAĞITIM TRAFOSU KONUMLANDIRMA YAKLAŞIMI VE UYGULAMA SENARYOSU

Vural BAYRAKLI[1], Burak ÖZSOY[1], Arda SARI[1], Benhür SATIR[1], Fatma Nur VURGEÇ[2]

Rabia Nur KALEM[2], Tuğba Nur TAŞDEMİR ÖZDEMİR[2], Selen KILIÇ AKGÜN[3]

vural.bayrakli@mrc-tr.com, burak.ozsoy@mrc-tr.com, arda.sari@mrc-tr.com, benhur.satir@mrc.tr.com, fatma.coskun@gdzelektrik.com.tr, tugbanur.tasdemir@gdzelektrik.com.tr, rabianur.kalem@gdzelektrik.com.tr, selen.akgun@oedas.com.tr,

[1]MRC Türkiye

[2]GDZ Elektrik Dağıtım A.Ş.

[3]Osmangazi Elektrik Dağıtım A.Ş.

ÖZET

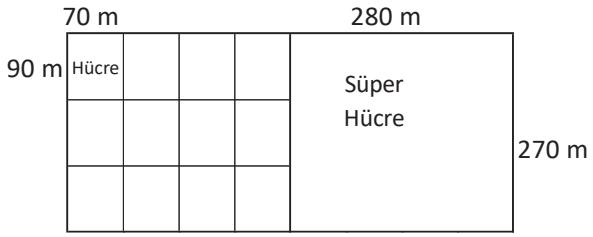
Elektrik dağıtım şebekelerinde artan enerji talebi, kentsel büyüme ve karmaşık yük profilleri, geleneksel trafo planlama yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu çalışma, yük artışlarını dikey (mevcut abone tüketim artışı) ve yatay (yeni abone kaynaklı talep artışı) bileşenlerine ayırarak noktasal yükler için özel değerlendirme adımları tanımlayan Süper Hücre Tabanlı Optimal Dağıtım Trafosu Konumlandırma (ODTK) yaklaşımını ortaya koymaktadır. Kullanılan Süper Hücre (SH) yapısı, hücre bazlı yüksek çözünürlüklü verinin komşuluk ilişkilerini gözeterek daha makul işlem maliyetiyle analiz edilmesini sağlamaktadır. Örnek uygulama, gerçek bir şehir bölgesinde yaklaşık 18.000 hücre (~10–50 km²) için planlanmış ve 10 yıllık proje horizonu boyunca binin üzerinde trafo adayı değerlendirilmiştir. Modülden elde edilen çıktılar, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) tabanlı GeoJSON formatında sunulmakta ve karar destek mekanizmalarına entegre edilebilmektedir. Literatürde sıkça kullanılan genetik algoritma (GA) ve karma optimizasyon yaklaşımlarına kıyasla, bu yöntem CAPEX (Sermaye Harcamaları) verimliliği, sahaya uyarlanabilirlik ve veri çözünürlüğü açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, mevcut trafoların verimliliğinin artırıldığını, yeni trafo yerleşimlerinin imar planına uyumlu ve önceliklendirilmiş şekilde optimize edildiğini göstermektedir. Bu çalışma, EPDK Ar-Ge programı tarafından 2023 Ocak Döneminde desteklenmiş "*Jeo-Uzamsal Talep Tahmini Yazılımı (SLF: Spatial Load Forecasting Tool)*" projesi kapsamında geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimler: Dağıtım Trafosu Planlaması; Süper Hücre; CBS; Yük Ayrıştırması; CAPEX; Noktasal Yük; Karar Destek

1. Giriş ve Amaç

Elektrik dağıtım şebekelerinde artan enerji talebi, tüketici profillerindeki değişim ve kentsel gelişim dinamikleri, dağıtım trafosu planlamasının hem teknik hem de mekânsal boyutlarda yeniden ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Mevcut planlama yaklaşımlarında, trafo yer seçimi ve kapasite belirleme süreçleri genellikle mevcut yüklenme oranlarına veya geçmiş yıllara ait büyüme trendlerine dayalı olarak yürütülmektedir. Bu tür yaklaşımlar, özellikle hücresel düzeydeki tüketim çeşitliliği ve alan kısıtları göz önüne alındığında, geleceğe dönük senaryoları yetersiz bir doğrulukla temsil etmekte ve yatırım etkinliğini sınırlamaktadır. Bu çalışmada, klasik planlama yöntemlerinin ötesine geçen ve yük artışlarını hem yatay (abone sayısı artışı) hem de dikey (mevcut abonelerdeki tüketim artışı) olarak ayrı ayrı ele alabilen bir dağıtım trafosu planlama yaklaşımı sunulmaktadır. Bu yeni

yaklaşımın temelinde, Şekil 1'de gösterildiği üzere, 70x90 metre boyutundaki hücrelerden türetilen ve yaklaşık 280x270 metre büyüklüğünde alanı kapsayan **Süper Hücre (SH)** kavramı yer almaktadır. Süper hücreler, coğrafi olarak birbirine komşu yük kümelerini algoritmik olarak gruplamakta ve bu sayede hem yük dağılımı hem de trafo konumlandırma kararları daha doğru ve tutarlı biçimde alınabilmektedir.



Şekil 1: Hücre ve Süper Hücre ilişkisi

Geliştirilen yöntem, gerçek bir bölgeye uygulanarak test edilmiş ve sonuçlar, yıllar içerisinde değişen yük profiline bağlı olarak yeni trafoların nerede, ne zaman ve hangi kapasitede kurulması gerektiğini optimize edecek şekilde raporlanmıştır. Aynı zamanda mevcut trafoların kullanım oranlarını iyileştirmek amacıyla kapasite yükseltme kararı gereken noktalar da belirlenmiştir. Böylece, hem CAPEX verimliliği artırılmış hem de şebeke yatırım kararlarında CBS tabanlı karar destek sistemi işlevi görecek bir yapının temeli atılmıştır.

2. Literatür ve Mevcut Yöntemlerin Değerlendirmesi

Dağıtım trafosu planlaması, elektrik şebekelerinin en temel yatırım kalemlerinden biri olup uzun vadeli sistem güvenilirliği, hizmet sürekliliği ve yatırım verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde bu alanda geliştirilen yöntemler genel olarak iki ana grupta incelenir: (i) yük yoğunluğu ve mesafe temelli sezgisel yer seçimi yaklaşımları ve (ii) optimizasyon temelli matematiksel modeller. Sezgisel yöntemler, genelde geçmiş yıllardaki yük verileri, abone yoğunluğu ve coğrafi uygunluk gibi basit kriterlere dayanarak mevcut trafolardaki yüklenme oranlarının belirli bir sınırı (%70–80) aşıp aşmadığına göre kapasite artışı veya yeni trafo tesisi kararı verir. Ancak bu tür yaklaşımlar yük artışlarının mekânsal dağılımını detaylı modelleyemez, tüketim artışını yatay ve dikey bileşenlere ayıramaz ve imar planı kısıtları ile mülkiyet tiplerini çoğunlukla göz ardı eder. Buna karşılık optimizasyon temelli çalışmalarda matematiksel programlama, kısıtlı kaynak tahsisi veya genetik algoritma (GA) gibi yöntemler öne çıkmakta, bu modeller genelde enerji kaybı, yatırım maliyeti ve hizmet alanı gibi unsurları çok kriterli biçimde optimize etmeye çalışmaktadır (Ravi & Suma, 2016; El-Hawary & El-Hawary, 2018). Dinamik programlama temelli bazı çalışmalar yük karakteristiklerini esas alarak deterministik planlama önerileri sunmakta, özellikle pik talepler doğrultusunda kapasite tahsisleri yapmaktadır (Miranda, Proenca & Matos, 2012). Bunun yanında, trafo yaşını, risk profilini ve bakım maliyetlerini bir arada ele alan, kayıp-maliyet dengesini değerlendiren daha gelişmiş çok kriterli yaklaşımlar da literatürde yer almaktadır (Acharya, Mahat & Mithulananthan, 2006; Al-Hamouz & Al-Hamouz, 2013). Son dönemde genetik algoritmaların deterministik modellerle birleştirildiği hibrit optimizasyonlar da önerilmiş ve teorik doğruluklarını kanıtlamıştır (Wang & Nehrir, 2006; Sumathi & Balamurugan, 2019). Ancak bu çalışmaların pek çoğu genelde IEEE test sistemleri veya küçük pilot bölgeler üzerinde (1–5 km², 5–50 trafo, şebeke düğüm bazlı) sınırlı çözünürlükte kurgulanmakta; imar planı, mülkiyet durumu, sosyal kısıtlar ve gerçek CBS katmanları gibi saha detaylarını kapsamamaktadır. (Hajiaghapour Moghimi & Rezaei, 2018). Bu fark Tablo 1'de de özetlenmektedir.

Tablo 1: Literatür Kıyaslaması

Kaynak	Trafo Sayısı	Süre	Çözünürlük	Alan	Yük Ayrıştırma	Veri Katmanı
Bu Çalışma (ODTK)	1000+	10+ yıl	~18.000 hücre + SH	10–50 km²	Var	İmar, mülkiyet, tip
Wang & Nehrir (2006)	5–20	Tek dönem	~30 nod	~1–2 km²	Yok	Yok
Miranda et al. (2012)	10–20	Tek dönem	~30–60 nod	Test sistemi	Yok	Yok
Acharya et al. (2006)	5–50	Tek dönem	~30–69 nod	~1–2 km²	Yok	Yok
Sumathi & Balamurugan (2019)	10–30	Tek dönem	Düğüm bazlı	Küçük şebeke	Yok	Yok
Ravi & Suma (2016)	10–30	Tek dönem	Düğüm bazlı	Küçük şebeke	Yok	Yok
El-Hawary & El-Hawary (2018)	10–20	Tek dönem	Düğüm bazlı	Test sistemi	Yok	Yok
Al-Hamouz & Al-Hamouz (2013)	5–20	Tek dönem	Düğüm bazlı	Test sistemi	Yok	Yok
Hajiaghapour Moghimi & Rezaei (2018)	20–50	5–10 yıl	Yer seçimi	2–5 km²	Kısmen	Temel

Buna karşın sunulan Süper Hücre temelli yaklaşım, problem ölçeği, mekânsal çözünürlük ve planlama süresi bakımından literatürdeki örneklerin ötesine geçmekte; hücre-süper hücre ayrımı, dikey-yatay yük ayrıştırması, noktasal yüklerin ayrı yönetimi ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) tabanlı çıktılarla imar planı uyumluluğunu ve **CAPEX (Sermaye Harcamaları)** verimliliğini destekleyen uygulanabilir bir karar destek yapısı sunmaktadır. Bu yöntem, EPDK Ar-Ge programı kapsamında yürütülen "Jeo-Uzamsal Talep Tahmini Yazılımı (SLF: Spatial Load Forecasting Tool)" projesi çıktısı olarak geliştirilmiştir.

3. Yöntem: Süper Hücre Tabanlı Konumlandırma Yaklaşımı

Bu çalışmada geliştirilen konumlandırma yaklaşımı, yük yoğunluğu yüksekliği, trafo boş kapasitesi, fiziksel uygunluk, imar planı verisi ve yatırım sıralamasını birlikte ele alan bütüncül bir yapıya sahiptir. Yaklaşım, hem mevcut trafoların kullanım verimliliğini artırmayı hem de yeni kurulacak trafoların konum ve kapasite seçimlerini optimize etmeyi hedeflemektedir. Temel olarak üç ana bileşene dayanmaktadır: Hücre-Süper Hücre tanımı, Yük Artış Ayrıştırması ve Skor Tabanlı Yük Dağıtımı.

3.1. Hücre ve Süper Hücre Tanımı

Tüm çalışma alanı, 70x90 metre boyutunda hücrelere ayrılmıştır. Bu hücreler, CBS ortamında planlama ve hesaplamalar için temel birimdir. Ancak bu çözünürlükte çalışmak hem işlem süresi hem de kaynak kullanımı açısından oldukça yüksek maliyetlidir. Bu nedenle, yatayda 4, dikeyde 3 hücre birleşimiyle oluşan ve yaklaşık 280x270 metre boyutunda olan Süper Hücre (SH) yapısı tanımlanmıştır. Süper hücreler, yüklerin mekânsal kümelenmesini sağlar ve yük-DTR eşleştirmesinde hem coğrafi yakınlığı hem de yatırım uygunluğunu dikkate alır.

3.2. Yük Artışlarının Ayrıştırılması: Dikey ve Yatay Bileşenler

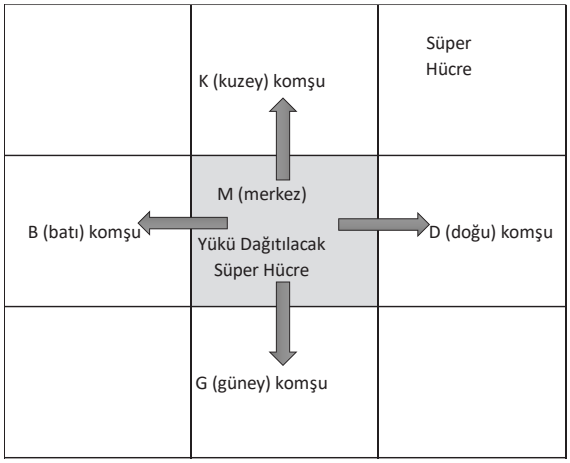
Yıllık yük değişimleri, **dikey ve yatay artış** olmak üzere ikiye ayrılmıştır:

- **Dikey Artışlar**, mevcut abonelerin tüketim seviyelerindeki değişimi temsil eder.
- **Yatay Artışlar**, yeni abone bağlantıları nedeniyle şebekeye eklenen yükleri temsil eder.

Bu ayrıştırma, özellikle **noktasal yükler** (büyük sanayi, büyük ticarethane, tarımsal sulama) için kritik önemdedir. Zira dikey artışlar mevcut özel trafoların kapasite sınırına yaklaşmasını tetiklerken, yatay artışlar yeni trafo yatırımı gerektirmektedir.

3.3. Skor Tabanlı Süper Hücre Yük Dağıtımı

Süper hücrelere düşen toplam yük artışı, Şekil 2'de görüldüğü üzere, merkez (M) ve dört komşu (K: kuzey, G: güney, D: doğu, B: batı) süper hücreye dağıtılır.



Şekil 2: Süper Hücre Yük Dağıtma Yönleri

Dağıtım, her süper hücreye ait bir skor değeri üzerinden yapılır. Bu skor, hem boş kapasiteyi hem de imar uygunluğunu dikkate alır.

Süper Hücre Skoru = *komşuluk katsayısı* *(boş kapasite * λ_1 + Rezerv Hücre Sayısı * λ_2 + Park Alanı Hücre Sayısı * λ_3 + Belediye Hizmet Alanları Hücre Sayısı * λ_4)

Buradaki λ katsayıları parametrik olarak tanımlanmakta ve kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Merkez ve komşu süper hücrelerin skorları toplanarak toplam skor elde edilir. Her bir süper hücrenin bu toplam içindeki oranı, o süper hücreye atanacak yük miktarını belirler. Bu yöntem, yalnızca teknik uygunluk değil, aynı zamanda planlama önceliği olan alanlara yönlendirme yapabilmesi açısından önemli bir esneklik sunar.

Bu yöntemle, yük artışları yalnızca fiziksel yakınlığa göre değil, aynı zamanda imar planı önceliği ve trafo yerleştirilebilirliği dikkate alınarak en uygun süper hücreye yönlendirilir. Böylece hem yatırım sıralaması optimize edilmekte, hem de trafo konumlarının gerçek hayatta uygulanabilirliği garanti altına alınmaktadır.

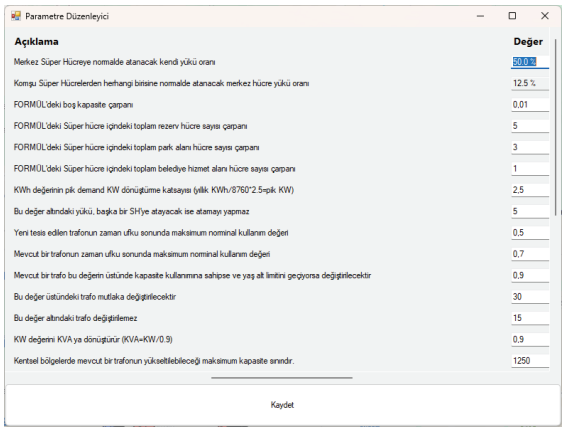
4. ODTK Modülünün Bileşenleri ve İşleyişi

Optimal Dağıtım Trafosu Konumlama (ODTK) Modülü, gerçek zamanlı veya çok yıllı planlama senaryolarında dağıtım trafolarının yer, kapasite ve zaman bazlı kararlarının alınmasını sağlayan entegre bir hesaplama yapısıdır. Geliştirilen modül, hem mevcut trafo altyapısının kullanım verimliliğini artırmayı hem de yeni yatırımları maliyet-etkin, teknik olarak uygun ve imar planına duyarlı şekilde yönlendirmeyi hedeflemektedir. ODTK, SLF (Spatial Load Forecasting) modülünden elde edilen yıllık yük artışlarını giriş olarak almakta ve bu verileri aşağıdaki temel işlem adımlarıyla değerlendirmektedir.

4.1. Girdi Parametreleri

ODTK modülü; abone tipi, bölge tipi (kentsel/kırsal), mülkiyet yapısı ve imar durumu gibi çok sayıda bileşeni dikkate alan parametrelerle çalışmaktadır. Süper Hücre Skorundaki λ katsayıları ve diğer tüm parametreler, belirli makul değerler ile

kullanıcının onayına sunulmakta ve belli aralıklar dahilinde değişikliğe izin verilmektedir. Şekil 3'te ODTK parametre değerleri tanımlama ekranı görülmektedir. Örneğin ilk sıradaki *komşuluk katsayısı* %50 olarak belirlenmiştir. Bu değeri kullanıcı en çok %100 (yük dağıtımını tamamen merkezde bırakmak) ve en az %0 (yükleri merkezde bırakmadan komşulara dağıtmak) arasında bir değer ile değiştirebilmektedir.



Şekil 3: ODTK parametre tanımekranı

ODTK' nın diğer temel girdileri şunlardır:

- Hücre bazında yıllık toplam tüketim (kWh) ve pik yük (kW)
- Dikey ve yatay yük artışları
- Mevcut trafoların kapasite, yüklenme (%) ve yaş bilgileri
- Trafo tipi (bina tipi / direk üstü) ve mülkiyeti (kurum / özel)
- İmar tipi (REZERV, PARK, BELEDİYE HİZMET ALANI, UYGUN OLMAYAN)

Özellikle REZERV alanlar, yeni trafolar için öncelikli olarak değerlendirilmekte, ardından PARK ve BELEDİYE HİZMET ALANI alanları sırasıyla tercih edilmektedir. Uygun olmayan alanlara trafo konulmasına izin verilmemektedir.

4.2. İşlem Fonksiyonları

ODTK algoritması, ardışık şekilde çalışan yedi ana fonksiyondan oluşur. Her biri belirli bir hedefe yönelik çalışır ve kendi çıktısını bir sonraki adıma aktarır.

Fonksiyon 1 - Süper Hücre (SH) Yükü Dağıtma: SLF'den gelen yatay ve dikey yük artışları, süper hücre bazında toplanır ve skor tabanlı yöntemle merkez ve 4 komşuya dağıtılır.

Fonksiyon 2 - Özel DTR Atama: Noktasal yükler (büyük sanayi, büyük ticarethane, tarımsal sulama) için yalnızca bulundukları hücrede trafo tesis edilmesine yönelik hesaplamalar yapılır.

Fonksiyon 3 - Mevcut DTR'lara Yük Dağıtımı: Süper hücre bazında gelen yük artışları, o bölgede bulunan mevcut kurum DTR' larının boş kapasitelerine, yıllara yayılarak dağıtılır. Atanamayan yükler tespit edilir.

Fonksiyon 4 - DTR Yükseltme: Boş kapasitesi yetersiz olan ancak yaşı ve tipi uygunsa, mevcut DTR' lar 1250 kVA' ya kadar yükseltilir. İlk olarak en büyük kapasite denenir, sonra gerektiği kadar düşülerek en düşük yeterli kapasite bulunur.

Fonksiyon 5 - Yeni DTR Tesis Etme: Fonksiyon-4 ile de karşılanamayan yükler için, süper hücredeki uygun hücrelere yeni DTR yerleştirilir. Öncelik sırasına göre REZERV > PARK > BELEDİYE hücreleri değerlendirilir. 1600 kVA'dan 630 kVA'ya kadar farklı bina tipi kapasiteler denenir.

Fonksiyon 6 - Yeri Belirsiz DTR Oluşturma: Fonksiyon-5 sonrasında hâlen karşılanamayan yük kalmışsa, DTR'nin konumu netleştirilemeyen yükler raporlanır.

Fonksiyon 7 - Trafosu %1'in altında çalışanları kapatma: Planlama horizonu sonunda düşük yüklenmeli trafolar kapatılır, yükleri tekrar dağıtılmak üzere sisteme dahil edilir.

4.3. Yinelemeli (İteratif) Yapı

ODTK modülü yukarıdaki fonksiyonları sabit sırayla ancak **yinelemeli (iteratif)** biçimde çalıştırır.

- **İterasyon 1**: Süper hücre yük dağıtımı ve mevcut kapasite kullanımı
- **İterasyon 2**: Yükseltme sonrası yeniden dağıtım
- **İterasyon 3**: Yeni trafo tesisleri sonrası yeniden değerlendirme

Bu yapı sayesinde karar zinciri güncel skorlarla tekrar beslenir, daha verimli ve optimal sonuçlar elde edilir.

4.4. Çıktılar ve Arayüz

ODTK modülünün çıktıları, GeoJSON tabanlı veri formatında kullanıcıya sunulur ve CBS tabanlı arayüzde görselleştirilir. Arayüzde aşağıdaki filtreleme opsiyonları mevcuttur:

- Trafo Durumu: Mevcut / Kapasite Artan / Yeni
- Trafo Mülkiyeti: Kurum / Özel
- Yıl Bilgisi: Planlama horizonu içindeki her yıl için

Kullanıcı, istenilen yıl, sahiplik ve durum kombinasyonunu seçerek sistemdeki trafoları harita üzerinden inceleyebilir ve çıktılarını .png veya .pdf formatında alabilir.

5. Uygulama Senaryosu ve Bulgular

Geliştirilen Süper Hücre Tabanlı ODTK yaklaşımı, Türkiye'de orta büyüklükte bir şehir için hazırlanan dağıtım şebekesi master planı kapsamında sahaya uygulanmıştır. Uygulama alanı hem kentsel hem de kırsal bölgeleri içerecek şekilde seçilmiş; bu sayede hem yüksek yoğunluklu hem de düşük yoğunluklu bölgelerde algoritmanın performansı test edilmiştir. Planlama horizonu olarak 2025–2035 dönemi dikkate alınmıştır.

5.1. Veri Yapısı ve Girdi Özellikleri

Çalışma alanı 70x90 m çözünürlüğünde yaklaşık 18.000 hücreye ayrılmış, bu hücreler yatayda 4 ve dikeyde 3 birleşimi ile yaklaşık 2.000 civarında süper hücre oluşturulmuştur. SLF modülü aracılığıyla yıllık bazda hücre yük artışları (kW ve kWh) elde edilmiştir. Mevcut trafolara ait yaş, kapasite, yüklenme, tip (bina/direk üstü) ve mülkiyet bilgileri envanter dosyalarından alınmıştır. İmar planı katmanları, her hücrenin imar tipini (REZERV, PARK ALANI, BELEDİYE HİZMET ALANI, UYGUN OLMAYAN ALAN) tanımlamak üzere modüle dahil edilmiştir.

5.2. Noktasal Yüklerin Etkisi ve Özel Trafo Dağılımları

Modelin ilk adımı olan noktasal yük değerlendirmesinde, 43 adet büyük sanayi yükü, 27 adet büyük ticarethane ve 18 adet tarımsal sulama yükü tespit edilmiştir. Bu yüklerin tamamı ilgili hücrelerde özel trafolarla çözümlenmiş; mevcut özel trafoların yeterli kapasiteye sahip olmadığı durumlarda yeni özel DTR kurulumu önerilmiştir. Bu sayede noktasal yükler genel dağıtım yükü dağılımının dışına çıkarılarak hesaplama yükü azaltılmıştır.

5.3. Mevcut DTR Yükseltmeleri

Mevcut kurum trafolarında yapılan yüklenme analizleri sonucunda %70'in üzerinde yüklenmiş ve 15 yaşından büyük olan 48 adet trafo tespit edilmiştir. Bu trafoların 27 tanesi, kapasite yükseltme ile %70 altına çekilmiş, kalan 21 adedi ise maksimum 1250 kVA kapasiteye yükseltilmesine rağmen yükü karşılayamadığı için "yenisiyle değiştirilecek" olarak işaretlenmiştir.

Yükseltme kararı verilen trafolarda ortalama kapasite artışı %38 olmuş; bu yükseltmeler sayesinde planlama horizonu süresince toplam 17 MVA'lık yeni trafo tesisine gerek kalmadan mevcut altyapının kullanımı sağlanmıştır.

5.4. Yeni DTR Tesisleri

Yıllık yük artışlarının REZERV, PARK ALANI ve BELEDİYE HİZMET ALANI gibi uygun imar planı tipine sahip hücrelere dağıtılması sonucunda toplam 103 adet yeni DTR tesisi önerilmiştir. Bu trafoların %54'ü REZERV alanlara, %29'u PARK ALANI'na ve %17'si BELEDİYE HİZMET ALANI' na yerleştirilmiştir. Yeni trafoların kapasite dağılımı aşağıdaki gibidir:

- 630 kVA: %32
- 1000 kVA: %48
- 1250 kVA: %20

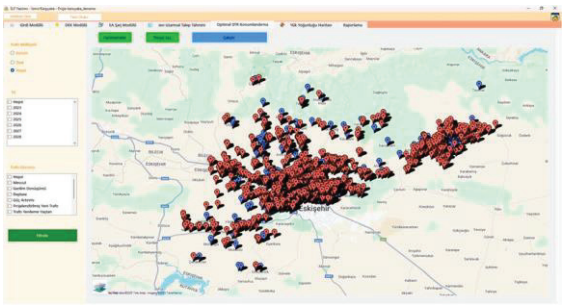
Yeni trafoların ortalama yüklenme oranı %25 olarak belirlenmiş, planlama döneminin sonunda bu oran %47'ye ulaşmıştır. Bu da, kapasitenin gereksiz yere fazla tutulmadığını ve yatırım etkinliğinin sağlandığını göstermektedir.

5.5. Coğrafi Sonuç Görselleştirmeleri

ODTK çıktıları GeoJSON formatında haritalandırılmış ve kullanıcı arayüzü üzerinde yıllara göre filtrelenebilir şekilde sunulmuştur. Aşağıdaki başlıklarda sonuçlar görselleştirilmiştir:

- Mevcut, kapasite artan ve yeni trafoların coğrafi dağılımı
- Trafo türüne göre (kurum/özel) filtrelenmiş dağılım haritası
- Her yıl için yeni tesis edilen trafoların sayısı ve kapasitesi
- Yük yoğunluğu değişimi: 2025 – 2030 – 2035 yıllarında üç katmanlı gösterim

Harita çıktılarında, yüksek yük artışı olan bölgelerde rezerv alanlara trafo yerleştirildiği, uygun alan bulunmayan bölgelerde ise park alanı ve belediye alanlarına yönelindiği açıkça gözlemlenmiştir. Şekil 4'te harita üzerinde ODTR arayüzünün görünümü verilmektedir.



Şekil 4: ODTR arayüzünde harita görünümü

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, dağıtım şebekelerinin geleceğe dönük planlanmasında kullanılmak üzere geliştirilen Süper Hücre Tabanlı Optimal Dağıtım Trafosu Konumlandırma (ODTK) yaklaşımı detaylı biçimde sunulmuş ve gerçek bir uygulama senaryosu üzerinden test edilmiştir. Geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşmayı hedefleyen bu yaklaşım, hem teknik hem de mekânsal parametreleri eşzamanlı değerlendirerek yük artışlarını en uygun trafo kapasitesi, konumu ve yılı ile karşılayacak bütünleşik bir karar yapısı sunmaktadır.

Yöntemin başlıca avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- **Yük artışlarının ayrıştırılması (dikey ve yatay)** sayesinde kapasite yükseltme ve yeni tesis kararları doğru temellere dayandırılmıştır.
- **Süper hücre yapısı**, hem hesaplama hızını artırmış hem de yük dağılımının komşuluk ilişkilerine dayalı olarak gerçekçi biçimde modellenmesini sağlamıştır.
- **Skor tabanlı yük dağıtımı**, imar planı önceliklerini (rezerv, park, belediye) dikkate alarak karar destek mekanizmasını güçlendirmiştir.
- **Noktasal yüklerin ayrı ele alınması**, özellikle büyük sanayi ve tarımsal sulama gibi özel gereksinimli yatırımların doğru

konumlandırılmasına olanak vermiştir.

- Modülün **GeoJSON tabanlı çıktılarla harita ortamında çalışabilirliği**, kullanıcı dostu bir planlama deneyimi sunarak, hem yatırımcı kurumların hem de belediyelerin karar süreçlerini hızlandırmaktadır.

Gerçek yaşamda uygulanan örnek senaryo ile; mevcut DTR'ların kullanım verimliliği artmış, gereksiz yeni yatırım ihtiyacı azalmış ve sınırlı kaynakların en uygun yerlerde kullanılmasına imkân sağlanmıştır. Özellikle yüksek maliyetli bina tipi trafoların yalnızca gerekli görülen yerlere yerleştirilmesi sayesinde CAPEX verimliliği artırılmış, yatırım zamanlaması da yıllara yayılarak optimize edilmiştir.

Sonuç olarak, Süper Hücre Tabanlı ODTK yaklaşımı, elektrik dağıtım sistemlerinde planlama kalitesini artıran, sahaya uyarlanabilirliği yüksek ve esnek yapısıyla sektöre yenilikçi bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Wang, C., & Nehrir, M. H. (2006). *Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems*. IEEE Transactions on Power Systems, 19(4), 2068–2076.

2. Miranda, V., Proenca, L. M., & Matos, M. A. (2012). *Stochastic security constrained optimal power flow: A hybrid approach*. Electric Power Systems Research, 92, 40–48.

3. Acharya, N., Mahat, P., & Mithulananthan, N. (2006). *An analytical approach for DG allocation in primary distribution network*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 28(10), 669–678.

4. Sumathi, R., & Balamurugan, S. (2019). *A review on optimal placement of distribution transformer using artificial intelligence techniques*. Asian Journal of Computer and Information Technology, 8(1), 1–6.

5. Ravi, P., & Suma, V. (2016). *Application of genetic algorithm for optimal site selection of distribution transformer site*. AIP Conference Proceedings, 1755(1), 090002.

6. El-Hawary, M. E., & El-Hawary, F. (2018). *Optimal placement and sizing of distribution transformers using particle swarm optimization*. In 2018 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON) (pp. 448–453). IEEE.

7. Al-Hamouz, Z. M., & Al-Hamouz, R. J. (2013). *A fuzzy multi-objective approach for optimal transformer allocation in distribution systems*. Arabian Journal for Science and Engineering, 38, 161–171.

8. Hajiaghapour Moghimi, M., & Rezaei, M. (2018). *A distribution transformer comprehensive optimal planning and sizing method*.

ŞEBEKE UYUMLULUK ANALİZLERİ İÇİN TİPİK BİR ELEKTRİK DEPOLAMA TESİSİNİN STATİK VE DİNAMİK MODELLEMESİ

Erdi Doğan[1], Osman Bülent Tör[2], Mahmut Erkut Cebeci[1], Muzaffer Dindar[1], Kasım Kaan Yılmaz[1]

[1] EPRA Elektrik Enerji İnş. ve Tic. Ltd. Şti., Ankara – erdi.dogan@epra.com.tr

[2] Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh., Ankara – osman.tor@hacettepe.edu.tr

Özet – ***Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) şebekedeki miktarının artışı ile birlikte elektrik depolama tesislerinin (EDT) elektrik şebekelerinde daha fazla yer almaya başlaması beklenmektedir. EDT tesislerinin şebeke entegrasyonu için birçok ülkede mevzuat çalışmaları başlamıştır. EDT'lerin şebeke entegrasyonunda dikkat edilmesi gereken teknik kriterler şebeke yönetmeliklerinde yer almaktadır. Türkiye ve birçok ülkenin şebeke yönetmeliğinde, EDT tesislerinin şebeke uyumluluğuna ve şebekedeki etkisine yönelik analizlerde kullanılmak amacıyla, EDT tesislerinin beklenen teknik kriterleri sağladığını gösteren simülasyon modelleri talep edilmektedir. Bu bildiride, tipik bir EDT tesisi için, Türkiye'nin şebeke yönetmeliğine uygun bir şekilde DIgSILENT PowerFactory yazılımı ile geliştirilmiş olan statik ve dinamik modelleme çalışması açıklanmıştır.***

I. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler tarafından belirlenen sera gazı emisyonu azaltma hedefleri ile, tüm dünyadaki ülkeler konvansiyonel fosil tabanlı güç üretiminden, başta fotovoltaik (PV) güneş ve rüzgar olmak üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) dönüşüm içerisindedir [1]. Güneş ve rüzgar tesislerinin elektrik güç üretimi meteorolojik koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu durum, yenilenebilir enerji üretim miktarına bağlı olarak elektrik şebekelerinde bazı saatlerde gerilim ve frekans dengesizliklerine, yani teknik kısıtlara neden olabilir [2]. Örneğin, tüketimin çok düşük olduğu dini bayram günlerinde YEK'e dayalı üretimin yüksek olduğu saatlerde şebeke operatörü (iletim – Türkiye'de TEİAŞ ve/veya dağıtım – Türkiye'de EDAŞ'lar), şebekedeki teknik kısıtlar nedeniyle YEK tesislerindeki üretimi kısıtlamak zorunda kalabilmektedir. Bu noktada EDT'ler tüketim yönünde önemli bir rol üstlenebilir [3]. Aynı şekilde özellikle akşam saatlerinde güneş batımına doğru PV santrallerin üretimindeki hızlı düşüş saatlerinde EDT'ler bu kez üretim yönünde şebekeye destek verebilir.

EDT'lerin şebekeye vereceği destek sadece üretim tüketim dengesizliğini gidermek ile sınırlı değildir. Devrede olan bir EDT şebekede meydana gelebilecek bir kısa devre sırasında hızlı bir şekilde reaktif güç desteği vererek şebekenin kararlılığına destek sağlayabilir [4]. Bunun için EDT'nin yakınlarda meydana gelebilecek bir şebeke arızası sırasında devreden çıkmaması ve çok hızlı bir şekilde tepki vermesi gerekir (*Low Voltage Ride Through - LVRT)* [5].

EDT'lerin şebekede gerektiği durumda teknik olarak uygun bir biçimde şebekeye destek verebilmesi için gerekli kriterler şebeke yönetmeliklerinde tanımlanır. Şebeke operatörü tarafından belirlenen bu kriterleri EDT'lerin ne ölçüde sağlayabildiği genelde iki aşamada kontrol edilir: 1) EDT simülasyon modeli ile gerçekleştirilecek olan analizler (yük akışı, kısa devre,

kararlılık, vb.); 2) EDT tesisinin şebeke bağlantısı sırasında gerçekleştirilen devreye alma testleri (*commissioning*).

ENTSO-E, Avrupa şebeke kriterleri kapsamında EDT'ler de dahil üretim tesislerinin şebeke uyumluluğu doğrulama süreçlerini standartlaştırmayı amaçlamaktadır [6]. Çalışmada test yöntemleri, model doğrulama prosedürleri ve sertifikasyon adımlarına ilişkin teknik bir çerçeve sunularak, şebekeye uyumluluk için uygulanabilir bir yol haritası ortaya konulmaktadır. ENTSO-E aynı zamanda şebeke bağlantı gerekliliklerinin doğrulanmasında elektriksel simülasyon modellerinin nasıl kullanılacağı detaylandırmaktadır [7]. Üretim tesisleri için RMS ve EMT modelleme yaklaşımları, doğrulama kriterleri ve test prosedürleri ele alınmaktadır.

Belçika'nın iletim sistemi operatörü Elia, elektrik depolama tesislerinin şebekeye bağlantısı için genel teknik gerekleri tanımlayan kapsamlı bir rehber yayınlamıştır [8]. Bu çalışmada, EDT'lerin Avrupa şebeke kodları doğrultusunda uyması gereken teknik ve operasyonel kriterler açıklanmaktadır. Reaktif güç desteği, arıza süresince şebekede kalma (fault-ride-through), frekans regülasyonuna katılım gibi konuların yanı sıra, şebekeye bağlantıdan önce gerekli olan uyumluluk testlerine de yer verilmiştir. ENTSO-E ve Elia tarafından yürütülen bu çalışmalar, Avrupa düzeyindeki düzenlemelerin ulusal bazda nasıl yorumlanıp uygulanabileceğine dair pratik bir örnek sunmakta ve hem merkezi hem de dağıtık EDT'ler için teknik bir çerçeve sağlamaktadır.

EDT simülasyon modeli sadece tesisin devreye alma testlerinde bir referans teşkil etmekle kalmaz, aynı zamanda şebeke operatörü tarafından planlama ve işletme amaçlı gerçekleştirilecek olan şebeke analizlerinde de kullanılır. Bu nedenle EDT simülasyon modelinin hazırlanması kritik bir süreçtir. Bu bildiride, tipik bir EDT'nin simülasyon modelini geliştirmek amacıyla, Türkiye'nin şebeke yönetmeliğine uygun bir şekilde DIgSILENT PowerFactory (PF) [9] yazılımı ile geliştirilmiş olan statik ve dinamik modelleme çalışması açıklanmıştır.

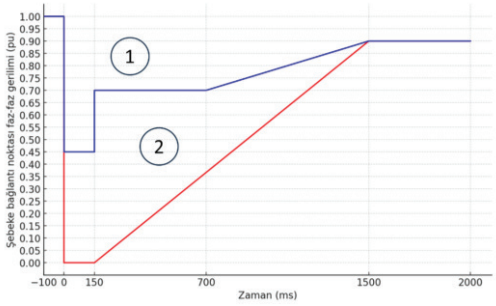
II. EDT YÖNETMELİK KRİTERLERİ

Türkiye'de EDT tesislerinin ve ünitelerinin şebekeye bağlantısı ve işletilmesi teknik kriterlere tabidir. Bu kriterler Şebeke Bağlantı ve Uyumluluk Kriterleri Yönetmeliğiinde [10] yer almaktadır. Aksi belirtilmediği sürece, iletim ve dağıtım seviyesinden bağlı 10 MW üzeri tüm EDT'ler bu teknik yükümlülüklere uymak zorundadır. Yönetmelikte geçen ve modelleme açısından kritik olan teknik kriterler aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

A. EDT'lerin Şekebekedeki Kısa Devre Arızası Sırasında Sisteme Katkısı (*LVRT*)

EDT'ler şebekede meydana gelebilecek bir kısa devre arıza sırasında şebeke bağlantı noktasındaki faz-faz gerilim değerlerinin Şekil 1'de belirlenen sınırlar içinde kalması durumunda şebekeye bağlı kalmaya devam etmelidir. Ayrıca;

- EDT aktif gücü, saniyede en az nominal aktif gücünün; 1. Bölgede %20'si, 2. Bölgese ise %5'i oranında artarak, arıza öncesi seviyeye ulaşmalıdır.
- Arıza koşullarında her bir invertör, geçici rejim anma değerlerini aşmaksızın nominal akımın %100'üne kadar reaktif güç desteği sağlayabilmelidir.
- Bu destek, 60 ms içinde %10 hata payı dahilinde en yüksek değere ulaşmalı ve gerekirse 1.5 saniye süreyle devam ettirilebilmelidir.



Şekil 1 İletim veya Dağıtım Sistemi Bağlantı Noktasındaki Şebeke Faz-Faz Gerilimi [7]

B. Aktif Güç Kontrolü

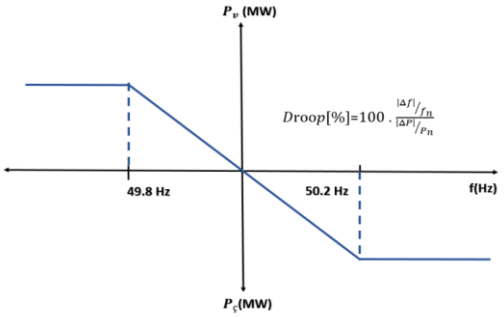
EDT'lerin aktif güçleri TEİAŞ tarafından gönderilecek sinyallerle, o anki aktif güç ile emreamade güç arasında otomatik olarak ve aşağıdaki kritelere uygun şekilde kontrol edilebilmelidir:

- Sistemden enerji çeker konumdan sisteme enerji verir konuma (ve tersi) 2 saniye içinde geçebilmelidir.
- 0 MW'tan kurulu gücüne ulaşacak şekilde sisteme veriş veya sistemden çekiş 1 saniye içinde olmalıdır.
- Aktif güç kontrol hassasiyeti en az ±1 MW veya kurulu gücün ±%1'i kadar doğrulukta olmalıdır.
- EDT devreye alındığında, bağlantı noktasındaki gerilimde %3'ten fazla dalgalanma oluşturmamalıdır.

C. Frekans Kontrolü

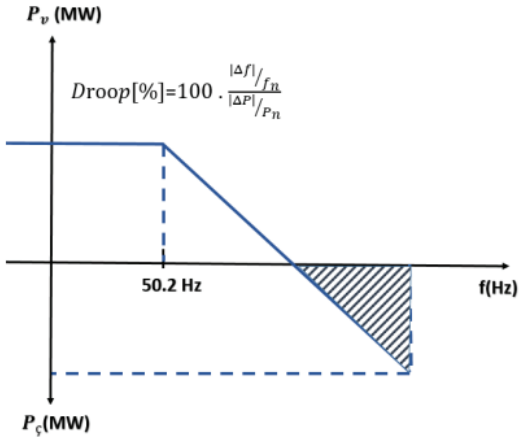
Yan hizmetler kapsamında sağlanan frekans kontrolü ile ilgili tanımlanmış olan teknik kriterler:

- *Droop* değeri en fazla %8 olmalıdır.
- EDT'lerin frekans değişimlerine bağlı olarak enerji çekiş ve veriş modları arasında otomatik geçiş yapabilmelidir.
- Frekans kontrol ölü bandı, 0–0.2 Hz aralığında, maksimum 0.01 Hz adımlarla ayarlanabilir olmalıdır.
- İletim sistemine bağlı ve 30 MW ve üzeri kurulu güce sahip EDT'ler, frekans değişimine karşı aktif güç çıkışlarını lineer bir şekilde ayarlayabilmelidir (Şekil 2).



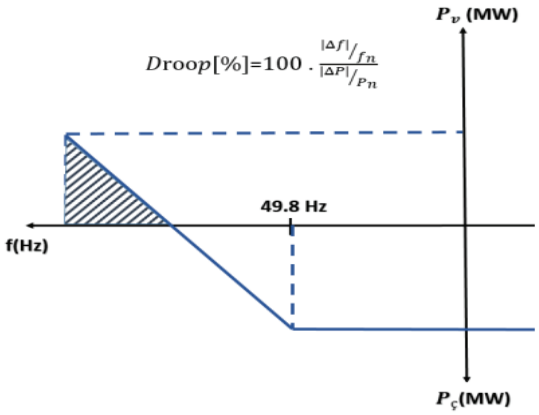
Şekil 2 Frekans Hassasiyet Kontrolü [7]

- EDT'ler şebeke frekansının 50.2 Hz'in üzerine çıkması durumunda, aktif güç çıkışlarını frekansın lineer bir fonksiyonu olarak ayarlayabilmelidir. Şekil 3'te gösterildiği gibi veriş modunda şebekeye verdikleri aktif gücü lineer olarak azaltabilmeli ve gerekiyorsa maksimum çekiş pozisyonuna geçebilmelidir. Çekiş modunda ise şebekeden çektikleri aktif gücü lineer olarak kurulu güçlerine kadar artırabilmelidir.
- 50.2 Hz'in üzerindeki frekans artışlarında EDT'ler en geç 2 saniye içinde tepki vermelidir. Şekil 4'te tarif edildiği gibi çekiş modundayken, bu tepki tam şarja ulaşılana kadar, kurulu gücü aşmayacak şekilde sürdürülmelidir.
- İletim sistemine bağlı ve 30 MW ve üzeri kurulu güce sahip EDT, şebeke frekansının 49.8 Hz'in altına düşmesi durumunda, aktif güç çıkışlarını frekansın lineer bir fonksiyonu olarak değiştirebilmelidir. Çekiş modunda şebekeden çektikleri aktif gücü azaltabilmeli ve gerekiyorsa maksimum veriş moduna geçebilmelidir. Veriş modunda şebekeye verdikleri aktif gücü kurulu gücüne kadar artırabilmelidir.



Şekil 3 Yüksek Frekans Hassasiyeti [7]

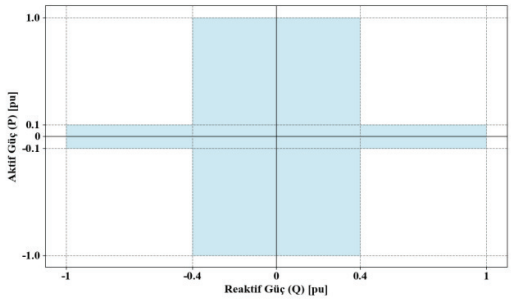
- 49.8 Hz'in altındaki frekans düşüşlerine karşı EDT'ler en geç 2 saniye içinde tepki verebilmelidir. Veriş modundayken, tam deşarja ulaşılana kadar, kurulu gücü aşmadan sürdürülmelidir.



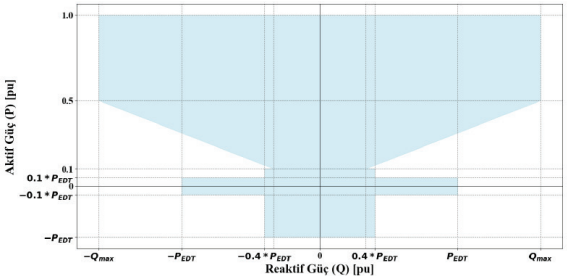
Şekil 4 Düşük Frekans Hassasiyeti [7]

D. Reaktif Güç Kapasitesi

EDT'ler, hem iletim hem de dağıtım sistemi bağlantılarında, şebeke kararlılığı için belirli reaktif güç sınırlarında sürekli çalışabilir durumda olmalıdır. Reaktif güç destek zorunlulukları, tesisin türüne, ana enerji kaynağına ve işletme koşuluna göre Tablo 1'de belirtilen şekilde sınıflandırılmıştır.



Şekil 5 Müstakil EDT ve Depolamalı Üretim Tesisleri Reaktif Güç Kapasitesi [7]



Şekil 6 Depolamalı Üretim Tesisleri ve Üretime Bütünleşik Depolama Tesisleri Reaktif Güç [7]

Müstakil EDT'ler veya ana kaynağı devrede olmayan üretime bütünleşik depolama tesisleri veriş veya çekiş yönünde kurulu gücünün %10'u üzerinde çalışıyorsa hem aşırı uyartım hem de düşük uyartım yönlerinde lisans gücünün %40'ı kadar reaktif güç rezervi sağlamak zorundadır. Eğer aktif güç veriş veya çekişi %10'u ve altındaysa tesis lisans gücünün %100'ü kadar reaktif güç rezervi tutmak zorundadır.

E. Reaktif Güç Kontrolü

İletim sistemine bağlı ve 30 MW ve üzeri kurulu güce sahip EDT ve depolama üniteleri, normal işletme koşullarında bağlantı noktası gerilim değişimlerine oransal (droop kontrol) ve Şekil 7'de belirtilen hızlarda reaktif güç tepkisi vermelidir.

Teknik kriterler:

- "Droop" değeri %2 – %7 aralığında olacak şekilde TEİAŞ tarafından

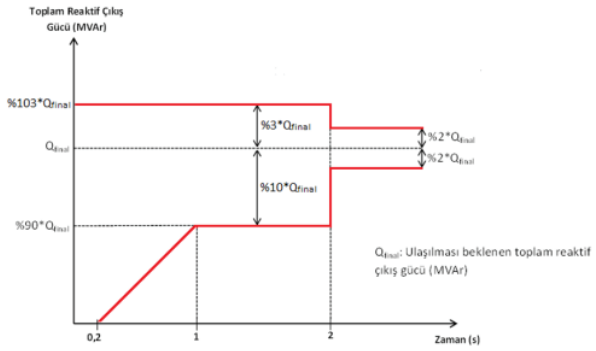
Tablo 1 Reaktif Güç Kapasite Kriterleri

Tesis Tipi / Durumu	İşletme Koşulu	Reaktif Güç Yükümlülüğü
Müstakil EDT veya Kanun* 7/10 kapsamındaki üretim tesisleri	Her durumda	Şekil 5'teki sınırlar içinde sürekli çalışabilirlik
Kanun 7/11 kapsamındaki entegre üretim + depolama tesisleri	Ana kaynak devrede ve aktif güç ≥ %10	Şekil 6 ve Ek-18'e uygun reaktif güç desteği, ana kaynağın türüne göre
Kanun 7/11 kapsamındaki entegre üretim + depolama tesisleri	Ana kaynak devre dışı veya aktif güç < %10	Şekil 6'ya uygun, P_{EDT}'ye göre sürekli çalışabilirlik
Rüzgâr/güneş dışı entegre üretim + depolama tesisleri	Ana kaynak devrede, 0.85 güç faktörü zorunlu	Aşırı ikaz: ≥ %55 | Düşük ikaz: ≥ %40 (kurulu güce göre)
Rüzgâr/güneş dışı entegre üretim + depolama tesisleri	Ana kaynak devrede, 0.85 üzeri güç faktörü izinli	Aşırı ikaz: ≥ %30 | Düşük ikaz: ≥ %40
Rüzgâr/güneş dışı entegre üretim + depolama tesisleri	Ana kaynak devre dışı veya aktif güç MKÜD altında	Şekil 5'teki sınırlar içinde sürekli çalışabilirlik

*6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu

belirlenir. Droop değeri, 0'dan maksimum reaktif güce geçiş için gerekli gerilim değişim oranını ifade etmektedir.

- 200 ms içinde tepki vermeye başlanmalı, 1 saniyede hedef reaktif gücün %90'ına ulaşılmalı, 2 saniye içinde %2 toleransla denge noktasına oturulmalıdır.



Şekil 7 Gerilim Değişimi Sonrası Reaktif Çıkış Gücü Tepkisi Sınırları [7]

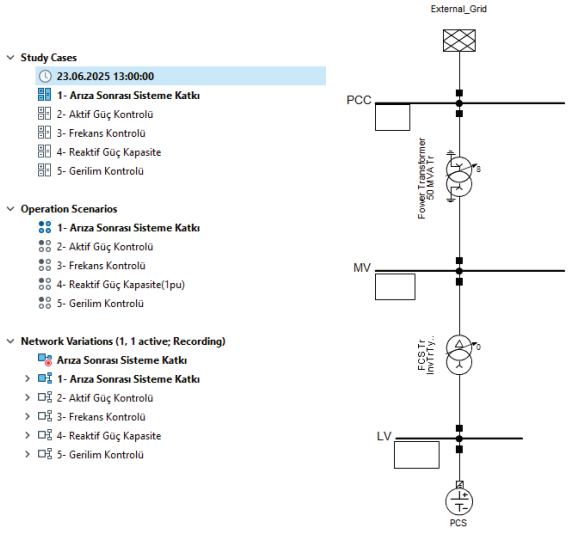
III. MODELLEME VE ANALİZLER

İletim sistemine bağlı 10 MW üzeri depolama gücüne sahip tüm EDT'ler, tüm analiz ve modelleme raporlarını, ilk sistem kullanım anlaşması başvurusundan en geç 3 ay önce şebeke işletmecisine sunmalıdır. Sistem işletmecisi aynı zamanda tesisin statik, RMS ve EMT modellerinin sunulmasını talep etmektedir.

- Toplulaştırılmış model: Tesisin dinamik davranışını temsil eden doğrulanmış WECC/IEC modelidir. Bu modelde santral detayı bulunmaz ancak tesisin dinamik davranışının sistem etütlerinde kullanılmasına imkan verir.
- Detaylı model: Tesis yapısının modellendiği (kablo, transformatör vb. – AC taraf), üretici tarafından sağlanan kontrolcülerle kurulmuş detaylı modeldir. Şebeke uyumluluk analizleri detaylı model üzerinde gerçekleştirilir.

A. Modelleme

Geliştirilen modellerde yürütülen şebeke uyumluluk analizlerinin sistem işletmecisi tarafından tekrarlanabilir olarak kurgulanması beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında DIgSILENT Power Factory yazılımı kullanılarak Şekil 8'de verilen 30 MW lisans gücüne sahip tipik bir müstakil EDT'nin modellemesi yapılmış ve şebeke uyumluluk analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8 Tipik bir EDT Modeli

EDT'nin lisans gücü 30 MW olsa da invertör (PCS – Power Conversion System) kapasitesi 35 MVA seçilmiştir. EDT şebekeye 50 MVA 154/34.5 kV kısa devre gerilimi %12.18 olan bir güç transformatörü ile bağlanmıştır. Güç trafosunun 25 kademesi bulunmaktadır ve otomatik kademe değişimi uygulanmıştır.

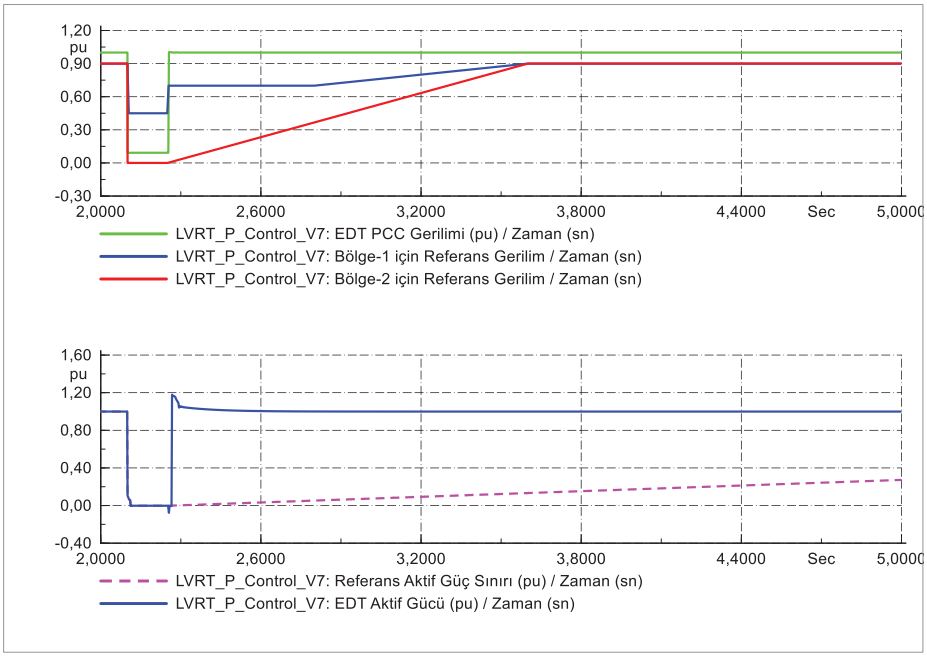
EDT modelinde sistem işletmecisinin analizleri tekrarlayabilmesi için yazılımın çalışma dosyası (study case), işletme senaryosu (operation scenario) ve varyasyon (variation) özellikleri kullanılmıştır. Bu sayede tek bir proje dosyasında tüm analizlerin tekrarlanabilmesi mümkün olmaktadır.

B. Analizler

a. LVRT Analizi

LVRT kapsamında PCC geriliminin ve arıza süresinin değiştirildiği çeşitli arıza senaryoları oluşturularak EDT'nin uyumluluğu değerlendirilmelidir. Bu çalışma kapsamında kısa devre anında PCC gerilimi 0.1 pu mertebesine düşürülmüş ve arıza 150 ms sonra temizlenmiştir. Bu arıza türü Bölge-2 kapsamındadır.

Gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekilde x ekseni zamandır. Üst grafiğin y ekseni gerilimken alt grafikte y ekseni EDT'nin aktif gücüdür. Üst grafikte



Şekil 9 Gerçekleştirilen Arıza ve EDT'nin Davranışı

mavi ve kırmızı eğriler yönetmelikte belirtilen kriterdir. Yeşil eğri ise EDT'nin şebekeye bağlandığı baranın gerilimidir. Alt grafikte mavi eğri EDT'nin aktif gücünü verirken mor eğri ise yönetmelik gereğince arıza temizlendikten sonra EDT'nin aktif gücünü toparlaması gereken minimum kriteri temsil etmektedir. Grafiklerde de görüldüğü üzere, bu arıza nedeniyle EDT devreden çıkmamıştır. Arıza temizlendikten sonra aktif gücünü beklenen eğime uygun olarak toparlamıştır.

Şekil 10'da ise arıza süresince EDT'nin şebekeye sağladığı reaktif akım desteği gösterilmektedir. Şekilde üst grafik EDT'nin aktif akımını gösterirken alt grafik reaktif akımını temsil etmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi EDT 60 ms içerisinde nominal akımının %100'üne kadar reaktif akım desteği vermeye başlamış ve arıza temizleninceye kadar reaktif akım desteğine devam etmiştir. Sonuç olarak EDT'nin yönetmelikte belirtilen LVRT kurallarına uyabildiği görülmektedir.

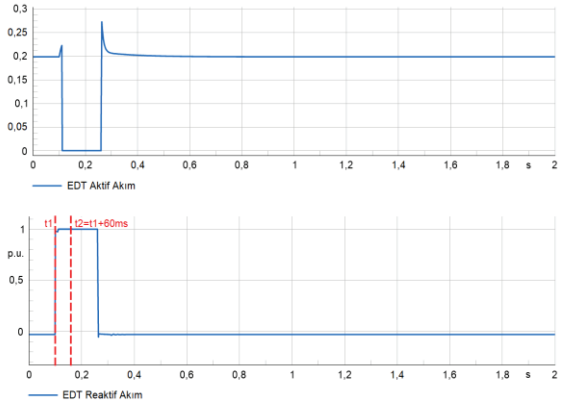
a. Aktif Güç Kontrolü Analizi

EDT'ler sistem işletmecisi tarafından verilen yeni çalışma noktalarına yönetmelikte belirtilen süreler içerisinde ulaşabilmelidir.

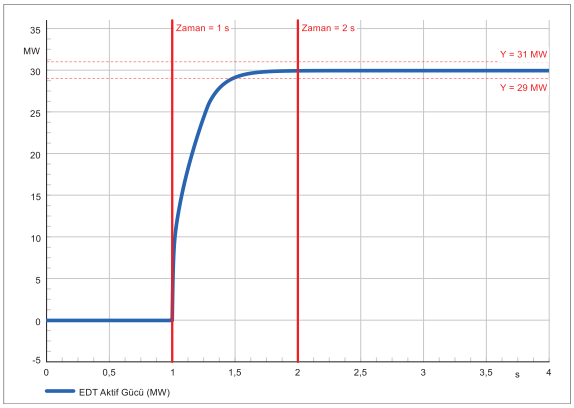
EDT'nin aktif güç kontrolü 3 koşulda değerlendirilmiştir:

- 0 MW → Maksimum veriş (Şekil 11)
- 0 MW → Maksimum çekiş (Şekil 12)
- Maksimum çekiş → Maksimum veriş (Şekil 13)

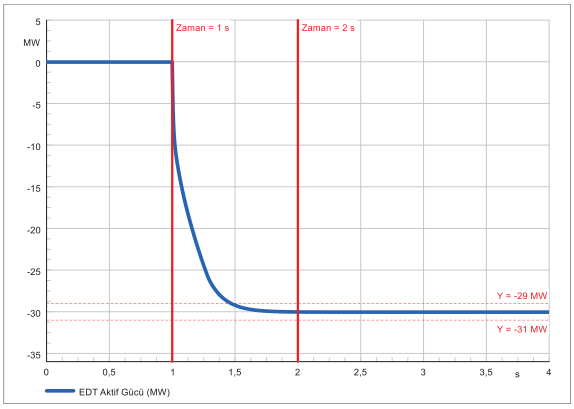
Şekiller incelendiğinde EDT'nin 0 MW'dan veriş ve çekiş yönünde 30 MW'a 1 sn içerisinde çıkabildiği, -30 MW'tan 30 MW'a ise 2 sn içerisinde ulaşabildiği görülmektedir. Bu nedenle tepki süreleri yönetmelikle uyumludur.



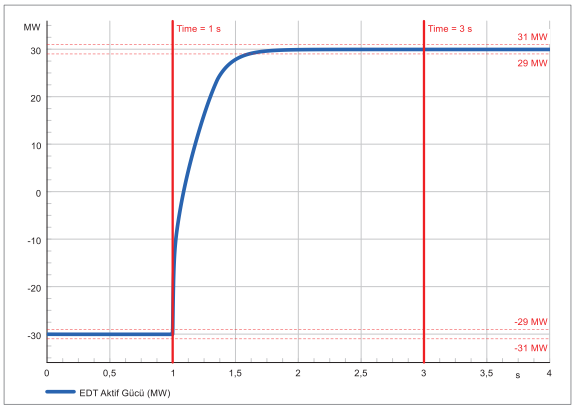
Şekil 10 Arıza Süresince Reaktif Akım Desteği



Şekil 11 Aktif Güç Kontrolü: 0MW → 30MW



Şekil 12 Aktif Güç Kontrolü: 30MW → 0MW

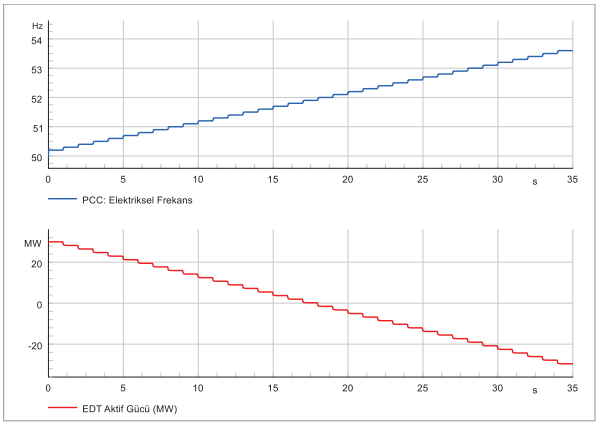


Şekil 13 Aktif Güç Kontrolü: -30MW → 30MW

b. Frekans Kontrolü Analizi

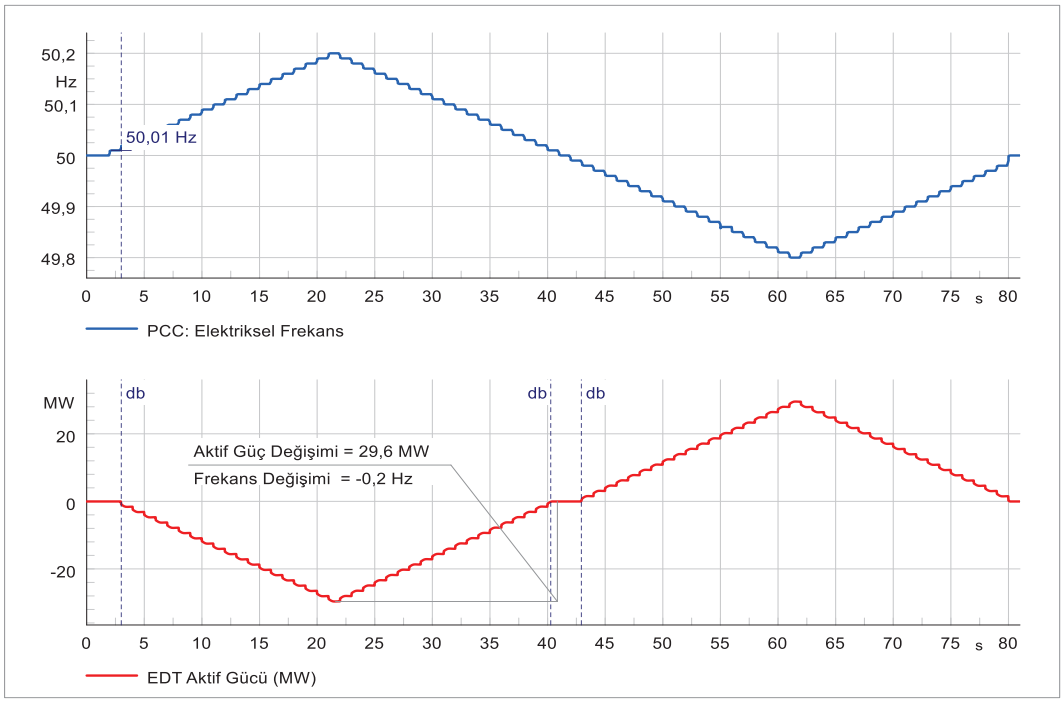
EDT'lerin frekans kontrolü kapsamında uyması gereken yükümlülükler 3 koşulda değerlendirilmiştir:

- Frekans hassasiyet modunu inceleyebilmek için şebeke frekansı 49.8 Hz. ile 50.2 Hz. arasında 0.01 Hz. adımlarla değiştirilmiştir (Şekil 14)



Şekil 15 Yüksek Frekans Hassasiyet Modu Analizi

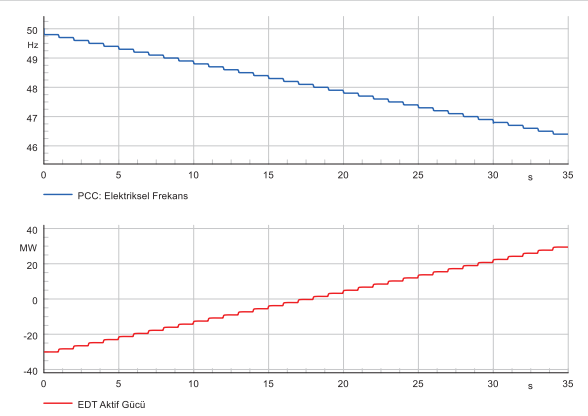
- Yüksek frekans hassasiyet modu için şebeke frekansı 0.1 Hz. adımlarla EDT'nin maksimum verişten maksimum çekişe ulaşmasını sağlayana kadar arttırılmıştır (Şekil 15).
- Düşük frekans hassasiyet modu için şebeke frekansı 0.1 Hz. adımlarla EDT'nin maksimum çekişten



Şekil 14 Frekans Hassasiyet Modu Analizi

maksimum verişe ulaşmasını sağlayana kadar azaltılmıştır (Şekil 17).

Analiz sonuçları incelendiğinde tüm koşullarda EDT tepki süresinin 2 sn'yi aşmadığı, ayarlanan droop değerine uygun şekilde frekans değişimlerine tepki verebildiği görülmektedir.

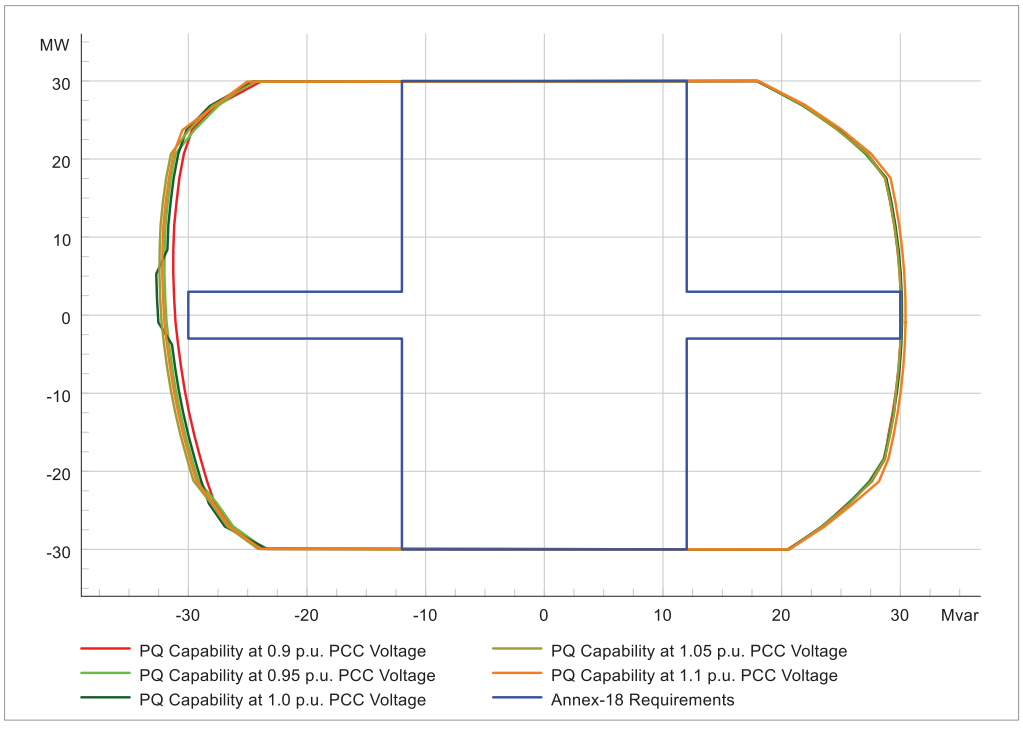


Şekil 17 Düşük Frekans Hassasiyet Modu Analizi

c. Reaktif Güç Kapasite Analizi

EDT normal işletme koşullarındaki gerilim değişimlerine bağlantı kriterlerinde tarif edilen rezerv miktarıyla tepki verebilmelidir. Bu kapsamda EDT'nin farklı çalışma koşullarında reaktif rezerv kapasitesi araştırılmıştır. **Error! Reference source not found.**'de farklı PCC gerilimlerinde EDT'nin şebekeye sağlayabildiği reaktif güç kapasitesiyle lisans gücüne göre yönetmelik gereğince sağlaması gereken reaktif rezerv miktarı gösterilmiştir:

- Mavi eğri → EDT'nin reaktif yükümlülüğü
- EDT'nin şebekeye bağlandığı noktaya farklı şebeke gerilimlerinde sağlayabildiği reaktif rezerv miktarı:
  - Kırmızı eğri → 0.90 p.u.
  - Açık yeşil → 0.95 p.u.
  - Koyu yeşil → 1.00 p.u.



Şekil 16 Reaktif Güç Kapasite Analizi

- Koyu sarı → 1.05 p.u.
- Turuncu → 1.10 p.u.

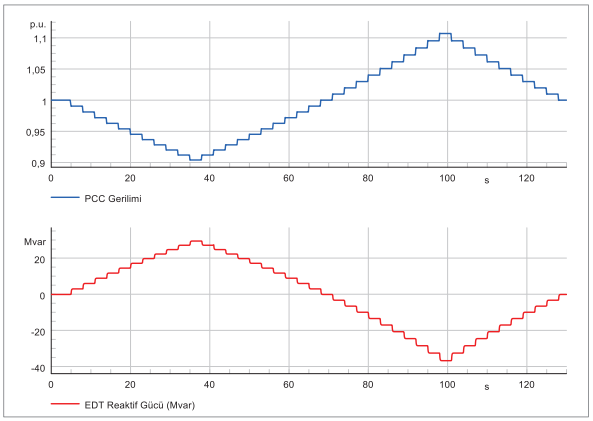
Grafik incelendiğince EDT'nin %10 ve altında aktif güç veriş ve çekiş yaparken sağlaması gereken 1 p.u. reaktif rezervi sağlayabildiği görülmektedir. Ancak özellikle aşırı uyartım yönünde PCC gerilimi 1.05 p.u. iken (koyu sarı eğri) yükümlülük sağlanmış olsa da marj kalmamıştır. Dolayısıyla topolojide yaşanacak en küçük bir değişiklik aşırı uyartım yönünde reaktif rezervin yetersiz kalmasına yol açabilir.

d. Reaktif Güç Kontrolü

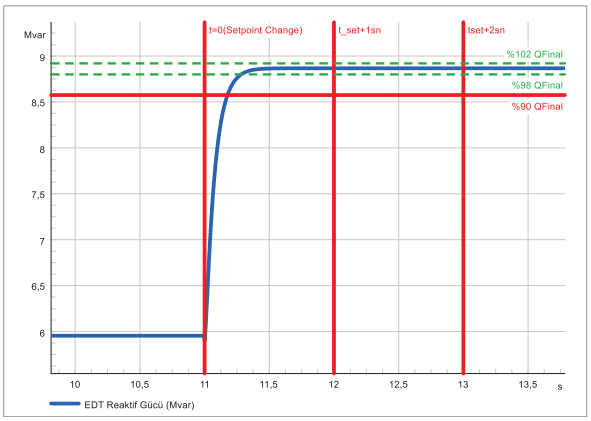
Analizlerde, PCC gerilimi 0.90 pu ile 1.10 pu arasında 0.01 pu basamaklarla değiştirilmiş ve bu değişimlere bağlı olarak santralin reaktif güç tepkisi (droop kontrol) ile bu tepkinin aktivasyon hızı değerlendirilmiştir. Testler, aktif güç seviyeleri 1 pu (%100) ve 0.1 pu (%10) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 18'de otomatik gerilim kontrol modunda şebeke geriliminde meydana gelen gerilim değişimlerine karşı EDT tarafından verilen reaktif güç tepkileri gösterilmektedir. Üstteki grafik (mavi eğri) şebeke gerilimini gösterirken alttaki grafik (kırmızı eğri) EDT'nin PCC'de şebekeye sağladığı reaktif güç miktarını göstermektedir. Gerilim değişimlerine ayarlanan droop değerine uygun olarak gerekli reaktif güç desteği verilmektedir.

Şekil 19'da otomatik gerilim kontrolünde verilen tepkilerin hızı analiz edilmiştir. Şekil incelendiğinde EDT'nin 200 ms içerisinde ilk tepkisine başladığı, 1 sn içerisinde vereceği tepkinin %90'ına ulaştığı ve 2 sn içerisinde %2 toleransı ihlal etmeyecek şekilde vereceği tepkinin %100'ünü sağladığı görülmektedir.



Şekil 18 Otomatik Gerilim Kontrolü Analizi



Şekil 19 Otomatik Gerilim Kontrolünde Tepki Hızı

V. SONUÇ

Çalışma kapsamında EDT yönetmeliğinde bulunan kritik hususlar özetlenmiştir. Uyumluluk analizlerini gerçekleştirebilmek için 30 MW lisans gücünde tipik bir müstakil EDT modellenmiştir. Modellenen EDT'nin yönetmelikte tanımlanan teknik kriterlere uyumluluğu analiz edilerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- EDT arıza esnasında devrede kalabilmiş, arıza süresince reaktif akım desteği verebilmiş ve arıza temizlendik sonra aktif gücünü toparlayarak LVRT kriterlerine uygun hareket edebilmiştir.

- EDT gönderilen aktif güç set pointlere belirtilen süreler dahilinde ulaşabilmiştir.
- EDT gerek primer frekans kontrolünde, gerek yüksek ve düşük frekans hassasiyet modlarında frekans değişimlerinde droop kontrol ile aktif gücünü ayarlayabilmiştirr.
- EDT özellikle 0.1 p.u. ve altındaki aktif güç veriş/çekiş koşullarında ek marjı hiç bulunmasa da reaktif rezerv isterlerini karşılayabilmiştir.
- EDT gerilim değişimlerine beklenen hızda ve eğimde reaktif güç desteği verebilmiştir.

EDT lisans gücü 30 MW olarak seçilmiş olsa da invertör kapasitesinin 35 MVA seçildiğine dikkat edilmelidir. İnvertör kapasitesi 30 MVA seçilseydi reaktif güç rezerv talebini karşılayabilmek için OG baraya örneğin SVG yatırımı tercih edilebilirdi. Mevcut topolojide reaktif isterler karşılanmış olsa da marjın çok küçük olması nedeniyle invertör kapasitesinin yükseltilmesi de değerlendirilebilir. Görüldüğü gibi reaktif güç rezervi belirlenirken santral tasarımı detaylı modellenmeli, sahada yaşanabilecek değişiklikleri de göz önüne alacak şekilde reaktif kapasitenin yeterliliği değerlendirilmelidir. RMS analizlerle EDT kontrolcü yeteneklerinin yönetmelik kriterleriyle uyumluluğu değerlendirilmelidir.

Gelecek çalışmalarda tipik bir EDT'nin sistem işletmecisi tarafından talep edilen örnek bir toplulaştırılmış modeli kurulacaktır. Bu modelde EDT'nin WECC/IEC modeli doğrulanarak sistem etütlerinde kullanıma hazır hale gelmesi sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Castillo, M., Liang, X., & Faried, S. O. (2023, September). Battery energy storage and their ancillary services with renewable energy: A review. In 2023 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) (pp. 153-158). IEEE.

[2] L. Xie et al., "Wind Integration in Power Systems: Operational Challenges and Possible Solutions," in Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 214 - 232, Jan. 2011.

[3] Aydın, R. A., et al. "Şebeke Seviyesinde Enerji Depolama Uygulamaları için Uygun Teknoloji Seçimi Metodolojisi Önerilmesi." Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 12.3 (2020): 107-118.

[4] N. Pang, Q. Meng and M. Nan, "Multi-Criteria Evaluation and Selection of Renewable Energy Battery Energy Storage System-A Case Study of Tibet, China," in IEEE Access, vol. 9, pp. 119857 - 119870, 2021.

[5] Zheng, YuanJie, et al. "The impact of LVRT on the transient stability of power system with large scale wind power." 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2013.

[6] ENTSO-E, "General Guidance on Compliance Verification", ENTSO-E, Brussels, Belgium, Jul. 2021.

[7] ENTSO-E, "Implementation Guidance Document on Compliance Verification Using Electrical Simulation Models," ENTSO-E, Brussels, Belgium, Jan. 2023.

[8] Elia Group, "Proposal for General Requirements for Storage Connections", Elia, Brussels, Belgium, Dec. 2018.

[9] Gonzalez-Longatt, Francisco M., and José Luis Rueda, eds. PowerFactory applications for power system analysis. Springer, 2014.

[10] Elektrik Depolama Tesislerinin Şebeke Bağlantı ve Uyumluluk Kriterleri

ACİL DURUMLARDA SESLİ TAHLİYENİN ÖNEMİ

Aytekin DURMUŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisi

ÖZET

Acil durumlarda can güvenliğini sağlamak, eksiksiz ve etkili bir alarm sistemine bağlıdır. Ancak alarm sistemleri yalnızca doğru şekilde çalıştığında işe yarar; yetersiz veya çalışmayan sistemler tahliye sürecini geciktirir ve riskleri artırır. Erken tahliye, acil durumlarda hayati önem taşır, çünkü hızlı tahliye daha fazla hayat kurtarır ve panik ortamını en aza indirir.

Siren ve zillerin farklı ses tonlarına göre insanları yönlendirebileceği düşünülse de, bu sesler belirsiz ve panik yaratıcıdır. Bu nedenle insanlar yanlış kararlar alabilir veya gereksiz karmaşa yaşanabilir. Her işletmede bulunan kişilere yangın tahliye eğitimi vermek her zaman mümkün değildir ve eğitim verilmiş olsa bile siren ya da zillerle yapılan yönlendirmeler tahliyeyi güvenli bir şekilde gerçekleştirmeye yetmez. Ayrıca, sürekli çalan yanlış alarmlar, personelde duyarsızlaşmaya neden olabilir, bu da gerçek tehlike anında doğru tepki verilmesini engeller.

İnsan sesiyle yapılan acil anonslar, tehlike anında net ve anlaşılır mesajlar ile büyük bir avantaj sağlar. Görevli personele özel talimatlar verilebilir veya yangınla mücadele ekiplerine bölgesel uyarılar yapılabilir. Ayrıca asansörler gibi panik yaratabilecek alanlarda, kaosun önüne geçmek için özel anonslar yapılabilir. Manuel tahliye yönlendirmeleriyle kişilere güvenli kaçış rotaları gösterilebilir. Eğitimli personel dahi acil durumda panik yapabileceğinden, insan sesiyle yapılan yönlendirmeler ve bilgilendirmeler tahliyeyi güvenli ve hızlı bir şekilde gerçekleştirmenin en etkili yoludur.

Eğer bir binada geçici seslendirme sistemi kurulursa (konser organizasyonu gibi), sistem ilgili acil anons standartlarına göre tesis edilmedikçe böyle bir sistem acil durum sistemi olarak kullanılamaz.

GİRİŞ

Acil anons sistemlerinin nerelerde Tesislerde can kayıplarının önüne geçecek doğru tahliye senaryolarının oluşturulması ve işlevsel biçimde uygulanması çok önemlidir. Tahliye senaryoları için Eşzamanlı Tahliye, Aşamalı Tahliye ve Gecikmeli Tahliye gibi stratejiler belirlenirken, binanın mimari yapısı, kullanıcı profili, yüksek binalarda dikey mesafe gibi birçok faktör değerlendirilir. Doğru bir senaryo oluşturulabilmesi için tasarım ekipleri, bina işletme kadrosu, yerel otorite ve danışmanlar gibi birçok paydaşın bir araya gelmesi gerekir.

Anons ve siren sesine verilen tepkiler farklılık gösterir. İnsanlar genellikle belirsiz bir sese oranla insan sesine daha olumlu tepki verirler. Ayrıca acil bir durumda tehlikenin kaynağının ve yerinin bilinmesi önemlidir. Acil anons sistemleri, sadece insanları dışarı çıkarmakla kalmaz, aynı zamanda tehlikenin kaynağı hakkında bilgi verir. Farklı bölgelere özel yönlendirmeler yapılabilir, yangınla mücadele ekiplerine ayrı, genel kullanıcıya ayrı anonslar yapılabilir.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) acil anons sistemlerinin kurulmasını bazı binalar için zorunlu kılmaktadır. Yönetmelikte belirtildiği gibi, yapı yüksekliği, inşaat alanı, kullanıcı sayısı ve yatak sayısı gibi faktörlere bağlı olarak acil anons sistemleri kurulmalıdır. Özellikle yüksek katlı binalar, alışveriş merkezleri, oteller gibi yerlerde bu sistemlerin kurulumu zorunludur.

Acil anons sistemleri, belirli standartlara uygun olarak tesis edilmelidir. Ülkemizde EN54 standartları kullanılmakta olup, bu standartlara uygun ekipmanların

kullanılması gereklidir. Sistemin duyulabilirlik ve anlaşılabilirlik hesapları yapılmalıdır. Duyulabilirlik, sesli uyarının ortam gürültüsünden daha yüksek olmasıdır. Anlaşılabilirlik ise, anonsun doğru bir şekilde anlaşılmasını ifade eder.

Acil anons sistemlerinin periyodik bakımları ve testleri EN54-32 standardına göre yapılmalıdır. Periyodik bakımlar, izlenmeyen arızaların tespit edilmesini ve sistemin sürekli olarak güvenilirliğini sağlar. Bakım ve testler, sertifikalı kuruluşlar tarafından yapılmalı ve bina dolu olsun ya da olmasın sistemin sürekli çalışabilirliği sağlanmalıdır.

Acil durumlarda can güvenliğini sağlamak, öncelikle eksiksiz ve etkili bir alarm sistemine dayanır. Ancak, alarm sistemleri yalnızca doğru şekilde çalıştığında işe yarar; çalışmayan veya yetersiz alarm sistemleri tahliye sürecini geciktirir ve riskleri artırır. Erken tahliye, acil durumlarda hayati bir rol oynar, çünkü hızla gerçekleşen bir tahliye daha fazla hayat kurtarabilir ve panik ortamını en aza indirir.

Siren ve zillerin farklı ses tonlarına göre insanların farklı aksiyonlar alması sağlanacağı düşünülse de bu seslerin genellikle belirsiz ve panik yaratıcı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, insanlar yanlış kararlar verebilir veya gereksiz bir karmaşaya yol açabilir. Her işletmede bulunan kişilere yangın tahliye eğitimi vermek her zaman mümkün değildir ve eğitim verilmiş olsa bile acil durum anında yönlendirmelerin siren ya da zillerle yapılması, insanları güvenli ve etkili bir şekilde tahliye etmeye yetmez. Ayrıca, sürekli çalan yanlış alarmlar, personelde bir duyarsızlaşma etkisi yaratabilir; bu da gerçek bir tehlike anında doğru tepkiler verilmesini engelleyebilir.

İnsan sesiyle yapılan acil anonslar, tehlike anında net ve anlaşılır mesajlar vererek büyük bir avantaj sağlar. Bu sayede, görevli personele özel talimatlar veya yangınla mücadele ekiplerine bölgesel uyarılar yapılabilir. Asansörler gibi panik yaratabilecek bölgelerde farklı anonslar verilerek, kaosun önüne geçilebilir. Ayrıca, manuel tahliye yönlendirmeleriyle kişilere güvenli kaçış rotaları gösterilebilir. Acil bir durumda, eğitimli personel dahi panik yapabileceğinden, insan sesiyle yapılan yönlendirmeler ve bilgilendirmeler tahliyeyi güvenli ve hızlı bir şekilde gerçekleştirmenin en etkili yoludur.

Tesislerde can kayıplarının önüne geçecek doğru tahliye senaryolarının oluşturulması ve işlevsel biçimde uygulanması çok önemlidir.

Senaryolar için Eşzamanlı Tahliye, Aşamalı Tahliye, Gecikmeli Tahliye gibi stratejiler belirlenirken, binanın mimari yapısı, kullanıcı profilinin binayı tanıyıp tanımaması, yüksek binalarda kullanıcıların tahliye sırasında dikey mesafeden dolayı yorgunlukları ve psikolojileri gibi birçok faktör değerlendirilir. Doğru senaryonun oluşabilmesi için tasarım ekipleri, bina işletme kadrosu, yerel otorite ve danışmanlar gibi birçok paydaşın bir araya gelmesi gereklidir.

İnsan Sesi ve Siren Sesi İle Yapılan Uyarılar

Binalarda bir acil durumda tahliyenin sözlü anonslarla yapılması ve siren sesiyle yapılması arasında önemli farklar vardır.

İnsanların anons ve siren sesine verdikleri tepki süreleri farklılık göstermektedir. Bu konuyla ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Kişilerin binayı tanıyıp tanıması, anonsun kayıtlı veya

canlı olarak yapılması tepki sürelerini etkilemektedir.

Types of buildings and occupants	People familiar with infrastructure	Acoustic signal, sirens	Stored spoken text, Voice Alarm system	Live announcement, Voice Alarm system
Offices, Public buildings, Schools, Industry	Yes	> 4 min	3 min	< 1 min
Shops, Museums, Places of assembly	No	> 6 min	3 min	< 2 min
Hostels, Boarding schools	Yes, but sleeping	> 5 min	4 min	< 2 min
Hotels	No and Sleeping	> 6 min	4 min	< 2 min
Hospitals, Retirement and Nursing homes	People need assistance	> 8 min	5 min	< 3 min
Avoiding loss of life			by significant improvement of response time	

Özellikle yüksek binalarda kat sayısı arttıkça kullanıcı sayısında da ister istemez artış olacaktır. Yükseklikten dolayı binanın çıkış noktalarına olan dikey mesafeler artacak ve tahliye süreleri uzayacaktır. Yapılan teknik analizler sonucunda bazı gökdelenler için tahliye sürelerin 2 saatin üzerinde olduğu raporlanmıştır. Can kayıplarının önüne geçen tahliyelerde insanların endişe ve paniğe kapılmadan sakin bir şekilde davranmaları gereklidir. Siren ve alarm zil sesleri doğaları gereği endişe vericidir. Yine bu konuda yapılan araştırmalarda farklı yaşlardaki insanların belirli olmayan ısrarlı bir sese oranla insan sesine daha olumlu tepki verdikleri ispatlanmıştır.

Acil bir durumda tehlikenin neden kaynaklandığı ve tehlikenin yerinin bilinmesi önemlidir. Acil anons sistemleri sadece insanları dışarı çıkarmakla kalmayıp aynı zamanda onları tehlikenin kaynağı konusunda da bilgilendirirler.

Acil anonsla yapılan uyarılar farklı yönlendirme imkanı sağlar. Tesisin büyüklüğüne ve yapısına bağlı olarak farklı tahliye senaryoları için birkaç alternatif oluşturulabilir. Acil anons sistemi planlananın aksine bir durum geliştiğinde anlık değişikliklerle farklı toplanma noktalarına yönlendirme yapabilir.

Acil anons sistemleriyle aynı anda farklı bilgilendirmeler yapmak mümkündür. Yangınla mücadele ekiplerini yönlendirmek ve bilgi vermek amacıyla sadece onların bulunduğu bölgelere farklı anons yapılabilir. Özellikle yüksek katlı yapılarda kademeli tahliyelerde farklı katlara farklı anonslar verilebilir. Örneğin yangın veya tehlikeli bir durumun yaşandığı kata ‘’Bulunduğunuz katta yangın var, en yakın acil çıkış merdivenini kullanarak binayı tahliye ediniz’’ anonsu verilirken farklı katlara ‘’Binamızda yangın tespit edilmiştir, tahliye için bir sonraki anonsu bekleyiniz’’ gibi farklı anons verilebilir. Asansörlere de farklı bir anons verilmesi gerekir.

Tahliye sonrasında iletişimin büyük önemi vardır. Toplanma noktalarındaki insanları tehlikenin durumuyla ilgili bilgilendirmek veya bu noktalarda bulunanlar için farklı talepler yine canlı yapılacak anonslar ile mümkün olur.

Doğru Acil Anons Sistem Tasarımı

Acil durumda hayat koruma amacıyla tesis edilen acil anons sistemleri, belirli kurallara uygun olarak tesis edilirler. Her bölge veya ülkede farklı farklı standartlar olmakla birlikte ülkemizde BYKHY belirttiği Avrupa EN normları kullanılır. EN normlarında EN54’ün 32. Bölümü sesli alarm sistemlerinin planlaması, tasarımı, kurulumu, devreye alınması, kullanımı ve bakımıyla ilgili kısmıdır. TSE (Türk Standartları Enstitüsü) bu dokümanı ‘’TSE CEN/TS 54-32:2015’’ adıyla Türk Standardı olarak yayınlamıştır.

Sistemi oluşturan ekipmanların tümünün ilgili ürün standartlara, EN54-16, EN54-24, EN54-4 uygun üretildiğinin bağımsız test kuruluşlarınca sertifikalandırılması gereklidir. Aksi durumda sistemin

çalışma performansı ve acil durumda çalışırlığı garanti edilemez.

TS EN 54-16 (Yangın algılama ve yangın alarm sistemleri- Bölüm 16: Sesli alarm kontrolü ve gösterge donanımı)
TS EN 54-24 (Yangın algılama ve yangın alarm sistemleri- Bölüm 24: Hoparlörler)

TS EN 54-4 (Yangın algılama ve yangın alarm sistemleri- Bölüm 4: Güç Kaynakları)

Duyulabilirlik ve Anlaşılabilirlik Hesapları

Acil durumlarda güvenli tahliyenin sağlanması için tasarım aşamasında yapılması gereken hesaplamalar vardır. Bu hesaplamalardan ikisi duyulabilirlik ve anlaşılabilirlik hesaplarıdır. Duyulabilirlik, yapılan sesli uyarının insan kulağının fark edeceği düzeyde ortam gürültüsünden daha yüksek olmasıdır. Bu değer standartlara göre farklılıklar gösterebilir. BYKHY göre yapılan uyarının ortam gürültü seviyesinden en az 15dB üzerinde olması gereklidir.

Anlaşılabilirlik, yayınlanan anonsun içeriğinin doğru bir şekilde anlaşılmasıdır. Anlaşılabilirlik acil anons sitemi için çok önemlidir. Duyulabililirlik hesapları matematiksel olarak kolaylıkla yapılabilirken anlaşılabilirlik hesaplamaları için daha detaylı çalışmaların yapılması gereklidir. Ortam gürültüsünün, yankılanmanın, hoparlör miktarının ve ses seviyesinin anlaşılabililirliği etkilediği göz önünde bulundurulmalı, detaylı olarak similasyon programlarında STI (Speech Transmission Index) hesapları yapılmalıdır ve iş bitiminde STI ölçümleri raporlanmalıdır.

Acil Anons Sisteminin Sürekliliği

Sistem devamlılığı için gerekli bakım ve testler EN54-32 standardına göre yapılmalıdır. Duyulabilirlik ve anlaşılabilirlik ölçüm ve testlerinin de periyodik olarak yapılması gereklidir. Sahada yapılan fiziki revizyonlar, kullanım ve proses değişikliklerine bağlı olarak acil anons sisteminin iyileştirmeleri de yapılmalıdır.

Periyodik denetim ve servis, izlenmeyen arızaların tespit edilmesini, acil anons sisteminin sürekli güvenilirliğini sağlamak için önleyici tedbirlerin alınabilmesini ve sorumlu kişinin sistemin sağladığı korumayı etkileyebilecek her türlü değişiklikten haberdar edilmesini sağlamak için gereklidir.

Acil anons sisteminin bakımı, sistemin bakımını yapmak üzere sertifikalandırılmış veya yetkilendirilmiş bir kuruluş tarafından düzenli olarak yapılmalıdır. Bakım, bina dolu olsun ya da olmasın kurulumun tamamlanmasının hemen ardından başlamalıdır.

SONUÇ

Bir can güvenliği sistemi olan Acil Anons ve Tahliye Sistemleri yasal gereklilikler ve tesisin özel gereksinimlerine göre tesis edilmelidir. Sistemlerinin tasarımı ve planlamasında duyulabilirlik ve anlaşılabilirlik hesapları yapılmalıdır. Sistemin kurulumu, devreye alınması, kullanımı ve bakımları EN54 standartlarına göre yapılmalıdır. Sistemi oluşturan tüm ekipmanlar EN54 onaylı ve bağımsız test kuruluşlarınca sertifikalandırılmış olmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik-2021

2. EN 54-16:2008, Yangın algılama ve alarm sistemleri-Bölüm 16: Acil anons kontrol ve gösterge tertibatı

3. EN 54-24:2008, Yangın algılama ve alarm sistemleri-Bölüm 24: Acil anons sistemi bileşenleri-Hoparlörler

4. CEN/TS EN 54-32:2015, Yangın algılama ve alarm sistemleri-Bölüm 32: Acil anons sistemlerinde planlama, tasarım, kurulum, devreye alma, kullanım ve bakım

EN 50710 Standardı Kapsamında Yangın ve Güvenlik Sistemlerinde Güvenli Uzaktan Servis Uygulamaları

Adem Çakır

Siemens A.Ş. Akıllı Altyapı Binalar Birimi, İstanbul

adem.cakir@siemens.com

ÖZET: *Bu bildiride, EN 50710 standardının içeriği, uygulama alanları ve teknik gereklilikleri detaylı şekilde ele alınmıştır. Standardın yangın güvenliği ve güvenlik sistemleri için güvenli uzaktan erişim altyapılarına getirdiği düzenlemeler açıklanmakta, Türkiye'deki mevcut duruma etkileri değerlendirilmekte ve gelecekteki uygulamalara dair öngörüler sunulmaktadır.*

AnahtarKelimeler: *EN 50710, Uzaktan Servis, Yangın Güvenliği, Güvenlik Sistemleri, RAI, Siber Güvenlik, EN 16763*

1. GİRİŞ

Son yıllarda bina teknolojilerinde yaşanan dijital dönüşüm ile birlikte, yangın güvenliği ve fiziki güvenlik sistemlerinin uzaktan izlenmesi ve kontrolü hem teknik hem de operasyonel açıdan önem kazanmıştır. Özellikle IoT (Nesnelerin İnterneti) temelli cihazların yaygınlaşması, servis sağlayıcıların fiziksel erişim gereksinimini azaltarak daha hızlı ve etkin müdahalelere olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) ve Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC) tarafından yayımlanan EN 50710 standardı, yangın güvenliği sistemleri ve güvenlik sistemleri için güvenli uzaktan servislerin sağlanmasına ilişkin asgari gereklilikleri tanımlar. Standart, uzaktan erişim altyapısı üzerinden servis sağlanırken kullanıcı güvenliği, sistem bütünlüğü, veri gizliliği ve operasyonel sürdürülebilirlik gibi temel parametreleri esas alır.

Bu bildiride, EN 50710 standardının kapsamı, terminolojisi, uygulama alanları ve teknik gereklilikleri sistematik şekilde ele alınmakta; ayrıca Türkiye'deki mevcut uygulamalarla karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulmaktadır.

2. STANDARTIN KAPSAMI

EN 50710 standardı, yangın güvenlik sistemleri ve/veya fiziki güvenlik sistemleri (FSSS) ile ilgili sistemlerin uzaktan erişim yoluyla okuma, kontrol veya yazma işlemlerine tabi tutulmasını kapsar. Standart, bu işlemlerin güvenli, yetkilendirilmiş ve kayıt altına alınabilir bir altyapı üzerinden gerçekleştirilmesini zorunlu kılar.

2.1 Kapsama Giren Sistemler

Aşağıdaki sistem türleri, EN 50710 kapsamındadır:

- Yangın Güvenliği Sistemleri
  - Yangın algılama ve alarm sistemleri (FDAS)
  - Sabit yangın söndürme sistemleri (FFFS)
  - Duman ve ısı kontrol sistemleri (SHCS)
  - Acil sesli uyarı sistemleri (ESS)
- Fiziki Güvenlik Sistemleri
  - Hırsız alarm ve izinsiz giriş sistemleri (I&HAS)

- Elektronik geçiş kontrol sistemleri (EACS)
- Dış çevre güvenlik sistemleri (EPSS)
- Video gözetim sistemleri (VSS)

- Destekleyici Yapılar
  - Sosyal alarm sistemleri
  - Entegre yönetim sistemleri (BMS vb.)
  - Çoklu sistemleri yöneten birleşik çözümler

2.2 Kapsam Dışı Hizmetler

Aşağıdaki uygulamalar bu standardın kapsamı dışındadır:

- Yalnızca yerinde yürütülen servis faaliyetleri (uzaktan bağlantı içermeyen işlemler)
- EN 50518 kapsamında tanımlanmış MARC (Monitoring and Alarm Receiving Centre) tarafından sağlanan hizmetler

2.3 Kapsamın Genişliği

Standart sadece teknik bağlantıları değil; erişim izinleri, sorumluluk paylaşımı, kayıt tutma, kimlik doğrulama, sözleşmesel hükümler ve sistemin ulusal regülasyonlara uyumunu da kapsar. Uygulamalar, EN 16763 ile birlikte Avrupa Hizmetler Direktifi (2006/123/EC) çerçevesinde değerlendirilmelidir.[2]

3. TERİMLER, TANIMLAR VE KISALTMALAR

Bu bölümde, EN 50710 standardında sıkça geçen bazı teknik terimler ve kısaltmalar tanımlanmıştır. Bu bölümde, EN 50710 standardında yer alan ve bildirinin anlaşılabilirliği açısından kritik öneme sahip olan temel terimler ve yaygın kullanılan kısaltmalar sunulmuştur.

3.1 Tanımlar

Bkz. Tablo-1

3.2 Kısaltmalar

Bkz. Tablo-2

4. UZAKTAN SERVİSLERİN GÜVENLİĞİNE YÖNELİK GEREKLİLİKLER

EN 50710 standardı, uzaktan erişim yoluyla verilen hizmetlerin güvenli şekilde yürütülmesini sağlamak amacıyla teknik, sözleşmesel ve organizasyonel düzeyde çeşitli gereklilikler tanımlar. Bu güvenlik önlemleri, hem servis sağlayıcının hem de sistem sahibinin sorumluluğundadır

4.1 Risk Değerlendirmesi ve Ön analiz

Her uzaktan erişim uygulamasından önce, hizmet verilecek sistemin türüne ve kullanım ortamına bağlı olarak kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu değerlendirme aşağıdaki unsurları içermelidir:

- Sistemin kritikliği (hayati, ikincil, destekleyici)
- Erişim tipleri: okuma, kontrol, yazma
- Sahip olunan yasal yükümlülükler (ör. veri koruma, itfaiye yönetmelikleri)
- Olası siber saldırı senaryoları ve önlemler
- Erişim yapan tarafların kimlik ve yetki seviyeleri

4.2 Sözleşme ve Sorumlulukların Belirlenmesi

Müşteri (sistem sahibi) ile hizmet sağlayıcı arasında yapılacak yazılı sözleşmelerde şu başlıklar açıkça tanımlanmalıdır:

- Hangi sistemlerin uzaktan erişime açık olacağı
- Erişim zaman dilimleri ve kimlerin yetkili olacağı
- Oturumların izlenmesi ve log kaydı süresi
- Yazılım güncellemelerinin hangi koşullarda yapılabileceği

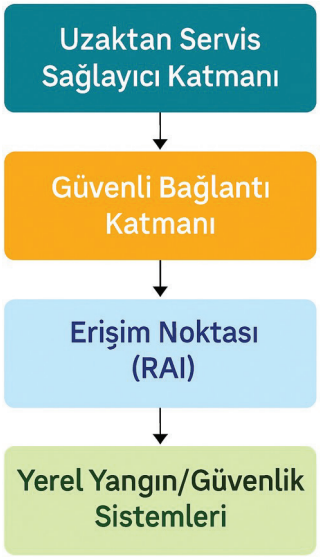
- Alarm durumlarında erişimin otomatik olarak sonlandırılması
- Servis sonrası test ve doğrulama gerekliliği

Not: *EN 50710'a göre, sistemde kalıcı bir değişiklik yapılmadan önce mutlaka müşteri onayı alınmalıdır.*

4.3 Teknik Gereklilikler ve Güvenlik Katmanları

EN 50710, uzaktan erişim altyapısı (RAI) için şu temel güvenlik mekanizmalarının uygulanmasını şart koşar:

- Kimlik Doğrulama (Authentication): Çok faktörlü doğrulama yöntemleri önerilir.
- Yetkilendirme (Authorization): Kullanıcılara rol bazlı işlem yetkileri atanmalıdır.
- Veri Şifreleme: Tüm iletişim uçtan uca şifrelenmelidir (ör. TLS).
- Oturum Yönetimi: Otomatik oturum zaman aşımları ve eş zamanlı erişim sınırlamaları uygulanmalıdır.
- Loglama ve İzleme: Her erişim oturumu zaman damgası ile birlikte kaydedilmeli ve denetlenebilir olmalıdır.
- Felaket Durumları için Geri Dönüş: Yazılım güncellemeleri sırasında sorun yaşanırsa, otomatik rollback (geri alma) mekanizması devreye girmelidir.



Şekil 1 - Uzaktan Erişim Temel Güvenlik Mekanizmaları Akış Şeması

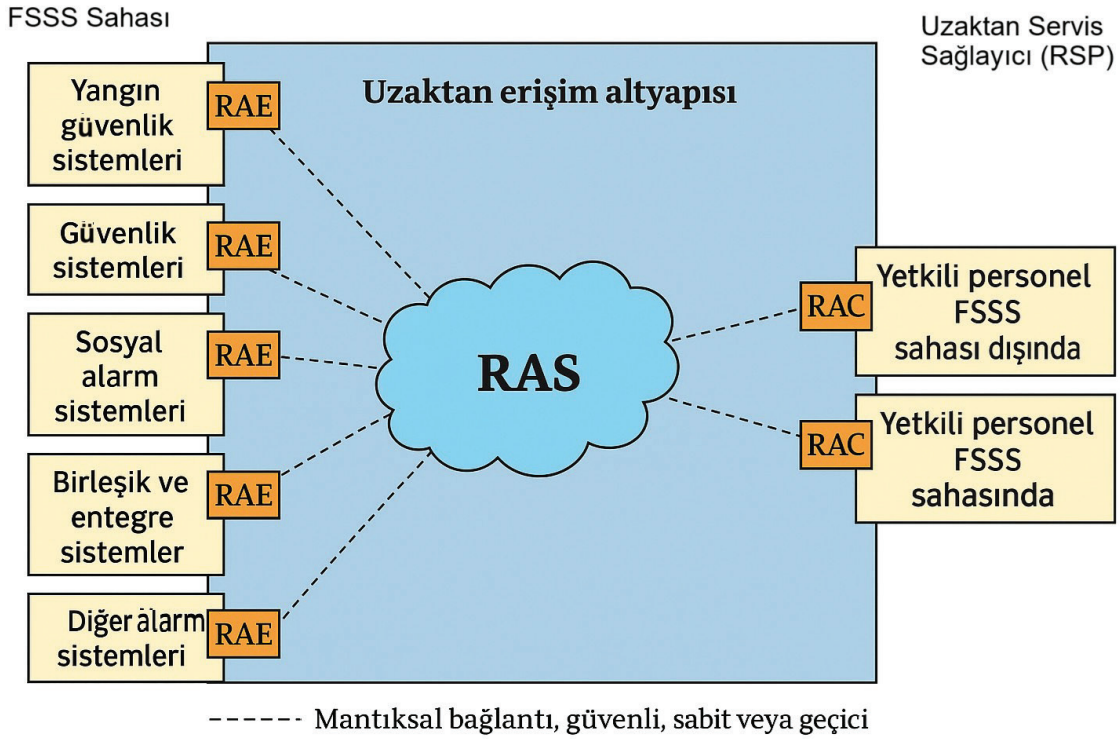
4.4 Lokasyon Bazlı Güvenlik Önlemleri

Saha Tarafı (RAE Lokasyonu):

- RAE cihazı güvenli ve yetkisiz kişilere kapalı bir alanda bulunmalıdır.
- Cihazın güç ve iletişim hatları kesintilere karşı yedeklenmelidir.
- Herhangi bir yazılım değişikliği sonrası saha testi yapılmalıdır.

Uzaktan Taraf (RAC/RAS Lokasyonu):

- Sadece yetkili ve eğitimli kullanıcılar erişim yapabilir.
- Uygulama açıkken terminal başında kullanıcı bulunmalıdır (gözetimli oturum).
- Sistem alarm durumuna geçtiğinde oturumlar otomatik kesilmelidir.



Şekil 2 - Uzaktan Erişim Altyapısı Genel Bakış

5. UYGULAMAYA ÖZGÜ TEKNİK GEREKLİLİKLER

EN 50710 standardı, farklı yangın ve güvenlik sistemleri için kontrol ve yazma fonksiyonlarına yönelik sınırlamaları sistem türüne göre tanımlar. Bu ayrım, her sistemin kendi risk düzeyine göre değerlendirilmesini sağlar.

Aşağıda sistem türlerine göre öne çıkan teknik gereklilikler yer almaktadır:

5.1 Yangın Algılama ve Alarm Sistemleri (FDAS)

- Kontrol: Uzaktan alarm susturma veya sıfırlama gibi işlemler yalnızca yerinde doğrulama yapılmışsa mümkündür.
- Yazma: Bir yazılım indirmesiyle değiştirilecek yazılım saklanmalıdır. Bağlantı kaybı veya başka bir iletim hatası indirmeyi kesintiye uğratırsa, son tam işlevsel yazılım sürümü geri yüklenmeli ve FDAS başarısız indirmeden önceki gibi çalışmalıdır.
- Yazma işlevlerinin yürütülmesinden sonra, FDAS'ın etkilenen işlevleri test edilecektir. Ayrıca FDAS'ın dokümantasyonu güncellenecektir.

5.2 Sabit Yangın Söndürme Sistemleri (FFFS)

- Kontrol: Uzaktan söndürme tetikleme gibi işlemler yasaktır. Tüm kritik işlemler fiziksel doğrulama gerektirir.
- Yazma: Sistem değişiklikleri yalnızca saha güvenliği sağlandıysa yapılabilir. Bağlantı kaybı veya başka bir iletim hatası nedeniyle indirme işlemi kesintiye uğrarsa, son tam işlevsel yazılım sürümü geri yüklenmeli ve FFFS, başarısız

indirme işleminden önceki gibi çalışmalıdır.

5.3 Duman ve Isı Kontrol Sistemleri (SHCS)

- Kontrol: Fan, damper ve duman tahliye sistemlerinin uzaktan kilitlenmesi risklidir; yalnızca test modunda yapılmalıdır.
- Yazma: Yapılandırma değişikliklerinde senaryo bazlı test yapılmalıdır. Yazma işlevlerinin yürütülmesinden sonra, SHCS'nin etkilenen fonksiyonları test edilecektir. Ayrıca, SHCS'nin dokümantasyonu güncellenecektir.

5.4 Acil Anons ve Ses Sistemleri (ESS)

- Kontrol: Sesli uyarı sıfırlama işlemleri, sahadaki durum kontrolü sonrası yapılabilir.
- Yazma: Ses senaryolarında değişiklik yapılırsa, test yayınları zorunludur.

5.5 İzinsiz Giriş ve Hırsız Alarm Sistemleri (I&HAS)

- Kontrol/Yazma: Sistem "devrede" iken (aktif alarmda) uzaktan hiçbir müdahale yapılamaz.
- Tüm uzaktan işlemler sadece eğitimli personel ve belirli zaman aralıklarında mümkündür.

5.6 Video Gözetim Sistemleri (VSS)

- Yazma: Görüntü çözünürlüğü, kayıt süresi gibi parametrelerde yapılacak değişiklikler tüm ağ yükü göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

5.7 Elektronik Geçiş Kontrol Sistemleri (EACS)

- Yazma: Kart veritabanı ve erişim seviyeleri değişikliği sonrası test geçişi yapılmalıdır. Geri alma planı hazır olmalıdır.

5.8 Dış Çevre Güvenlik Sistemleri (EPSS)

- Yazma: Perimetre algılayıcı konfigürasyonları sadece sistemde geçici yedek koruma tedbirleri varsa değiştirilebilir.

5.9 Sosyal Alarm Sistemleri

- Yazma: Her değişiklik sonrası bakım testi zorunludur. Kullanıcıların etkilenmemesi için ön bildirim yapılmalıdır.

5.10 Kombine/Entegre Sistemler

- Farklı sistemlerin bir arada çalıştığı yapılarda her sistemin kendi güvenlik düzeyi korunmalıdır.
- Çakışma durumunda daha sıkı olan kural önceliklidir.

5.11 Yönetim Sistemleri (BMS vb.)

- Uzaktan erişilen merkezi yönetim sistemleri, bağlı tüm alt sistemlerin güvenliğini sağlamakla yükümlüdür.
- Kritik alarm ve hata durumlarında öncelikli müdahale ve kayıt mekanizmaları tanımlanmalıdır.

6. MEVZUAT VE STANDARTLARLA İLİŞKİ

EN 50710; EN 16763, EN 50131, EN 50518 gibi standartlarla birlikte çalışır. GDPR, EN 50710, yalnızca teknik değil; aynı zamanda hukuki ve düzenleyici çerçevelerle de uyumlu olacak şekilde geliştirilmiştir.[3] Bu nedenle, uzaktan servislerin uygulanması sırasında hem ilgili Avrupa mevzuatları, hem de teknik standartlar dikkate alınmalıdır.

6.1 Avrupa Mevzuatlarıyla Uyum

- Avrupa Hizmetler Direktifi (2006/123/EC): EN 50710, servis hizmetlerinin sınır ötesi yürütülebilmesini kolaylaştıran

bu direktifle uyumlu şekilde hazırlanmıştır.

- GDPR (2016/679/EU) – Genel Veri Koruma Tüzüğü: Uzaktan servis esnasında toplanan, iletilen veya kaydedilen kişisel verilerin korunmasına yönelik düzenlemeleri kapsar. EN 50710, bu düzenlemeye uyum sağlamak için oturum kayıtları, kullanıcı yetkilendirme ve veri şifreleme gibi güvenlik önlemlerini zorunlu kılar.
- Makine Direktifi (2006/42/EC) ve Alçak Gerilim Direktifi (2014/35/EU): Sisteme entegre ekipmanların donanımsal güvenliği bu direktiflerce belirlenmiştir.

6.2 İlgili Avrupa Standartları

Bkz. Tablo-3

6.3 Türkiye'deki Ulusal Yönetmeliklerle Uyumluluk

EN 50710'un Türkiye'de uygulanabilmesi için şu düzenlemelerle ilişkilendirilmesi gerekir:

- Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik
- Elektrik İç Tesisat Yönetmeliği
- Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) [4]
- Siber Güvenlik Rehberleri (TSE, BTK gibi otoritelerce yayımlanan)

Standart, ulusal teknik düzenlemelerle çelişmeyecek şekilde yapılandırılmıştır ve ihtiyaç duyulan durumlarda TSE tarafından uyarlama standardı yerelleştirilerek (TS EN 50710) olarak yayımlanabilir. Şu anda İngilizce olarak TSE web sayfasından standarda erişilebilir.

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

EN 50710 standardı, yangın güvenliği ve güvenlik sistemlerinde uzaktan erişim kavramını teknik bir zemin üzerine oturtarak, hem servis sağlayıcılar hem de kullanıcılar için belirgin güvenlik, verimlilik ve yasal uyum avantajları sunmaktadır.

7.1 Standardın Sektöre Katkıları

- Geliştirilmiş Güvenlik: Kimlik doğrulama, yetkilendirme, loglama ve şifreleme gibi çok katmanlı güvenlik önlemleri ile sistem erişimi kontrol altına alınır.
- Hizmet Kalitesinde Artış: Uzaktan arıza tespiti, yapılandırma desteği ve yazılım güncellemeleri ile müdahale süresi kısalır, servis kaynakları verimli kullanılır.
- Sürdürülebilirlik ve Maliyet Tasarrufu: Yerinde servis ihtiyacının azalması ile hem karbon ayak izi hem de ulaşım/iş gücü maliyetleri düşer.
- Sözleşmesel Netlik: Servis sağlayıcı ve müşteri rollerinin yasal olarak netleştirilmesi sayesinde sorumluluklar açıkça tanımlanır.

7.2 Türkiye'de Uygulama Durumu ve Zorluklar

Türkiye'de henüz EN 50710 standardının bilinirliği sınırlıdır ve yaygın uygulamalar gözlenmemektedir. Başlıca nedenler:

- Yerli firmaların çoğunun bu standarda henüz adapte olmamış olması
- Eski tip yangın ve güvenlik sistemlerinin uzaktan erişim altyapısına sahip olmaması
- KVKK ile çelişme endişeleri nedeniyle bazı kurumların uzaktan erişime kapalı olması
- Servis sağlayıcıların insan kaynağı ve yazılım entegrasyonu konusunda hazır olmaması

Ancak dijitalleşme politikalarının yaygınlaşması, bina otomasyonlarının

artması ve büyük projelerde uzaktan denetim ihtiyacının çoğalması, bu standardın uygulanmasını kaçınılmaz kılmaktadır.

7.3 Geleceğe Yönelik Öngörüler

- 5G ve düşük gecikmeli haberleşme altyapıları ile uzaktan erişimin gerçek zamanlı hale gelmesi mümkündür.
- Yapay zekâ destekli kestirimci bakım sistemleri, EN 50710 çerçevesinde yapılandırılarak proaktif servis stratejilerinin önünü açacaktır.
- TSE tarafından yayımlanacak yerelleştirilmiş uyarlama versiyonu (TS EN 50710), bu standardın Türkiye'de resmi olarak uygulanabilirliğini artıracaktır.

Sonuç Olarak;

EN 50710, yalnızca teknik bir düzenleme değil; aynı zamanda dijitalleşen bina güvenliği sistemlerinin geleceğine yön veren bir çerçevedir. Uzaktan servislerin kontrolsüz, güvencesiz ve belgesiz yapılmasının önüne geçerek, hem kullanıcıları hem de sağlayıcıları koruyan bir yapı sunar.

Bu bildiride, standardın kapsamı, uygulama esasları, sistem bazlı kuralları ve Türkiye'deki yansımaları detaylı şekilde ele alınmıştır. Sektörde farkındalığın artmasıyla birlikte, bu standardın daha geniş bir uygulama alanı bulacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **EN 50710:2021 Requirements for the provision of secure remote services for fire safety systems and security systems,** European Committee for Electrotechnical Standardization, Yayın Tarihi: 24.09.2021
[2] **Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin İç Pazarda Hizmetler (SIM) Direktifi (2006/123/EC),** Official Journal of the European Union, Yayın Tarihi: 27.12.2006
[3] **Avrupa Birliği Genel Veri Koruma Tüzüğü (GDPR) (2016/679/EU),** Official Journal of the European Union, Yayın Tarihi: 04.05.2016
[4] **Kişisel Verilerin Korunması Kanunu,** Kanun No:6698, Resmi Gazete 29677, Yayın Tarihi: 07.04.2016
[5] **EN50710 Interpretation sheet,** Euralarm - European Fire Protection, Alarm and Security Industry Association , Yayın Tarihi: 09.05.2025

Tablo 1 - Tanımlamalar

Terim	Tanım
Uzaktan Erişim (Remote Access)	FSSS sistemlerine uzaktan okuma, kontrol veya yazma işlevlerinin uygulanabilmesine olanak sağlayan mantıksal bağlantı.
RAI (Remote Access Infrastructure)	Uzaktan erişimi mümkün kılan altyapı: RAC (istemci), RAS (sunucu), RAE (uç nokta) ve ilgili ağ bileşenlerinden oluşur.
RAS (Remote Access Server)	Uzaktan erişimi sağlayan, bağlantı oturumlarını yöneten merkez sistem.
RAC (Remote Access Client)	Servis sağlayıcının, uzaktan erişimi gerçekleştirdiği istemci arayüzü (örn. laptop).
RAE (Remote Access Endpoint)	Servis verilen sistemin bulunduğu sahadaki erişim noktasıdır; FSSS ile doğrudan bağlantılıdır.
Yazma Fonksiyonu	Sistem üzerinde değişiklik yapan işlemler: yazılım güncelleme, konfigürasyon değiştirme, vb.
Kontrol Fonksiyonu	Komut temelli uzaktan işlemler: test etme, sıfırlama, yeniden başlatma gibi değişiklik içermeyen işlemler.
Kimlik Doğrulama (Authentication)	Sisteme bağlanmak isteyen kullanıcının kimliğinin doğrulanması süreci.
Yetkilendirme (Authorization)	Kimliği doğrulanmış kullanıcıya sadece izin verilen işlevlerin atanması süreci.

Tablo 2 - Kısaltmalar

Kısaltma	Açılımı
FSSS	Fire Safety and/or Security Systems (Yangın ve/veya Güvenlik Sistemleri)
FDAS	Fire Detection and Alarm Systems
FFFS	Fixed Fire Fighting Systems
SHCS	Smoke and Heat Control Systems
ESS	Emergency Sound Systems
I&HAS	Intrusion and Hold-up Alarm Systems
VSS	Video Surveillance Systems
EACS	Electronic Access Control Systems
EPSS	External Perimeter Security Systems
RSP	Remote Service Provider
MARC	Monitoring and Alarm Receiving Centre
SPT	Supervised Premises Transceiver

Tablo 3 - İlgili Avrupa Standartları

Standart	İçeriği	EN 50710 ile İlişkisi
EN 16763	Yangın ve güvenlik sistemleri için hizmet sağlayıcı yeterlilikleri	EN 50710, bu hizmetlerin uzaktan yapılmasına ilişkin ek güvenlik çerçevesi sunar.
EN 50131	İzinsiz giriş ve hırsız alarm sistemleri	Bu sistemlerin uzaktan kontrol gerekliliklerini belirler, EN 50710 ile bütünleşir.
EN 50136	Alarm iletim sistemleri	Uzaktan servis altyapısında iletim güvenliği açısından dikkate alınmalıdır.
EN 50518	İzleme ve Alarm Alma Merkezleri	EN 50710, MARC kapsamındaki işlemler hariç olmak üzere bu merkezlerle uyumlu çalışmayı amaçlar.
EN ISO/IEC 27001/27002	Bilgi güvenliği yönetim sistemleri	Uzaktan bağlantı, kullanıcı yönetimi ve veri korumasında uygulanması önerilir.

Tablo 4 - EN50710 Yorumlama Tabloları [5]

	Gereksinim	Bölüm	RAI'nin ürün özelliği	FSSS'nin ürün özelliği	Organizasyon süreçleri	Yorum ve öneriler	Kontrol
Servis Organizasyonu	Eklenen riskin değerlendirilmesi	4.1			x	Genel olarak, uzaktan hizmetlerin kullanımıyla ortaya çıkan yeni riskler, siber güvenlik ve veri korumasıyla ilgili olabileceği gibi, hizmeti gerçekleştiren kişinin saha korumasını olumsuz etkileyecek bir hatasıyla da ilişkili olabilir. Siber Güvenlik, ilgili tüm sertifika ve belgelerin mevcut olmasıyla ele alınmalıdır (bkz. 4.3). Hizmet sırasında oluşabilecek bir hatadan kaynaklanan riskler, hizmetlerin yetkili (RAI, farklı izinlere sahip Erişim Seviyeleri sunacaktır) ve eğitimli profesyoneller tarafından gerçekleştirilmesi sağlanarak ele alınabilir. Bu profesyoneller, yazma veya komut hizmetleri durumunda, sahada veya planlanan uzaktan hizmetler hakkında uygulama öncesinde bilgilendirilmiş saha destek ekibi eşliğinde çalışır.	
	Uzaktan hizmet süreçleri, teknolojileri ve iletişim yolları güvenli ve güvenilirdir (tasarım, dokümantasyon ve bütünsel test)	4.1	x		x	Çözümün sahada kurulum anındaki güvenlik seviyesinin dokümantasyonuna ek olarak, RSP altyapının güvenliğini sağlamak için mevcut yazılım güncellemelerinin yüklenmesini sağlamalıdır.	
	Uzaktan hizmetlerin işletimi bilgilendirilecektir (müşteri, hizmet sağlayıcı*, MARC*, müdahale yetkilileri*)	4.6	x		x	İlgili paydaşları (en azından müşteriyi) herhangi bir hizmet hakkında yazılı veya komut modunda bilgilendirmek için izlenebilir ve denetlenebilir bir yöntem kullanılması önerilir. Bu, örneğin şunlar olabilir: - e-posta - SMS - mobil uygulamada bildirim	
	Uzaktan hizmetin gerçekleştirilmeden önce etki değerlendirmesi	4.6			x	Sistemde bir alarm durumu mevcutsa, en azından uzaktan servis yapılmamalıdır. Ancak, uzaktan bağlantı yalnızca okuma modunda etkin kalabilir. Yazma veya komut hizmetleri durumunda sahada bir kişinin bulunması ve bu kişinin en azından (örneğin mobil cihaz aracılığıyla) uzaktaki teknisyenle etkileşim kurarak sorun durumunda müdahale edebilecek donanıma sahip olması önerilir.	
	Uzaktan hizmet sırasında risk değerlendirmesiyle uyumlu azaltma önlemleri	4.6			x	Yazma veya komut modunda herhangi bir uzaktan hizmet için, yazma veya komut hizmetleri durumunda bir kişinin yerinde bulunması ve bu kişinin en azından sorun durumunda tepki vermek üzere uzaktaki teknisyenle etkileşime girebilecek (örneğin mobil cihaz...) yetenekte ve donanımda olması önerilir.	
	Uzaktan hizmet gerçekleştirildikten sonra işlevsellik kontrolü	4.6			x	RSP'nin uygulanabilir süreci, teknisyenin uzaktan hizmetleri sonlandırmadan önce sistemin tamamen çalışır durumda olduğunu doğrulaması gerektiğini açıkça belirtmelidir. Ayrıca, RSP'nin uygulanabilir süreci, ulusal veya yerel yönetmeliklerin gerekliliklerini (örneğin, bir güncellemeden sonra sistemin yeniden test edilmesi) dikkate almalıdır.	

	Uzaktan hizmet gereksinimleri, teknik uygulama yönergeleriyle birlikte uygulanmalıdır.	4.4			x	Genel olarak, tüm uzaktan hizmet süreçleri standart hizmet faaliyetlerine eşdeğer olmalıdır. Hizmetin uzaktan doğası gereği, bazı faaliyetler yalnızca sahada bir kişinin bulunmaması nedeniyle eşdeğer bir şekilde gerçekleştirilebilir. Örneğin, sahada gerçekleştirilen bir hizmet faaliyetinin "kağıt tabanlı" bir kayıt defterine girişi, dijital bir denetim izi girişiyle değiştirilir.	
RAI	RAI periyodik test, bakım ve güncelleme	4.1	x		x	RSP, altyapının güvenliğini sağlamak için mevcut yazılım güncellemelerinin yüklenmesini sağlamalıdır. Bu, RSP'nin RAISP tarafından sağlanan güncellemeleri yüklemesi gereken uç nokta (RAE) ve istemci (RAC) için geçerlidir. RAS işlevselliğinin iki düzeyde oluşturulduğu anlaşılmaktadır: BT altyapısı (örneğin: veri merkezi ve web servisleri) ve belirli uzak işlevleri sağlayan Uygulama Yazılımı. BT altyapısı düzeyinde bu gerekliliğe uyum, BT altyapısının alt yüklenici tarafından yaptırılması durumunda ilgili maddelerle sağlanmalıdır. Uygulama yazılımının uyumluluğu RAISP'nin sorumluluğundadır. Bağlantının kendisi, bağlantı kaybı ve bağlantının geçerliliği açısından otomatik ve periyodik olarak kontrol edilmelidir: bu, bağlantı sorunlarının izlenmesi ve buna göre tepki verecek süreçlerin mevcut olması sağlanarak yapılabilir. RAI'nin bir kısmı son müşteri tarafından sağlanan bağlantıya dayanıyorsa, hizmet sözleşmesinde müşterinin ağ bileşenlerini (yönlendiriciler, anahtarlar vb.) denetleme ve yükseltme sorumluluğunun olduğu belirtilmelidir.	
	Hizmet sağlayıcı içinde RAI kullanımı eğitimi	4.1			x	Özel eğitim ve yeterlilik değerlendirme süreçleri belgelenmelidir.	
	Son teknoloji güvenlik önlemleriyle (kimlik doğrulama, yetkilendirme, şifreleme, ikame koruması, olay kaydı, izlenebilirlik) desteklenen RAI güvenliği.	4.3	x		(x)	RAI, sistem yöneticisi tarafından ihtiyaç duyulduğunda verilip iptal edilebilen farklı kullanıcılar için farklı izinlere sahip erişim hakları yönetimi sunmalıdır. RAI, kullanıcıları örneğin kimlik bilgileri aracılığıyla tanımlayabilmelidir. RAI içindeki iletişim şifrelenmeli (RAC-RAS ve RAS-RAE), yazılım bileşenlerinin (imzalı görüntüler veya benzeri) değişimine karşı korunmalıdır. RAI ile ilgili uzaktan işlemler (örneğin, kullanıcı erişimi verme veya iptal etme, kullanıcı ekleme veya kaldırma, RAI yapılandırmalarını değiştirme vb.) kaydedilmeli ve her olay, zaman damgası da dahil olmak üzere kullanıcı kimliğine kadar izlenebilmelidir. FSSS işlemlerinin günlüğe kaydedilmesi, bu RAI denetim izinin bir parçası olarak değil, ilgili FSSS standartlarına göre kaydedilmelidir.	

	RAI physical and logical connections monitored for cyber security.	4.3	x		(x)	- Fiziksel bağlantı, bağlantı kaybı üzerinden izlenebilir ve olası bağlantı kayıpları RAISP ve RSP'ye bildirilmelidir. - Mantıksal bağlantılar, kimlik doğrulama/yetkilendirme hataları ve mesaj doğrulama hataları için güvenlik günlüğü ile izlenebilir. Günlük, kararlaştırılan bir süre boyunca RAS'ta saklanmalıdır.	
RAS	RAS ve ilgili uygulamalar -FSSS tesisinde veya -MARC'ta (EN50518 sertifikalı) veya -veri merkezinde (EN50600 veya eşdeğeri) bulunmaktadır. Hizmet Kuruluşları: EN 16763 sertifikalıdır.	4.3	x		x	Küresel olarak mevcut büyük web servisleri, EN 50600 standardına uygunluk iddiasında bulunmaz ve EN 50600'e göre bir sertifika alma imkânı da yoktur. Euralarm'ın bulut hizmetleriyle sözleşme yapma kılavuzu1, EN 50600 ve ISO 22237 hakkında açıklamalar sunar ve diğer referansların eşdeğerliğini değerlendirmeye olanak tanır. 1 https://www.euralarm.org/resource/guideline-on-contracting-cloud-services-for-secure-remote-access-to-alarm-systems-and-for-secure-alarm-transmission-pdf.html	
	FSSS'ye yalnızca RAS aracılığıyla uzaktan erişim	4.3	x		x	RAS kullanımı, güvenli uzaktan hizmetler sağlamak için gerekli tüm koruma ve izlenebilirlik mekanizmalarının (kimlik doğrulama/yetkilendirme, günlükler vb.) mevcut olmasını sağlar. Örneğin, FSSS ile RAC arasında uzak bir eşler arası bağlantı kullanılıyorsa durum böyle olmayabilir.	
RAC	RAC'ye erişim yetkisi	4.3	x		x	RAC, bir veya daha fazla FSSS'nin işlevlerine uzaktan erişim sağlamak için kullanılan yazılım ve/veya donanımdır. Erişimi, farklı erişim haklarına izin veren IAM (Kimlik ve Yetkilendirme Yönetimi) sistemine dayalı olmalıdır. Her kullanıcı benzersiz şekilde tanımlanmalıdır.	
	RAC oturumlarının otomatik olarak sonlandırılması	4.3	x		x	Otomatik oturum sonlandırma işleminin amacı, uzaktan hizmeti gerçekleştiren servis teknisyeninden farklı bir kullanıcının yanlışlıkla veya kasıtlı olarak yerinde sistemi bozmasını veya FSSS verilerine erişmesini önlemektir. Bu, aşağıdaki gibi çeşitli yollarla yapılabilir: - Uzaktan hizmet istemcisi uygulamasından kullanıcının oturumunu kapatın. Yerinde sisteme bağlantı hala kuruludur, ancak kullanıcının uzaktan erişime devam etmek için uzaktan hizmet istemcisi uygulamasında yeniden kimlik doğrulaması yapması gerekir. - İşletim sistemi oturum kilidi veya sonlandırma: Yerinde sisteme bağlantı hala etkindir, ancak örneğin Windows oturumu (RAC işlevinin yürütüldüğü yer) kilitlidir ve kullanıcının uzaktan hizmet uygulamasını kullanabilmek için Windows kimlik bilgilerini yeniden girmesi gerekir. Bu durumda, sistemin otomatik kilitlenmesinin yapılandırması RSP sürecinde açıklanmalıdır. RSP kuruluşu ayrıca, aynı Windows istemcisine erişimi olan farklı kullanıcılar için RAI yetkilendirmelerinin uyumsuzluğunu önlemek amacıyla, Windows ortamında RAC çalıştıran bir mobil cihazın yalnızca bir servis teknisyeni tarafından kullanıldığından/erişilebildiğinden emin olmalıdır.	

	Uzaktan hizmete güvenli erişim: - Belirli bir işlem için yetkili kişiler, liste periyodik olarak gözden geçirilir - Erişim terminalleri uygun konumdadır - Oturum otomatik olarak sonlandırılır - RAS bağlantısı güvenlidir	4.5	x		x	RSP'de özel süreçler bulunmalıdır: - RSP'nin, örneğin kullanıcı haklarını vermek, iptal etmek veya değiştirmek için etkin kullanıcı yönetimi süreçlerine sahip olması gerekir. - Uzak bir konumda bir RAC kullanımı, örneğin özel bir servis merkezinin yanı sıra evden veya hatta sahada çalışmak anlamına da gelebilir. İkinci durumlarda, servis teknisyeninin, gözetimsizken sistemi açık bırakmaması ve yetkisiz kişilerin RAC'ye erişememesini sağlaması için eğitilmesi gerekir. Bu, oturum sonlandırma zaman aşımları için uygun ayarların yanı sıra RAC gözetimsiz bırakıldığında etkin RAC kilitleme özelliğiyle eklenerek, ekranda doğrudan görüntülemeye karşı koruma sağlanarak sağlanabilir. - Oturum sonlandırma için yukarıdaki maddeye (satır 16) bakın. - Yetkilendirme için yukarıdaki maddeye (satır 11) bakın.	
	Okuma/kontrol/yazma işlemlerini tanımlayın ve buna göre izinleri ve kısıtlamaları atayın	4.7	x		x	RSP, hizmetlerin yetkili ve eğitimli profesyoneller tarafından gerçekleştirilmesini sağlamalıdır. RAI ve FSSS, kullanıcı veya kullanıcı grubu başına farklı izinlerle erişim hakları yönetimi sunmalıdır. FSSS'nin (kısmen) çalışmamasına neden olabilecek yazma veya kontrol işlevlerinin yürütülmesi durumunda, eğitimli profesyonel sahada bulunmalı veya planlanan uzaktan hizmetler hakkında uygulama öncesinde bilgilendirilmiş bir saha destek ekibi eşliğinde olmalıdır. Yazılım güncellemelerinin önceki duruma (örneğin FDAS, FFFS) geri alınması gerekebilir. Bu işlem, FSSS'nin kendisi (böyle bir ürün özelliği mevcutsa) veya sahada bulunan eğitimli bir profesyonel tarafından gerçekleştirilebilir. Not: Bir FSSS'nin yapılandırmasını değiştiren yazma işlevleri, geri alma gereksinimi kapsamında değildir.	
Müşteri	Müşteriye uzaktan hizmetler hakkında bilgi verildi	4.1			x	Uzaktan hizmet sonucunda elde edilen bilgiler, talep edilmesi halinde müşteriye sunulmalıdır.	

	Hizmet kuruluşu ile müşteri arasındaki sözleşmesel anlaşma	4.2			x	Hizmet sözleşmesi, 4.2. bölümde listelenen tüm unsurları ele almalıdır. "4) Sistem ve site verilerinin nerede ve nasıl işlendiği ve depolandığı konusunda şeffaflık;": "Nerede" ifadesi, verileri depolayan ve işleyen sunucuların nerede bulunduğunu ifade eder. "Nasıl" ifadesi, verileri depolamak, işlemek ve güvenliğini sağlamaktan hangi kuruluşların sorumlu olduğunu ifade eder: uzak hizmet sağlayıcısı veya üçüncü taraf. "6) Kimlik bilgilerinin kullanımı ve işlenmesi;": Hizmet şirketi, burada kişisel tanımlayıcıların ve erişim bilgilerinin nasıl yönetildiğini açıklamalıdır. En azından: - Kimlik bilgilerinin her çalışan için benzersiz mi (önerilen) yoksa her çalışan grubu için benzersiz mi olduğu; - Kimlik bilgileri değişikliklerine ilişkin politika.	
	Kontrol ve yazma fonksiyonlarının başlangıcında ve sonunda istemciyle iletişimin kanıtı	4.4	x	(x)	x	Kontrol veya yazma işlevleri uzaktan gerçekleştirilecekse, istemcinin uzaktan hizmetlerin yürütülmesinin başında ve sonunda bilgilendirilmesi gerekir. Bu kanıtlanmış iletişim, örneğin RAI'de bulunan bir mesajlaşma işlevi (örneğin, bir mobil uygulamada anlık bildirim), SMS veya e-posta gibi standart iletişim yolları veya FSSS'nin kendisi aracılığıyla yapılabilir. Bu iletişim yalnızca bilgi amaçlı olarak görülebilir. Sözleşmelerde açıkça aksi kararlaştırılmadıkça, istemcinin uzaktan erişim izni vermesi gerekmez. Okuma işlevleri için, bu iletişim varsayılan olarak gerekli değildir ve bu, hizmet sözleşmesi aracılığıyla müşteriyle kararlaştırılabilen isteğe bağlı bir işlemdir. Hizmet öncesinde ilgili paydaşları (en azından müşteriyi) yazma veya komut modundaki herhangi bir hizmet hakkında bilgilendirmek için izlenebilir ve denetlenebilir bir yöntem kullanılması önerilir.	

GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDE TRANSFORMATÖRLERİN GÜÇ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI

Arda DEMİR

ELTAŞ Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş

Aliağa Organize Sanayi Bölgesi, No:5, 35800 Aliağa, İzmir, Türkiye

AR-GE Departmanı

arda.demir@eltas.com.tr

Özet

Günümüzde artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler, enerjiye olan talebi ciddi biçimde artmaktadır. Bu artan talep karşısında fosil yakıtların çevresel zararları ve tükenebilir olması, yenilenebilir enerji kaynaklarını daha da ön plana çıkarmaktadır. Özellikle güneş enerjisi, temiz ve sürdürülebilir yapısıyla enerji üretiminde önemli bir alternatif haline gelmiştir. Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan transformatörler, klasik dağıtım transformatörlerine kıyasla farklı çevresel ve teknik şartlara uygun olarak tasarlanır. Düşük kayıplı çalışma, zorlu coğrafi koşullara dayanıklılık, minimum bakım gereksinimi ve uzun servis ömrü gibi kriterler, bu trafoların temel tasarım öncelikleridir. Ancak bu kriterlerin yanı sıra, güç optimizasyonu da verimlilik ve maliyet etkinliği açısından ön plana çıkan önemli bir faktördür. Transformatör tasarımında yapılan optimizasyon çalışmaları sayesinde hem ilk yatırım maliyetleri hem de işletme giderleri azaltılabilir. Bu da yenilenebilir enerji santrallerinin toplam verimliliğini artırırken sistem ömrünü de uzatmaktadır.

1.GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfus ve sanayi yatırımları, enerjiye olan talebi her yıl daha da artırmaktadır. Enerji tüketimi ile üretimi arasındaki farkın büyümesi, yeni ve sürdürülebilir enerji üretim çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Fosil yakıtların hem sınırlı oluşu hem de çevreye verdikleri zararlar dikkate alındığında, alternatif enerji kaynaklarının önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Bu kapsamda, güneş enerjisi santralleri küresel ölçekte hızla yaygınlaşmakta ve enerji arzında önemli bir paya sahip olmaya başlamaktadır.

Ülkemizde de benzer bir gelişim söz konusudur. 2024 yılı verilerine göre Türkiye'nin toplam kurulu gücünün %7,51'si güneş enerjisine dayanırken, bu oran 2025 yılı ağustos ayı itibarıyla %9,7 seviyesine ulaşmıştır [1]. Güneş enerjisi santrallerinin sayısındaki artış, bu santrallerde kullanılan teknik ekipmanlara olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Bu ekipmanların başında yer alan transformatörler, sadece enerji iletiminde değil, sistem verimliliği ve güvenliği açısından da kritik rol oynamaktadır. Güneş enerjisi santrallerinde kullanılan transformatörler, klasik dağıtım transformatörlerinden farklı olarak; santralin bulunduğu coğrafi ve iklimsel koşullara uygun, düşük kayıplı ve

kompakt yapıda olacak şekilde özel olarak tasarlanmaktadır.

2.GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDE KULLANILAN TRANSFORMATÖRLER

Güneş enerjisi santrallerinde üretim yalnızca günün belirli saatlerinde gerçekleştiğinden, transformatörler belirli aralıklarda yük altında çalışmaktadır. Türkiye koşullarında bu süre ortalama 7,5 saat civarındadır [2]. Aydınlığın olmadığı zamanda ise, boşta çalışma halen devam etmektedir. Bu nedenle, güneş santrallerinde kullanılan transformatörlerin boşta çalışma kayıplarının (no-load losses) mümkün olan en düşük seviyede tutulması büyük önem taşımaktadır. Tasarım sürecinde bu durum dikkate alınarak, optimum manyetik devre yapısı ve düşük kayıplı malzeme kullanımı ön planda tutulur.



Şekil 1. Hermetik tip transformatör.

Güneş santralleri gibi enerji kaynaklarında, gerilimde oluşabilecek ani değişimler ve evirici yapılarından dolayı meydana gelen harmonik bozunumlar söz konusudur. İletim/dağıtım şebekelerinin bu etkilerden korumak için transformatörlerin primer ve sekonder sargıları arasına yerleştirilen topraklı elektrostatik ekranlar, yüksek geçiren filtre görevi görerek iletim şebekesini bozunumlardan ve gerilim transferinden korur. Bu tasarım detayı, özellikle evirici kaynaklı harmonikler açısından önem taşır.

Manyetik akı yoğunluğu, kayıplar ve gürültü açısından önemli bir parametredir. Yüksek akı yoğunlukları daha kompakt tasarımlar sağlasa da boşta kayıplar ve gürültü açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bununla birlikte, evirici çıkış gerilimindeki DC offset gerilimine bağlı olarak nüvenin satürasyon riskini de oldukça yükseltmektedir. Satürasyon riskini önlemek için akı yoğunluğu genellikle 1,7 Tesla üzerine çıkarılmamalıdır. Akı yoğunluğu daha düşük seviyelerde seçilerek hem yüksek verim hem de düşük ses seviyesi sağlanır. Verimin daha da artırılması istenirse, daha yüksek kalitede nüve sacları da kullanılabilir.

Güneş santrali transformatörlerinde genellikle “Dy” (üçgen-yıldız) bağlantı grubu tercih edilir. Ölçü amaçlı kullanılmak üzere nötr terminaline erişim ihtiyacı olduğu hallerde Dyn olarak da kullanılabilir. Ancak bu koşulda, nötr terminali topraklanmaz ve açık bırakılır.

Güneş enerjisi santralleri, yerleşim bölgelerinden uzak olabilmektedir. Kullanılan transformatörlerin yapıları da bakım ihtiyacını en aza indirmek için

hermetik tip olarak tercih edilir. Hermetik yapı sayesinde transformatör yağının dış ortamla teması engellenerek daha uzun ömürlü olması sağlanır. Aynı zamanda bakım ihtiyacı ortadan kalktığı için işletme maliyetleri düşürülmesi sağlanır.

3.GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDE KULLANILAN TRANSFORMATÖRLERDE GÜÇ OPTİMİZASYONU HESAPLARI

IEC 60076 standardındaki gereksinimler doğrultusunda, transformatörlerin anma gücünü sürekli taşıyacağı dikkate alınarak tasarım kriterleri belirlenir.

Günümüzdeki uygulamalarda yaygın olarak başvurulan yaklaşım, 2,5 MWp güce sahip bir santralde, güç faktörünün 1 olduğu kabul edilirse, 2,5MVA gücünde bir trafo seçilmesi şeklindedir. Seçilen bu trafo IEC standartlarını ve işletme koşullarını sağlamaktadır. Bununla birlikte, transformatörden elde edilen faydaya kıyasla maliyeti çok yüksek bir komponent olmaktadır.

Fotovoltaik tepe gücün altında bir transformatör gücü seçilmesi, cihazın ekonomik ömrünü önemli derecede etkilemeyeceği gibi, yatırım maliyetini düşürmektedir. Bunun anlamı, aydınlanma süresi içinde tepe gücün görüleceği 3-4 saat için transformatör anma gücünün üzerinde yüklenecektir. Bu şekilde yüklenen transformatördeki sıcaklık limitleri, standartlarda verilen aşırı yükleme koşulları çerçevesinde değerlendirilir. IEC 60076-7 standardında aşırı yükleme kategorisine giren bu durumdaki sıcaklık artış limitleri verilmektedir [4]. Yine aynı standart içerisinde, selüloz bazlı izolasyon kağıdının yaşlanma davranışına ait ömür hesabında izlenmesi gereken yöntemler de yer almaktadır.

Transformatörlerde ortam sıcaklığı hem yağ hem de ortalama sargı sıcaklık değerlerine etkiye sahiptir. Maksimum ortam sıcaklık değerine bağlı olarak sargı ve yağ sıcaklık artış değerleri sınırlanmaktadır. Örneğin 40 °C ortam sıcaklığı için sırasıyla maksimum yağ ve sargı sıcaklık artışları 60 / 65 K olacaktır. Ancak ortam sıcaklığı 40 °C yerine 50 °C derece olduğu durumda maksimum yağ ve sargı sıcaklık artış değerleri 50 / 55 K olacaktır [3]. Tablo 1'de belirtildiği üzere kağıt izolasyonu yaşlanma katsayısı yükseldikçe sargıların Hot-Spot sıcaklığı yükselmektedir.

Tablo 1. IEC 60076-7'ye göre Hot-spot sıcaklık değerine bağlı olarak yaşlanma oranları [4].

θh °C	Kağıt İzolasyon (V)	Termal güçlendirilmiş kağıt (V)
80	0,125	0,036
86	0,25	0,073
92	0,5	0,145
98	1	0,282
104	2	0,536
110	4	1
116	8	1,83
122	16	3,29
128	32	5,8
134	64	10,1
140	128	17,2

(Tabloda yaşlanma hesaplarında referans olarak kullanılan sıcaklıklar için kağıt izolasyonda 98 °C, termal güçlendirilmiş kağıtta 110 °C için verilmiştir.)

Aşırı yüklemeye ait durumlarda, transformatördeki sıcaklık değerleri dikkate alınır ancak selüloz bazlı izolasyon malzemesinin ömrü dikkate alınmamaktadır. Ancak, güneş enerjisi santralleri için kasıtlı ve düzenli olarak aşırı yüklenen transformatörlerin izolasyon ömürleri tasarım aşamasında dikkate alınarak hızlı yaşlanmanın önüne geçilen transformatörler üretilebilir. ONAN tip soğutmada aşağıdaki formül 1'e göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta\theta h = \Delta\theta o + H \times g \qquad (1)$$

(Burada, $\Delta\theta h$: Sargı tepe sıcaklık noktası ile kazan içindeki üst yağ sıcaklığı arasındaki fark, $\Delta\theta o$: Tepe yağ sıcaklık artışı, H: Hot-spot faktörü, g : Maksimum sargı gradyanını ifade etmektedir)

IEC 60076-7 standardına göre incelenirse: Dağıtım tipi transformatörlerde izin verilen aşırı yüklenme durumları ile maksimum sıcaklık değeri 120 derecedir (Tablo 2.)

Standart tip dağıtım transformatörlerinde kısa devre empedansı 8'den küçük ise aşırı yüklenme durumları için Hot-Spot faktörü (H) 1,1 olarak kabul edilmektedir. Orta ve büyük güçlü transformatörler için H=1,3 kabul edilmektedir [4].

4.GÜÇ OPTİMİZASYONU ÖRNEK ÇALIŞMASI

2500 KVA 34,5/0,8 kV güç ve gerilime, Dy1 bağlantı grubuna sahip bir transformatörün çalışma süreleri ile birlikte verileri incelenirse;

Tablo 2. IEC 60076-7' ye göre normal yüklenme sıcaklık limitleri [4].

Yüklenme Çeşidi	Düşük Güçlü (Dağıtım Tipi) Transformatörler	Orta güç ve Güç tipi Transformatörler
Sargı ve selüloz izolasyon malzemesine temas eden metalik parçaların Hot-Spot limiti (°C)	120	120
Diğer metalik parçaların Hot-Spot limiti (Yağ, cam elyaf, aramid kağıda temas eden parçalar) (°C)	140	140
İç çekirdek Hot-Spot sıcaklığı (°C)	130	130
Kazan içindeki tepe yağ sıcaklığı (°C)	105	105

- 00.00-6.00 aralığında %20 sabit güçte
- 06.00-09.00 aralığında %100 güce yükselme aralığı
- 09.00-17.00 aralığında %100 sabit nominal güçte çalışma
- 17.00-20.00 aralığında %20 güce düşüş aralığı
- 20.00-00.00 aralığında %20 güçte sabit çalışma sürelerine sahiptir.

Transformatörün çalışması sırasında oluşacak kayıplar sonucunda ortalama 240-260 kWh değerinde enerji kaybı oluşacaktır. Verilen çalışma düzeninde transformatörün ömrünün yaklaşık olarak 320 yıl olacağı hesaplanarak öngörülmektedir (Formül 2) Eğer 2500 kVA gücündeki transformatörün nominal gücünden daha alçak güç değerleri alınarak, yüklenme hesabı yapılarak oluşacak kayıplar, transformatör ömrü, yatırım maliyeti incelenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda 2500 kVA nominal güce sahip bir transformatör yerine daha düşük güce sahip transformatörlerin kullanılması ilk yatırım maliyetini azaltırken, kayıp enerjiden kaynaklanan işletme maliyetlerini artırmaktadır. Artan sıcaklık nedeniyle sargı izolasyon ömrü de kısalmaktadır. Tablo 3'te bulunan hesaplamalar sonucunda 2500 kVA gücündeki bir transformatör yaklaşık 320 yıl ömre sahipken, 2200 kVA gücünde bu değer %70–80 oranında azalarak 80–90 yıla düşmektedir. Buna rağmen, ömrün hâlâ ortalama bir transformatörden yüksek olduğu söylenebilir. Yapılan analizler, yaklaşık %10–13 seviyesindeki aşırı yüklenmelerin ömrü kritik seviyenin altına düşürmeden sürdürülebilir olduğunu, daha yüksek yüklenmelerde ise izolasyon ömründe belirgin azalma yaşandığını göstermektedir. Sonuç olarak, düşük güçlü transformatörleri aşırı yükleyerek kullanmak ilk yatırım maliyetini azaltırken, işletme maliyetlerini ve izolasyon ömrü kaybını artırmaktadır.

$$V = 2^{(\theta h - 98)/6} \quad (2)$$

(Burada, θh: Hot-spot sıcaklık değeri, V: Yaşlanma değeridir.)

5.SONUÇLAR

Yenilenebilir enerji ihtiyacıyla birlikte transformatör uygulamaları gelişmektedir. Düşük kayıplı, minimum bakım ihtiyacı olan, kapsamlı koruma sistemlerine sahip ve tesis ihtiyaçlarına çözüm olan transformatör uygulamaları daha fazla yaygınlaşmalıdır. Bu sayede üretim santralleri daha verimli tesisler haline gelecektir. Bu tesisleri kurarken gücü daha optimize şekilde kullanmak adına daha düşük kayıplı sac kullanımı, günün belirli saatlerinde aşırı yükleme kullanımı ve buna bağlı olarak yaşlanma kontrolü ile solar tip transformatörlerin güçleri daha optimize edilmiş şekilde kullanılmalıdır. Maliyeti optimize hale getirme konusunda ise özellikle nüveden kaynaklanan boşta kayıpların yanı sıra yükte kayıpların görece daha az önem arz etmesinden kaynaklı iletkenden tasarrufa gidilmelidir.

KAYNAKLAR

[1]Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). *Yük tevzi bilgi sistemi*. Erişim tarihi: 26 Eylül 2025, https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf

[2]T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Erişim tarihi: 26 Eylül 2025, https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes

[3]Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (2018). *Orta gerilim güç transformatörleri teknik şartnamesi* (TEDAŞ-MLZ-95-013.B).

[4]International Electrotechnical Commission. (2018). *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers* (IEC 60076-7).

YEŞİL HİDROJEN MİKROŞEBEKESİNİN ADA MODU ÇALIŞMASI VE MATLAB/SIMULINK ANALİZİ

Yaşar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

hacer.sekerci@yasar.edu.tr

Gülşah Çolak
Yaşar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
gulsah.colak@yasar.edu.tr

Kazımdirik Mahallesi, Selçuk Yaşar Kampüsü, Üniversite Caddesi Ağaçlı Yol No: 37-39, 35100 Bornova/İzmir, Türkiye

ÖZET

Mikro şebekeler, yerel olarak enerji üretebilen, dağıtabilen ve yönetebilen güç sistemleridir. Akıllı şebeke topolojilerinde önemli bir yer tutan mikro şebekeler, dağıtılmış enerji üretiminin temel özelliklerine sahiptir. En dikkat çekici özelliklerinden biri ada modunda çalışma yeteneğidir; bu sayede ana şebekeden bağımsız olarak kritik yüklere elektrik sağlayabilir. Elektrik kesintisi, afet veya şebeke bozulmaları durumunda, güneş enerjisi, piller veya diğer kaynaklar yetersiz olduğunda dahi hidrojen depolama sistemleri sayesinde operasyon sürdürülebilir ve enerji güvenliği sağlanır. Hidrojen, mikro şebekeler gibi endüstriyel enerji sistemlerinde karbondan arındırma sürecinde etkin bir rol oynar ve 2050 net sıfır karbon hedeflerinde önemli bir çözüm olarak öne çıkar. Karbonsuz bir enerji geleceğine geçiş hızlanmakta, dünya genelinde iklim nötrlüğüne ulaşmak için yeşil enerjiye yönelim artmaktadır. Yeşil hidrojen, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji altyapısı sunar. Bu yüksek lisans tezi, yeşil hidrojen enerji teknolojisinin mikro şebeke entegrasyonu ile enerji sürdürülebilirliğinin simülasyonunu sunmaktadır. Yerel üretim ve tüketimin optimizasyonunu amaçlayan çalışma, yeşil hidrojenin mikro şebekelerdeki depolama, enerji transferi ve yedekleme rolünü ayrıntılı biçimde incelemektedir. Araştırma, enerji sektörünün dönüşüm sürecine katkı sağlamak isteyen araştırmacılar, endüstriler ve karar alıcılar için çevre dostu ve yenilikçi bir perspektif sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Sözcükler: *Mikro Şebekeler, Dağıtılmış Üretim, Yeşil Hidrojen, Ada Modu*

1. GİRİŞ

Enerji sektöründeki dönüşüm, fosil yakıtların sınırlı oluşu, artan enerji talebi ve küresel iklim değişikliğinin etkileri nedeniyle son yıllarda hız kazanmıştır. Bu dönüşüm, karbon salınımını azaltmaya ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmeye odaklanmaktadır. Mikroşebekeler, yerel üretim ve tüketimi optimize ederek merkezi şebekeye olan bağımlılığı azaltan, aynı zamanda enerji kesintilerine karşı ada modunda çalışabilen esnek sistemlerdir [1]. Ada modu, özellikle doğal afetler, kriz durumları ve ana şebeke arızalarında kritik yüklerin kesintisiz olarak beslenmesi için büyük önem taşır. Ancak bu modda, yenilenebilir kaynakların doğası gereği değişken üretim karakteristiği

nedeniyle üretim-tüketim dengesini sağlamak zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, güvenilir enerji depolama ve yönetim stratejileri gereklidir. Mikroşebekelerde bataryalar kısa süreli enerji depolama kapasitesi sağlarken, uzun vadeli enerji güvenliği ve mevsimsel dengeleme için hidrojen depolama stratejik ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır Yeşil hidrojen, suyun elektroliz yöntemiyle yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr vb.) kullanılarak üretilmesiyle elde edilir ve karbon salınımı oluşturmaz. Bu dönüşümün temel hedefi, karbon salınımını azaltmak, enerji arz güvenliğini artırmak ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırmaktır. Yeşil hidrojen, suyun elektroliz yöntemiyle güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen, karbon salınımı oluşturmadığı için çevre dostu bir enerji taşıyıcısıdır [2]. Mikroşebekeler, bu dönüşümün önemli bir parçası olarak, yerel üretim ve tüketimi optimize ederek merkezi şebekeye olan bağımlılığı azaltan, aynı zamanda enerji kesintilerine karşı ada modunda çalışabilen esnek ve yenilikçi sistemlerdir [3]. Ada modu, özellikle doğal afetler, kriz durumları, ani şebeke arızaları ve aşırı yüklenme senaryolarında kritik yüklerin kesintisiz olarak beslenmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Ancak bu modda, yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği değişken üretim karakteristiği ve talep dalgalanmaları nedeniyle üretim-tüketim dengesini sağlamak teknik açıdan karmaşık ve zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, güvenilir enerji depolama, yük yönetimi ve akıllı kontrol stratejileri mikroşebeke sistemlerinin sürekliliği için vazgeçilmezdir. Bu çalışmada, fotovoltaik (PV)-batarya-hidrojen entegrasyonlu bir mikroşebeke tasarlanmış, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve ada modundaki performansı detaylı biçimde analiz edilmiştir.

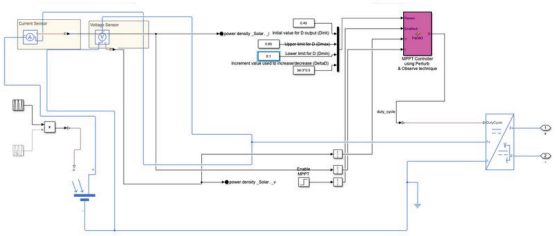
2. LİTERATÜR TARAMASI

Tezimizdeki literatür taramasından yararlanarak Lasseter (2002), Hatziargyriou vd. (2007), Nguyen & Nguyen (2015) ve Kumar vd. (2019) gibi önemli kaynakları içeren kısmı genişletebiliriz. Literatürde mikroşebekelerde hidrojen depolama, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji yönetimi üzerine yapılan çalışmalar oldukça çeşitlidir. Kumar ve arkadaşları, mikroşebekelerde hidrojen depolamanın enerji sürekliliği için kritik bir rol oynadığını vurgulayarak elektrolizörler, hidrojen tankları ve yakıt hücrelerinin sistem entegrasyonunu incelemiştir [4]. Bossel ve Eliasson, hidrojen ekonomisinin temellerini, üretimden taşımaya ve depolamaya kadar olan sürecin teknik sınırlarını ve verimlilik boyutlarını detaylandırmıştır [5]. IDEALHY Raporu, hidrojenin enerji yoğunluğu ve depolama verimliliği açısından bataryalara kıyasla uzun vadeli depolamada sunduğu avantajları ortaya koymuştur [6]. Akhtar ve arkadaşları, mikroşebekelerde hidrojen üretimi ve yakıt hücreleriyle yeniden enerjiye dönüştürülmesini içeren çift yönlü bir sistemin esnek enerji yönetimini ve ada modunda güvenilirliği artırdığını göstermiştir [7]. Bahij, PV tabanlı mikroşebekelerde ışınım verilerinin modellenmesi üzerine çalışarak farklı hava koşullarında PV hücrelerinin davranışlarını

simülasyon için optimize etmiştir [8]. Cao ve ekibi, yeşil hidrojenin yenilenebilir mikroşebekelerde fazla enerjinin elektrolizör aracılığıyla hidrojene dönüştürülmesi ve uzun vadeli depolama sürecinde kullanımını detaylandırmıştır [9]. Chen ve arkadaşları, ada modunda çalışan mikroşebekelerde koruma sistemleri ve enerji yönetiminde karşılaşılan teknik ve ekonomik zorlukları açıklarken, hidrojen ve batarya entegrasyonunun bu zorlukları hafifletebileceğini tartışmıştır [10]. Ganeshan ve ekibi, uzun süreli hidrojen depolamanın sistem kararlılığına katkı sağladığını ve bataryalara kıyasla daha sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu belirtmiştir [11]. Ginanjar ve arkadaşları, ada toplulukları için PV, rüzgar ve hidrojen hibrit mikroşebeke tasarımını önererek yenilenebilir kaynakların kesintili üretimini stabilize edebileceğini göstermiştir [12]. Hossain ve arkadaşları, batarya ve ultrakapasitör gibi hibrit enerji depolama sistemlerinin mikroşebekelerde tek başına batarya veya hidrojen kullanımına göre daha esnek bir enerji yönetimi sunduğunu vurgulamıştır [13]. Jayachandran ve ekibi, hidrojen ekonomisinin 2050 net-sıfır karbon hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayacağını ve mikroşebeke ölçeğinde uygulanabilirliğini ortaya koymuştur [14]. Jadhav ve arkadaşları ise PV, rüzgâr ve hidrojen sistemlerinin entegre edilerek ada modunda çalışan mikroşebekelerde enerji güvenilirliğini artırabileceğini ve yenilenebilir kaynaklardan maksimum verim alınabileceğini belirtmiştir [15]. Kroposki ve ekibi, dünya çapındaki mikroşebeke projelerini inceleyerek hidrojen ve batarya hibrit çözümlerinin farklı coğrafyalarda uygulanabilirliğini değerlendirmiştir [16]. Kumar ve arkadaşları, metal hidrit bazlı hidrojen depolama sistemlerinin uzun süreli enerji depolamada bataryalara kıyasla daha avantajlı olduğunu ve mikroşebekelerde kullanım potansiyelini ortaya koymuştur [17]. Lasseter ise mikroşebeke kavramını ilk ortaya atan çalışmalardan biri olarak dağıtık üretim ve ada modu uygulamalarına öncülük etmiş ve bu bağlamda yenilenebilir kaynak entegrasyonunun önemini vurgulamıştır [18].

3. SİSTEM MODELİ VE YÖNTEM

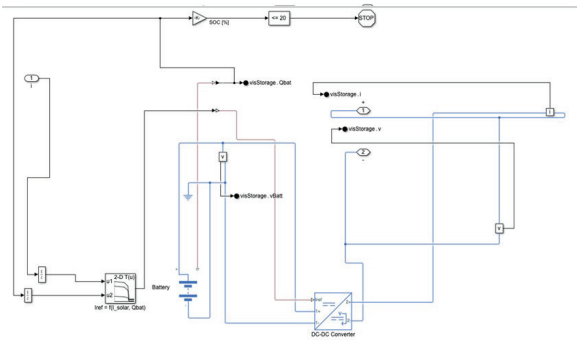
Güneş panelinden elde edilen elektrik enerjisi, önce batarya enerji depolama sistemi (BESS) ve hidrojen üretimi için elektrolizör aracılığıyla kullanılır. Talebin düşük olduğu zamanlarda fazla enerji hidrojen formunda depolanır; talep yüksek olduğunda ise bu enerji geri sisteme verilir.



Şekil 1. Güneş Enerjisi Sistemi.

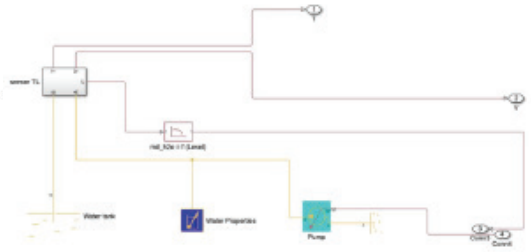
Modelleme üç ana sistem üzerine kurulmuştur:

PV hücre modellemesi: Şekil 1'deki sistemde, güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik hücreler Kirchhoff yasalarıyla modellenmiş, açık devre gerilimi (Voc) ve kısa devre akımı (Isc) gibi parametreler hesaplanmıştır. MPPT (Perturb & Observe) algoritmasıyla maksimum güç noktası izlenmiştir. Simülasyon için 100 hücrelik bir PV dizi kullanılmış ve MATLAB/Simulink üzerinde gerçek güneşlenme verileriyle çalıştırılmıştır.



Şekil 2. Pil sistemi modeli.

Şekil 2'deki Lityum-iyon batarya (TSWB-LYP10000AH) ile modellenmiş, şarj/deşarj karakteristikleri, nominal voltaj ve kapasite değerleri tanımlanmıştır. SOC (State of Charge) sistemiyle bataryanın doluluk oranı takip edilmiş, aşırı deşarjı önlemek için alt limitler belirlenmiştir. Hidrojen depolama sistemi: Fazla elektrik enerjisi elektrolizör aracılığıyla suyu parçalayarak hidrojen üretmekte ve bu hidrojen yüksek basınçlı tanklarda saklanmaktadır. Elektrolizör sıcaklık, basınç ve elektrik akımına bağlı çalışırken; hidrojen tankının termodinamik özellikleri (basınç, sıcaklık, enerji yoğunluğu) modele dahil edilmiştir.



Şekil 3. Elektroliz sistemi modeli.

Şekil 3'te, hidrojen daha sonra gerektiğinde yakıt hücreleriyle tekrar elektrik üretiminde kullanılabilir. Bu üç sistem bir mikroşebeke yapısında birbirine entegre edilmiştir. PV üretimi bataryayı şarj eder, batarya SOC belirli bir seviyenin üzerine çıktığında elektrolizör devreye girerek hidrojen üretir. Böylece enerji sürekliliği sağlanır ve ada modunda kesintisiz güç elde edilir [19]. Simülasyonlar MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve gerçekçi veri setleriyle doğrulanmıştır. PV hücre modeli: DS-100M paneli kullanılmış, Kirchhoff yasalarına dayalı eşdeğer devre modeli geliştirilmiştir. I-V karakteristikleri sıcaklık ve ışınıma bağlı hesaplanmıştır. MPPT için Perturb & Observe algoritması uygulanmıştır. Batarya sistemi: 10.000 Ah lityum-iyon batarya modeli, SOC %20 altına düştüğünde devreden çıkacak şekilde modellenmiştir. Batarya enerjisi E=C*SOC denklemiyle izlenmiştir. Hidrojen üretim ve depolama sistemi: Elektrolizör sabit sıcaklık ve basınç koşullarında çalışacak şekilde modellenmiş, hidrojen yüksek basınçlı tanklarda depolanmıştır. Hidrojen üretimi Faraday verimi ile hesaplanmıştır.

4. MİKRO ŞEBEKE ÇIKTISI

Bu bölümde mikroşebekenin PV sistemi (güneş paneli), enerji depolama sistemi (batarya) ve bunların birlikte çalışmasından elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Simülasyonda kullanılan PV panel sistemi, 100 seri hücreden oluşmuş ve gün içi ışınım verilerine göre çalıştırılmıştır.

Güneş Enerjisi Sistem Çıktısı

Güneş ışınımı arttıkça panel çıkış akımı yükselirken voltaj belli bir değerde sabitlenmiştir. Maksimum ışınımda akım yaklaşık 800 A, voltaj ise 58-60 V seviyelerinde gözlenmiştir. Sabah saatlerinden öğlene doğru voltaj ve akım yükselirken, öğleden sonra düşüş yaşanmıştır.

Güneş Enerji Sistemi ve Batarya İlişkisi

PV panelden gelen fazla enerji bataryada depolanmış, böylece güneş ışınımı düşük olduğunda batarya devreye girerek yükü beslemiştir. Seri hücre sayısının artırılması, bataryaya daha fazla enerji yüklemesine ve daha uzun süre hidrojen üretimini desteklemesine olanak sağlamıştır.

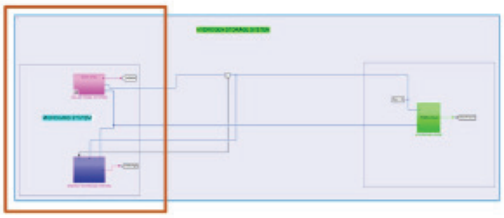
Batarya Çıktısı

Kullanılan batarya yüksek kapasiteli (10000 AH) olduğundan uzun süreli depolama sağlamıştır. Şarj durumuna (SOC) göre batarya çıkış gücü değişmiştir. SOC %80 üzerindeyken batarya daha güvenli çalışmakta, %20 altına düşerse performans düşmektedir. Deşarj sırasında batarya voltajında kademeli bir düşüş gözlenmiştir (örneğin 250V → 215V arası). SOC yüksek olduğunda (örn. %80), batarya yükü daha uzun süre besleyebilmiştir. SOC düşük seviyelere indiğinde bataryanın enerji sağlayabilme süresi kısalmış ve voltaj dalgalanmaları oluşmuştur. Voltaj düşüşleri, hem iç direnç hem de yük talebine bağlı olarak meydana gelmiştir Batarya akımı negatiften sıfıra doğru yükselmiş, bu da başta yüksek yük çekildiğini, sonra yükün azaldığını göstermiştir.

Doğru Akım Dönüştürücü Çıktısı

Konvertör, elektrolizör ve hidrojen üretim sürecine fazla enerji gitmesini önleyecek şekilde güç regülasyonu yapmıştır. Verimlilik grafiğinde zamanla değişimler gözlenmiş, aşırı yük ve sıcaklık koşullarında verim düşüşleri tespit edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA



Şekil 4. Tüm güç sistemi.

Güneş panellerin davranışı

Şekil 4'te tüm güç sistemi entegre edilmiştir. İrradiance (güneş ışınımı) arttıkça PV çıkış akımı hızlı şekilde artmış, ancak voltaj belli bir noktadan sonra sabitlenmiştir. Maksimum ışınımda PV akımı maksimum değere ulaşmış, voltaj ise yaklaşık 58-60V civarında sabitlenmiştir. Güneş ışınımı dalgalandığında (bulutlanma vb.) akım düşmüş, buna bağlı olarak depolama ve hidrojen üretimi de etkilenmiştir. PV'den gelen fazla enerji bataryaya yönlendirilmiştir. Seri hücre sayısı arttıkça bataryaya yüklenen enerji artmış, bu da hidrojen üretimini uzun süre sürdürebilmeyi sağlamıştır.

Batarya voltaj ve akım dinamikleri, SOC ve deşarj

Başlangıçta batarya akımı negatif değerlerden başlayıp zamanla 0 A'ya yaklaşmış, bu da başta yüksek yük çeken sistemin zamanla daha az yük çektiğini göstermiştir. Batarya voltajı 215V → 235V → 220V şeklinde dalgalanmalar göstermiştir. Şebeke (grid) voltajı ise daha stabil kalmış, bataryaya göre dalgalanması daha az olmuştur. SOC değeri %80 üzerinde tutulduğunda batarya daha güvenli çalışmış, ömrü korunmuştur. SOC %20 altına düşerse bataryanın performansı ve enerji sağlama süresi azalmış, bu nedenle %20 altı sınırlandırılmıştır. Batarya yükü beslerken 10000 AH'den 3000 AH'ye kadar düşüş yaşanmış; bu da kullanım sırasında enerjinin giderek tükendiğini göstermiştir. Yük arttıkça bataryanın deşarj hızı artmış, bu da enerji yönetiminde kritik bir parametre olmuştur.

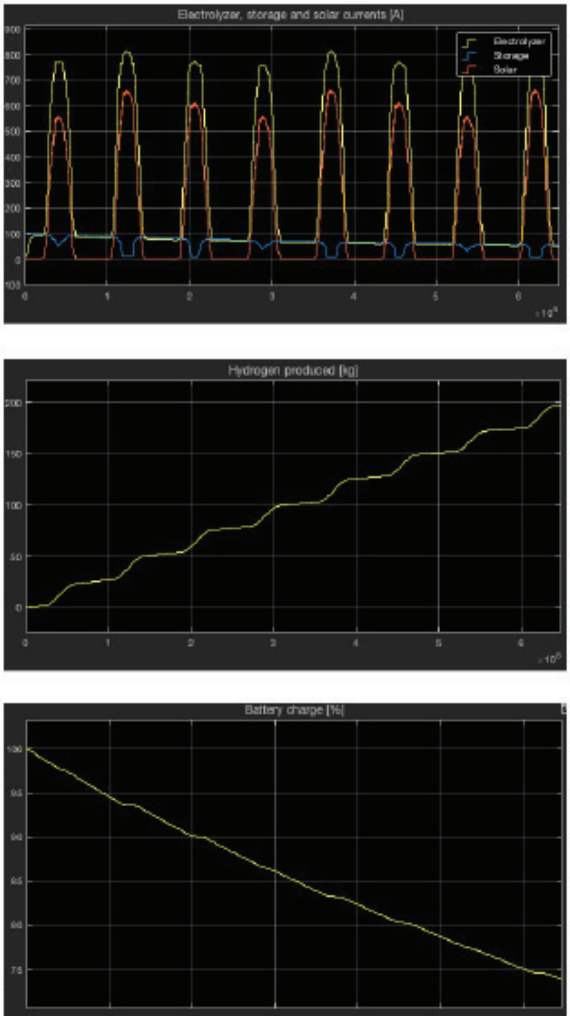
Hidrojen üretim miktarı, basınç, hacim ve sıcaklık

Fazla PV enerjisi elektrolizör aracılığıyla hidrojene dönüştürülmüş, yaklaşık 200 kg hidrojen üretimi sağlanmıştır. Hidrojen üretim oranı, elektrolizördeki akım dalgalanmalarına paralel olarak değişmiştir. Elektrolizör davranışı: Hidrojen üretimi sırasında elektrolizör akımı 100-150A arasında dalgalanmıştır. Akımın yüksek olduğu anlarda üretim hızı artmış, düşük akımda üretim hızı azalmıştır. Üretim hızı 0.01 – 0.15 kg/s aralığında değişmiş ve akım grafiğiyle aynı trendi göstermiştir. Elektrolit çözeltisinin pH değeri yaklaşık 6 seviyesinde sabit kalmıştır. Bu, sistemin kimyasal dengesinin korunduğunu ve elektrolizörün kararlı çalıştığını göstermektedir. Depolama tankı sıcaklığı 300K → 320K → 340K seviyelerine yükselmiş ve daha sonra sabitlenmiştir. Sıcaklık artışı tank içi basıncı yükseltmiş ve hidrojenin hareketliliğini artırmıştır. Sıcaklık ve basınç ilişkisi hidrojen depolamanın güvenliğini ve kapasitesini etkilemiştir. Yüksek sıcaklık ve basınç kontrolü, hidrojenin uzun süre güvenli şekilde saklanabilmesi için kritik olmuştur. Yüksek güneşlenme anlarında fazla enerji önce bataryaya, SOC %80 seviyesinin üstüne çıktığında ise hidrojen üretimine yönlendirilmiştir. Böylece sistem fazla enerjiyi boşa harcamadan depolayabilmiştir.

Karşılaştırmalı avantajlar

Batarya kısa vadeli enerji dengelemesi için etkili olurken, hidrojen uzun vadeli depolama çözümü sunmuştur. Hidrojen depolamanın enerji yoğunluğu bataryaya göre daha yüksek olduğu için mikroşebekenin ada modunda çalışmasını daha uzun süre sürdürebilmiştir.

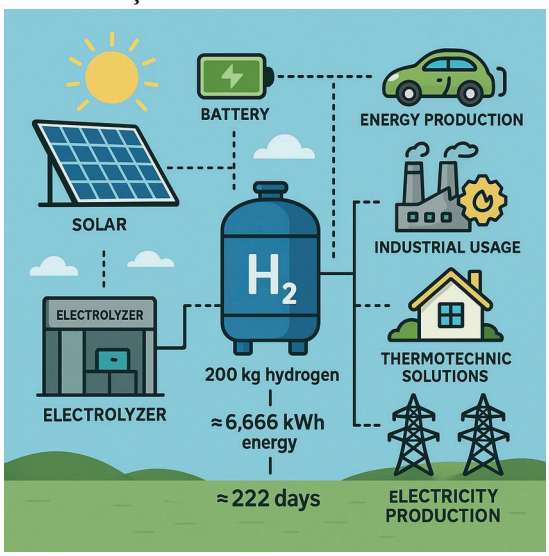
6. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR



Şekil 5. Hidrojen Depolama Sistemi.

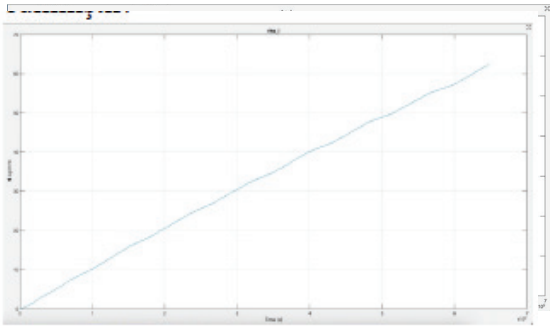
Bu tez çalışmasında, Şekil 5'te olduğu gibi ada modunda çalışabilen bir yeşil hidrojen mikroşebeke sistemi tasarlanmış ve MATLAB/Simulink ortamında modellenerek analiz edilmiştir, güneş sistemi ve pil sistemi başarılı bir mikroşebeke mimarisi oluşturarak, hidrojen üretimine yol açmıştır. Mikroşebeke, üç temel bileşenin entegre edilmesiyle oluşturulmuştur: PV güneş paneli sistemi, batarya enerji depolama sistemi (BESS) ve hidrojen üretimi-depolaması. Hidrojen üretimi artarken, pil sistemi gittikçe şarj boşaltımı yaşamıştır. Simülasyon sonuçları göstermiştir ki: PV sisteminin davranışı, gün içi güneşlenme değişimlerine doğrudan bağlı olarak akım ve voltaj üretiminde dalgalanmalar göstermiştir. Güneşlenmenin en yüksek olduğu öğle saatlerinde maksimum güç üretimi sağlanmış, sabah-akşam saatlerinde üretim azalmıştır. Bu durum, yenilenebilir kaynakların kesintili doğasının mikroşebeke yönetimi açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur. Batarya enerji depolama sistemi, kısa vadeli enerji dengelemesi için oldukça etkili çalışmıştır. PV üretiminin fazla olduğu zamanlarda batarya şarj olmuş, üretimin azaldığı saatlerde yükü besleyerek sistemin sürekliliğini sağlamıştır. Ancak bataryanın SOC seviyesinin %20'nin altına düşmesi performans kaybına neden olabileceği için enerji yönetimi algoritmalarının kritik olduğu görülmüştür. Hidrojen üretimi ve depolama süreci, mikroşebekeye uzun vadeli enerji depolama imkânı sağlamıştır. PV'den gelen fazla enerji, elektrolizör aracılığıyla suyu hidrojene ve oksijene ayırmış, üretilen hidrojen yüksek basınçlı tanklarda güvenli şekilde depolanmıştır.

Simülasyonlarda yaklaşık 200 kg hidrojen üretimi sağlanmış, bu da güneş enerjisinin yoğun olduğu dönemlerde ciddi miktarda kimyasal enerji depolanabildiğini göstermiştir. Hidrojen üretim hızı elektrolizördeki akım dalgalanmalarıyla aynı trendi göstermiş, yani üretim hızı doğrudan PV ve batarya sistemlerinin anlık performansına bağlı olmuştur. Bu durum, elektrolizör tasarımının dinamik enerji akışına uyum sağlayacak şekilde optimizasyon gerektirdiğini ortaya koymuştur. Hidrojen tankındaki sıcaklık ve basınç değişimleri, depolama güvenliği ve kapasitesi açısından önemli bir parametre olmuştur. Tank sıcaklığının 300K'den 340K'ye kadar yükselmesi, basınç kontrolü ve termal yönetimin önemini göstermiştir. Enerji yönetim stratejisi olarak, yüksek güneşlenme dönemlerinde önce bataryanın şarj edilmesi, SOC %80 seviyesine ulaştığında ise fazla enerjinin hidrojen üretimine yönlendirilmesi optimal bir çözüm sunmuştur. Tüm sistem çıktısı Şekil 6'da özetlenmiştir.

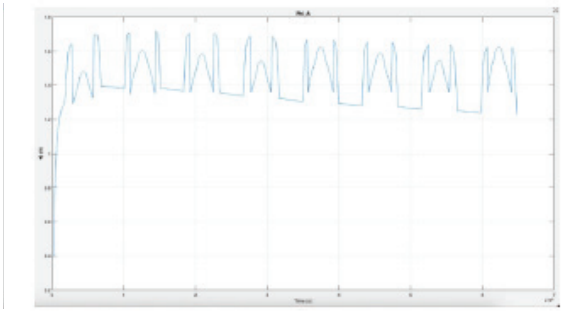


Şekil 6. Hidrojen Sistemi Çıktısı.

Bu sayede ne enerji israfı olmuş ne de batarya gereksiz yere aşırı şarj edilmiştir. Verimlilik açısından, bataryalar kısa vadeli enerji depolamada hızlı tepki verip yük dengelemesi sağlarken, hidrojen depolama uzun vadeli ve yüksek yoğunluklu enerji depolama çözümü olarak öne çıkmıştır. Bu iki sistemin hibrit kullanımı mikroşebekenin ada modunda kesintisiz çalışmasını mümkün kılmıştır. Bu çalışmanın önemli bir çıktısı, batarya + hidrojen depolama entegrasyonunun mikroşebekelerde enerji sürekliliğini artırdığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısından doğan dezavantajları minimize ettiği sonucudur. Özellikle karbon nötr enerji hedeflerine ulaşmak için hidrojen teknolojisinin kritik bir tamamlayıcı olduğu ortaya çıkmıştır [20]. Ada modunda çalışan bir mikroşebekeye yeşil hidrojen depolama sisteminin entegre edilmesi üzerine detaylı bir modelleme sunulmuştur, grafiklerde Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü üzere hidrojen üretimi artmıştır. PV-batarya-hidrojen zinciri bir bütün olarak modellenerek hem kısa hem uzun vadeli enerji depolama stratejileri birlikte analiz edilmiştir.



Şekil 7. Hidrojen Sistemi Yoğunluk Grafiği.



Şekil 8. Hidrojen Üretimi.

Simülasyonlar sayesinde gerçek koşullarda sistem davranışı hakkında öngörüler elde edilmiş ve hidrojen depolamanın enerji sürekliliğine katkısı sayısal olarak ortaya konmuştur. Farklı iklim verileri ve değişken yük profilleri ile sistemin performansı test edilebilir. Hidrojen depolama tanklarında sıcaklık ve basınç yönetimi için gelişmiş kontrol algoritmaları geliştirilebilir. Gerçek saha uygulamalarında maliyet, güvenlik ve verimlilik optimizasyonu için hibrit depolama stratejileri (ör. batarya + süperkapasitör + hidrojen) kullanılabilir. Elektrolizör teknolojisi ve yakıt hücreleri entegrasyonu daha gelişmiş modellerle test edilerek kapalı döngü hidrojen ekonomisi mikroşebeke ölçeğinde uygulanabilir. Sonuç olarak, bu tez çalışması ada modunda çalışan yeşil hidrojen mikroşebekelerinin karbon nötr, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji çözümü sunduğunu göstermektedir [21]. Batarya ve hidrojen depolama entegrasyonu, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini dengelerken, aynı zamanda uzun vadeli enerji arz güvenliğini de desteklemektedir.

KAYNAKLAR

[1] Y. Liu, et al., “Green Hydrogen for Carbon Neutral Energy,” 2023.

[2] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, “Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.

[3] T. Nguyen and Q. Nguyen, “MPPT algorithms for PV systems in microgrids: A performance evaluation,” International Journal of Renewable Energy Research, vol. 5, no. 4, pp. 912–920, 2015.

[4] S. Kumar, R. Agarwal, and M. Agarwala, “Hydrogen storage in microgrids,” 2019.

[5] U. Bossel and B. Eliasson, The Hydrogen Economy: Opportunities and Limitations, 2003.

[6] IDEALHY Report, Energy Content of Hydrogen, 2024.

[7] M. Akhtar, A. Dickson, and J. Liu, “Hydrogen-to-power integration for flexible microgrids,” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46, no. 12, pp. 15032–15045, 2021.

[8] M. Bahij, “Solar irradiance data modeling for PV-based microgrids,” Renewable Energy Journal, vol. 34, no. 2, pp. 112–120, 2021.

[9] Y. Cao, Z. Wang, J. Li, and H. Zhang, “Green hydrogen storage integration in renewable microgrids,” Energy Reports, vol. 7, no. 4, pp. 5632–5645, 2021.

[10] Y. Chen, X. Li, and P. Liu, “Technical and economic challenges of microgrid protection systems,” Electric Power Systems Research, vol. 140, no. 1, pp. 45–53, 2016.

[11] V. Ganeshan, R. Holmes, L. Meegahapola, and B. McGrath, “Long-term hydrogen storage for microgrids: A stability perspective,” Journal of Power Sources, vol. 356, pp. 12–21, 2017.

[12] H. Ginanjar, R. Halimi, and A. Rizqiawan, “PV-wind-hydrogen hybrid microgrid design for island communities,” Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 45, p. 101143, 2021.

[13] E. Hossain, R. Perez, and R. Bayindir, “Hybrid energy storage systems for microgrids,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2652–2664, 2016.

[14] R. Jayachandran, S. Kumar, and C. Lee, “Hydrogen economy pathways towards net-zero 2050,” Energy Transition Journal, vol. 2, no. 1, pp. 45–60, 2024.

[15] A. M. Jadhav, B. Devdas, K. S. Nisar, and P. Bajpai, “PV-wind-hydrogen integrated systems for microgrids,” Renewable Energy Focus, vol. 26, pp. 32–45, 2018.

[16] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, and N. Hatziargyriou, “Worldwide microgrid projects: Applications and technologies,” IEEE Power & Energy Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 40–47, 2008.

[17] N. Kumar, F. Alam, D. Rakshit, and P. Dutta, “Metal hydride hydrogen storage systems for long-duration energy storage,” International Journal of Energy Research, vol. 43, no. 11, pp. 5605–5622, 2019.

[18] R. H. Lasseter, “Microgrids,” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, no. 1, pp. 305–308, 2002.

[19] D. N. Luta and A. K. Raji, “Regulatory frameworks for microgrids: Challenges and opportunities,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 107, pp. 274–287, 2019

[20] W. Su, Z. Chen, and H. Yu, “Socio-economic impacts of renewable energy-based microgrids in rural areas,” Energy Policy, vol. 128, pp. 145–155, 2019.

[21] Y. Tao, F. Li, Y. Zhang, and L. Wang, “Virtual synchronous generator control for hybrid microgrid energy management,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 9, pp. 8432–8444, 2021.

GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE TRANSFORMATÖR KAPASİTESİNİN OPTİMİZASYONU

İsmet KAYMAZ
Astor Enerji
ismet.kaymaz@astoras.com.tr

Mehmet BAYRAK
Sakarya Üniversitesi
bayrak@sakarya.edu.tr

Semih TURSUN
Astor Enerji
semih.tursun@astoras.com.tr

***Özet*— Yenilenebilir enerji sistemleri, dünyada artan enerji talebini karşılamak amacıyla fosil yakıtlara bir alternatif olmakla birlikte, önemli bir üretim hacmiyle destek sağlamaktadır. Güneş enerji sistemleri, en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Son yıllarda güneş enerji sistemlerine yapılan yatırımlar ciddi oranda artmış olup, bu artışın önümüzdeki dönemlerde de devam etmesi beklenmektedir.**

Güneş enerji sistemlerinin kurulumu ve işletilmesinde transformatörler önemli bir rol oynamaktadır. Transformatörlerin ömrü, sistem ömrü üzerinde belirleyici faktörlerden biridir ve aynı zamanda yatırım maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Güneş enerji santralleri sürekli tam yükte çalışmamaktadır. Ancak transformatör kapasitesi genellikle tasarımcılar tarafından sürekli tam yükte çalışacak şekilde seçilmektedir. Bu durum, transformatörün ömrünün standartlarda belirtilen sürenin üzerine çıkmasına ve gereksiz yatırım maliyetlerinin artışına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, transformatör ömrünün standartlar doğrultusunda optimizasyonu ile yatırım maliyetlerinde sağlanabilecek azalma için örnek bir çalışma gerçekleştirilecek ve sıcaklık artış testi yapılan benzer bir transformatörün tepe yağ sıcaklığının test verileriyle teorik hesabın karşılaştırılması yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler — Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Güneş Enerji Sistemleri, İnverter, Transformatör, Sonlu Farklar Metodu, Işıma, Güneş Paneli

1. GİRİŞ

Güneş, rüzgâr, gel-git, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklar fosil yakıtların sona ermesinden sonra dünyanın enerji sorununun çözümünde kurtarıcı rol oynayacaktır. Günümüzde güneş enerjisi diğer yenilenebilir kaynaklara kıyasla çevre dostu ve yatırıma uygun olması nedeniyle elektrik üretimi için en cazip yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir [1]. Güneş enerji sistemleri güneşlenme süresine ve ışıma değerine bağlı olarak enerji üretimi gerçekleştirmektedir. Bu yüzden gece saatlerinde üretim için gerekli ışıma sağlanamadığından enerji üretimi olmamaktadır. Bu durum GES (Güneş Enerji Santrali) için dezavantajdır. Dezavantajın önüne geçmek veya etkisini azaltmak için depolama sistemleri GES yanında entegre bir sistem olarak kullanılabilmektedir [2-3].

GES'lerde kayıplar, iletkenler ve ekipmanlarda meydana gelen kayıplar olarak iki başlık altında incelenebilir. Ekipmanlarda meydana gelen kayıplar ise inverter ve transformatörden kaynaklanmaktadır. Üretim süresi boyunca bu kayıplardan kaçınmak mümkün değildir.

GES sistemleri, bir fotovoltaik diziden gelen DC girişini bir transformatöre AC giriş gerilimi sağlamak için dönüştüren inverterler etrafında geliştirilmiştir [4]. İnverterler güneşten alınan gücü

maksimize eder ve güç sistemindeki harmonikler üzerinde etkilidir. Bu harmoniklerin ise dağıtım transformatörlerinin ömrü ve performansı üzerindeki etkisi ele alınmalıdır [5].

GES'de kullanılacak transformatörlerin seçiminde yük profilinin yanında dikkat edilmesi gereken başlıca transformatör özellikleri vardır. Bunlar;

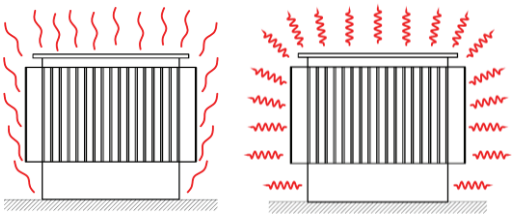
- Elektrostatik ekranın kullanılması
- Sekonder (alçak gerilim) çıkış sayısı
- Bağlantı grubu
- Sargı yapısı ve empedans gereksinimleri
- Gerilim değerleri
- Geçici aşırı gerilim ve yalıtım düzenlemesi
- Enerji verme/kesme işlemelerinin sayısı ve sıklığı
- DC ön uyarma akımının varlığı
- Transformatörün yüksek frekans eşdeğer devresi ve kullanılacak inverterin anahtarlama frekansı olarak sıralanabilir.

GES'lerde transformatör bağlantı grubunun seçimine ayrıca önem gösterilmelidir. Bunun nedeni ise sağlanan nötr ucudur. Nötr uçları inverter sistemiyle aynı topraklamaya bağlanması durumunda sistemde ciddi sorunlar oluşturabilmektedir [6].

2. TRANSFORAMTÖRLERDE TERMAL MODEL VE ÖMÜR

Transformatörlerin sağlıklı bir şekilde çalışması ve ömrünün uzaması için gerekli soğutmanın sağlanması gerekmektedir. Transformatörlerde ısı transferi konveksiyon ve radyasyon olmak üzere 2 başlık altında incelenir. Konveksiyon, havanın hareketiyle oluşan ısı transferidir. Konveksiyon yoluyla ısı transferi için genel formül aşağıda verilmiştir.

$$P = h * A * \Delta T = h * A * (T_{yüzey} - T_{ortam}) \quad (1)$$



Şekil 1. Konveksiyon ve radyasyonla soğuma

Diğer ısı transferi modu termal radyasyon, tanktan yayılan elektromanyetik radyasyonla oluşan transferdir. Genel formül aşağıda verilmiştir.

$$P = e * \sigma * A * (T_{yüzey}^4 - T_{ortam}^4) \quad (2)$$

h : Isı transfer katsayısı

e : Emissivity

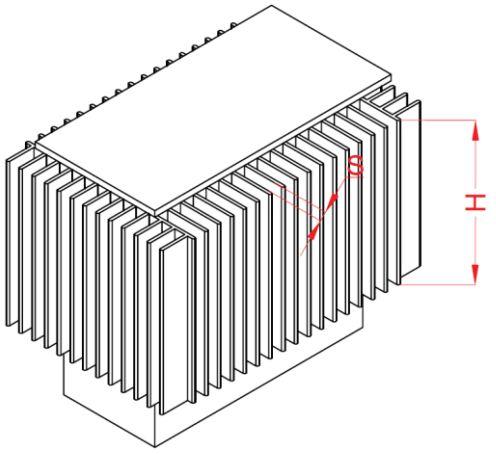
σ : Stefan-Boltzmann sabiti

A : Alan

$T_{yüzey}$: Yüzey sıcaklığı

T_{ortam} : Ortam sıcaklığı

Konveksiyonla ısı transferi, dalga duvarların ve havanın, özgül ısısına, ısıl iletkenliğine, viskozitesine, yoğunluğuna, ısıl genleşme katsayısına bağlıdır.

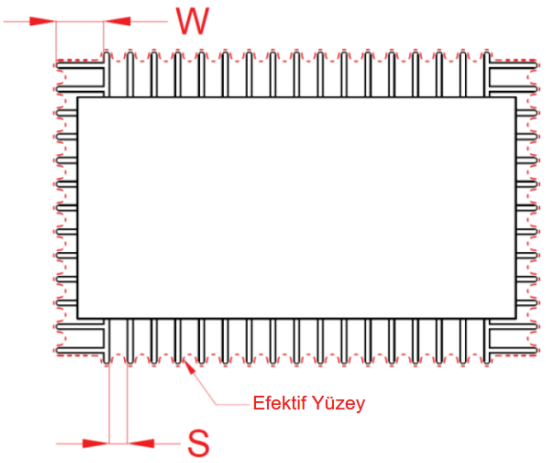


Şekil 2. Dalga duvarlı transformatör

S: Dalga duvarlar arası boşluk

H: Dalga duvar yüksekliği

Denklemler büyük ölçüde basitleştirilirse dalga duvarların ısı transfer katsayısının (h) ana parametreleri S ve H olur. Isı transferi katsayısı $\left(\frac{S^3}{H^{22}}\right)^{\left(\frac{1}{50}\right)}$ formülüyle doğru orantılıdır.



Şekil 3. Dalga duvarlı transformatör

Dalga duvardan yayılan ısıl radyasyonun en önemli kısmı etkin yüzey katsayısının belirlenmesidir. Etkin yüzey katsayısı dalga duvar geometrisine bağlıdır. Etkin yüzey için fonksiyon aşağıda verilmiştir.

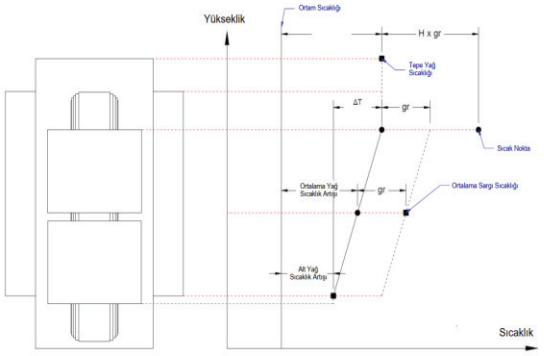
$$\text{Etkin yüzey katsayısı} = f\left(\frac{W}{S}; \frac{H}{S}\right) \quad (3)$$

S: İki dalga duvar arası boşluk

H: Dalga duvar yüksekliği

W: Dalga duvar derinliği

Transformatörlerde ömür izolasyonun dayanım süresine bağlıdır. İzolasyon için belirli sıcaklık sınır değerleri vardır. Bu sınır değerleri termal olarak yükseltilmiş kağıt için 110° C iken termal olarak yükseltilmemiş kağıt için 98 °C'dir. Transformatörlerin beklenen ömrünü değerlendirmek için gerçek hizmet koşulları dikkate alınmalıdır. Transformatörün tank ve sargı yapısında sıcaklık dağılımı yaklaşık kabullerin yapılmasıyla aşağıdaki gibi olmaktadır.



Şekil 4. Transformatörlerde sargı ve yağ sıcaklığının dağılımı

gr : Ortalama sargı sıcaklık artışı – Ortalama yağ sıcaklık artışı

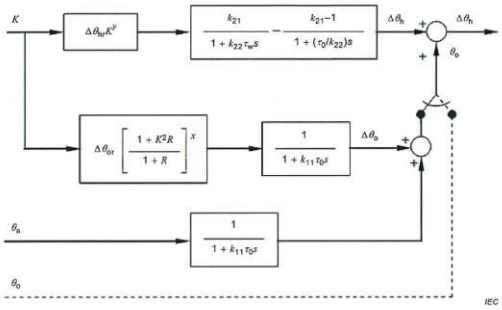
ΔT : f (Ortalama yağ sıcaklık artışı; gr ; H)

Tepe yağ sıcaklık artışı: Ortalama yağ sıcaklık artışı + ($\frac{\Delta T}{2}$)

Sıcak nokta : Ortam + Tepe yağ sıcaklık artışı + (H * gr)

H: Sıcak nokta faktörü

Hot spot değeri transformatörler için önemlidir ve ömür hesaplarında kullanılan ana parametredir. Transformatörde ömür hesabı IEC 60076-7:2018 standardına göre yapılmalıdır. Aşağıda ömür hesabı için diferansiyel denklemler blok diyagramı şeklinde gösterilmiştir. Çıkış olarak transformatörlerin ömrü üzerinde baş etken olan sıcak nokta sıcaklığı verilmiştir.



Şekil 5. Sargı ve tepe yağ sıcaklığının blok diyagramı

K=Yük faktörü

$\Delta\theta_{hr}$=Nominal akımda sıcak nokta ve tepe yağ arasındaki sıcaklık farkı

y = Sargı üssü

$k_{11}/k_{21}/\ k_{22}$ = Termal model sabiti

R = Yükte kayıpların yüksüz kayıplara oranı

τ_0 = Yağ zaman sabiti

τ_w= Sargı zaman sabiti

s= Laplace operatörü

$\Delta\theta_{or}$= Nominal yükte sürekli halde tepe yağ sıcaklık artışı (boşta kayıp + yükte kayıp)

x= Yağ üssü

$\Delta\theta_h$= Dikkate alınan yükte sıcak nokta, üst yağ sıcaklık farkı

$\Delta\theta_0$= Dikkate alınan yükte üst yağ sıcaklık artışı

θ_0= Dikkate alınan yükte tepe yağ sıcaklığı

θ_a= Ortam sıcaklığı

θ_h= Sargı sıcak nokta sıcaklığı

Laplace değişkeni s (d/dt), türev operatörüdür.

Blok diyagramında en üst yoldaki ikinci blok, sıcak nokta yükseliş dinamiklerini temsil etmektedir. İlk terim (k_{21} payıyla), sıcak noktadan geçen yağ akışının değişmesinin etkisi dikkate alınmadan önce, temel sıcak nokta sıcaklık artışını temsil eder. İkinci terim (k_{22}-1 payıyla) sıcak noktadan geçen yağ akışının değişken hızını temsil eder ve bu olgu çok daha yavaş değişir. Bu iki termin birleşik etkisi, yük akımındaki ani bir artışın, ani yük değişiminden çok kısa bir süre sonra sıcak nokta sıcaklık artışında beklenmedik derecede yüksek bir zirveye neden olabileceği gerçeğini açıklamaktadır. k_{11}, k_{21}, k_{22} ve gösterilen diğer parametreler IEC 60076-7 standardında ele alınmıştır. Üst yağ sıcaklığı için diferansiyel denklem aşağıdaki gibidir.

$$\left[\frac{1+K^2R}{1+R}\right]^x * (\Delta\theta_{or}) = k11 * \tau_0 * \frac{d\theta_o}{dt} + [\theta_o + \theta_a] \quad (4)$$

Sıcak nokta sıcaklık artışı için diferansiyel denklem, en kolay şekilde iki diferansiyel denklem çözümünün farkı olarak elde edilir.

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2} \quad (5)$$

Diğer iki diferansiyel denklem ise;

$$k_{21}\, K^y\, (\Delta\theta_{hr}) = k_{22}\, \tau_w \frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} + \Delta\theta_{h1} \quad (6)$$

ve

$$(k_{21} - 1)K^y\, (\Delta\theta_{hr}) = \frac{\tau_0}{k_{22}} \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} + \Delta\theta_{h2} \quad (7)$$

Diferansiyel denklem çözümleri ana denkleme göre birleştirilmelidir. Sıcak nokta sıcaklığı, ortam sıcaklığının da eklenmesiyle aşağıdaki gibi son halini alır.

$$\theta_h = \theta_0 + \Delta\theta_h \quad (8)$$

Yukarıdaki denklemlerle ilgili olarak, karmaşıklık, yağ soğutma ortamının termal ataletine ek olarak mekanik ataletinin de olduğu gerçeğini açıklamak içindir. Etki doğal soğutmalı (ON) trafolarda en yüksektir ve yönlendirilmemiş akışlı pompalanan yağ soğutmasında (OF) biraz daha azdır. Güç transformatörleri açısından yönlendirilmiş akışlı pompalanan yağ soğutmasında (OD) ihmal edilebilir düzeydedir. Küçük transformatörler için de ihmal edilebilir düzeydedir. ON ve OF soğutma için yağ viskozitesindeki değişiklik, iletkenlerin omik direnç değişiminin etkisini ortadan kaldırır. Aslında yağın viskozite değişiminin soğutma etkisi, direnç değişiminin ısıtma etkisinden daha güçlüdür.

OD soğutması için, yağ viskozitesinin sıcaklık artışları üzerindeki etkisi azdır ve omik direnç değişiminin etkisi dikkate alınır. OD'deki sıcak nokta sıcaklık artışı için yaklaşık düzeltme terimi kullanılmalıdır.

Sıcak nokta sıcaklığı, ortam sıcaklığının, tanktaki üst yağ sıcaklık artışının ve sıcak nokta ile tanktaki üst yağ arasındaki sıcaklık farkının toplamına eşittir. Yukardaki diferansiyel denklemler fark denklemi olarak yazılıp çözülebilir. Bu çalışmada verilen sonuçlar bu denklemlerin fark denklemi olarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Daha doğru bir çözüm için fark denklemleriyle çözüm aşamasında zaman adımı mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Kesinlikle termal modeldeki en küçük zaman sabitinin yarısından fazla olmamalıdır.

Sargı ve yağ zaman sabitleri değişen yüklenmeye bağlı olarak transformatörde oluşacak sıcaklık değişimlerinin hızına etki eden baş faktördür. Sargı ve yağ zaman sabitinin yüksek olması transformatörün ani yük değişimlerine verdiği tepki süresinin gecikmesine ve yaşlanmanın yavaşlamasına neden olur. Tam tersi şekilde düşük olması ise transformatörün artan yük faktörüne hızlı bir tepki vermesine ve yaşlanmanın hızlanmasına neden olur. Sargı zaman sabiti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tau_w = \frac{m_w * c_w\, g}{60 * P_w} \quad (9)$$

$g =$ Nominal yükte sargı ve yağ arasındaki sıcaklık farkı

m_w= Sargının çıplak ağırlığı (kg)

c_w =İletken malzemesinin özgül ısısı $\left(\frac{Ws}{kg*K}\right)$ (Bakır için 390 ve Alüminyum için 890)

P_w= Nominal yükte sargı kaybı (W)

Yağ zaman sabiti ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tau_0 = \frac{C*\Delta\theta_0}{60*P} \quad (10)$$

$$C = c_w * m_w + c_{FE} * m_{FE} + c_t * m_t + k_0 * c_0 * m_0 \quad (11)$$

$P =$ Nominal yükte toplam kayıplar (W)

m_w= Bobin tertibatının ağırlığı (kg)

m_{FE}= Nüvenin ağırlığı (kg)

m_T = tankın ve bağlantı parçalarının kütlesidir (sadece sıcak yağ ile temas eden kısımlar kullanılmalıdır, yani tank ağırlığının 2/3'ü dikkate alınmalıdır) (kg)

m_0= yağ ağırlığı (kg)

c_w = Sargı malzemesinin spesifik ısı kapasitesi $\left(\frac{Ws}{kg*K}\right)$ (Bakır için 390 ve Alüminyum için 890)

c_{FE} = Nüvenin spesifik ısı kapasitesi $\left(\frac{Ws}{kg*K}\right)$(yaklaşık 468 alınabilir)

c_T= Tank ve bağlantı parçalarının spesifik ısı kapasitesi $\left(\frac{Ws}{kg*K}\right)$ (yaklaşık 468 alınabilir)

c_0 = Yağın spesifik ısı kapasitesi $\left(\frac{Ws}{kg*K}\right)$ (yaklaşık 1800 alınabilir)

Transformatörlerde yağın tamamı üst yağ sıcaklıkla aynı sıcaklıkta değildir. Üst yağ sıcaklığının ortalama sıcaklığa oranı tasarıma bağlı olarak %65-90'ı arasında değişir. Karşılık gelen sıcaklık artışının bilinmediği durumda, ONAN ve ONAF soğutma modları için yağ düzeltme faktörü olarak bu rakamların ortalama değeri, yani %80 kullanılır. OF veya OD zorlamalı yağ soğutma modları ve harici radyatörsüz dağıtım transformatörü için düzeltme faktörü %100'dür[7].

3.ANKARA İÇİN SICAKLIK, IŞIMA VE YÜKLENME PROFİLLERİ

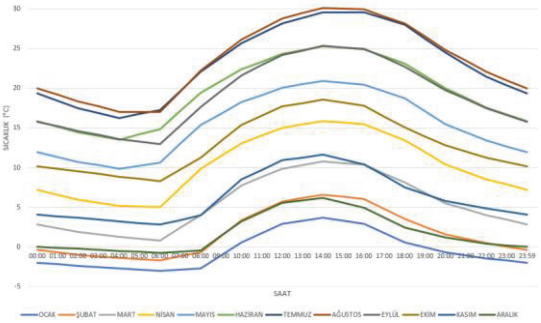
Güneşten dünyamıza ışıma yoluyla enerji transferi gerçekleşir. Bu ışımaya karşı kullandığımız yarı iletken teknolojisiyle güneşten elektrik, sıcak su, buhar, ısı gibi enerjilere dönüşüm sağlanabilir. Işınım çeşitleri global, direkt, difüz ve açık gökyüzü (clear sky) olarak 4 başlık altında incelenebilir. Global ışınım miktarı bir yüzeye gelen toplam güneş ışınım miktarıdır. Hem doğrudan güneş ışınları hem de atmosferden yayılan veya yansıtılan ışınların toplamı bu değere dahildir. Direkt ışınım ise güneşten doğrudan, herhangi bir atmosfer veya bulut engeline takılmadan gelen ışınımdır. Güneşin tam konumundan gelen gölge oluşturabilen ışınlardır. Difüz ışınım güneş ışığının atmosferde bulutlar, toz ve diğer parçacıklardan saçılarak dağılan kısmıdır. Güneşin doğrudan görülmediği gölgeli alanlarda bile bulunur. Açık gökyüzü ışınımı bulutsuz koşullarında teorik olarak hesaplanan güneş ışınım miktarıdır. Bulutlar veya diğer atmosferik engeller olmadığı için genellikle maksimum güneş ışınımıdır.

Yoğunlaştırıcı sistemlerde direkt ışınım kullanılırken, Fotovoltaik (PV) sistemlerde global ışınım değerleri kullanılmaktır.

İnverterler GES'lerde panellerden üretilen DC gerilim ve akımı transformatörden yüksek gerilim seviyelerine dönüşümü gerçekleştirilebilecek AC sisteme (transformatörün alçak gerilim tarafı için yapılacak bağlantı gerilimi) çevirirler. İnverterler ortalama 120-150 W/m^2 ışınım değerinde uyanmakta ve 800-1000 W/m^2 değerinde ise tepe yüke ulaşmaktadırlar. Uyanma kriterleri ışıma değerlerinin yanında minimum DC gerilime ve MPPT başlatma gerilimine de bağlıdır. Hafif bulutlu ve sisli havalarda uyanma ışıma değeri değişebilir. Düşük sıcaklıklarda panel gerilimi artar ve inverter daha erken uyanabilmektedir.

Bu çalışmada 120 W/m^2 ışımada inverterin uyanacağı 800 W/m^2 'de ise sistemin maksimum güce ulaşacağı varsayılmıştır.

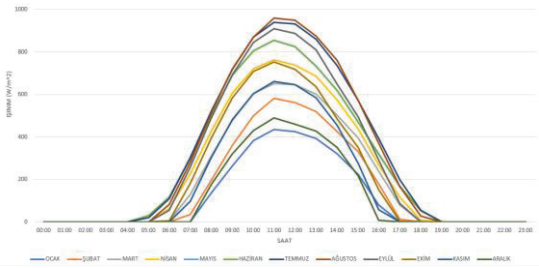
Şekil 6'da gösterilen grafikte Ankara için yıllık bazda ayların saatlik ortalama sıcaklık değerleri verilmiştir.



Şekil 6. Aylık saatlik bazda sıcaklık ortalamaları [8]

Hesap aşamasında yukarıda verilen ortalama sıcaklık profilleri güvenlik faktörü olarak 1,25 ile çarpılıp hesaba dahil edilmiştir. Ortalama sıcaklığın en fazla olduğu ay ağustos ayı olurken en az olduğu ay ocak olmuştur.

Şekil 7'de ise aylık ortalama ışıma verileri grafik olarak verilmiştir.



Şekil 7. Aylık saatlik bazda ışıma ortalamaları [8]

Hesap aşamasında global ışınım değerleri kullanılması tasarım doğrulunun sağlanması için gereklidir. En yüksek ışınım değeri ağustos ayında oluşurken, en düşük ışınım değeri ise ocak ayında oluşmuştur. Ağustos ayında ışıma değeri 11:00-12:00 saatleri arasında 960 W/m^2 değerine kadar yükselmektedir. Ocak ayında ışıma değerinin maksimum değeri

11:00-12:00 saatleri arasında 436 W/m^2'ye kadar düşmektedir.

Üretilen güç değeri inverter sınır değerlerinin dışında, ışımaya bağlı olarak değişmektedir. Üretilen toplam güç yaklaşık olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$P = A * \eta_p * N * \eta_i * Q_e \quad (W) \qquad (12)$$

$A =$ Panel alanı (m^2)

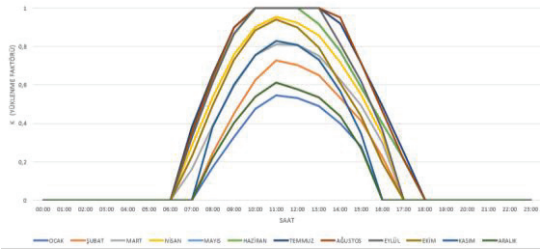
$\eta_p =$ Panel verimi

$N =$ Panel sayısı

$\eta_i =$ İnverter verimi

$Q_e =$ Işıma değeri (W/m^2)

Yukarıdaki 12 numaralı formül baz alınarak transformatör için her aya özel yüklenme grafikleri oluşturulmuş ve hesaba dahil edilmiştir. Her aydaki ortalama yük değerleri şekil 8'de grafik olarak verilmiştir. Bu değerler 1,1 güvenlik faktörüyle hesaba dahil edilecektir.



Şekil 8. Aylık saatlik bazda yüklenme faktörü

Belirlenecek transformatör kapasitesi yukarıdaki yüklenme faktörleri, ortam sıcaklıkları ve güvenlik faktörleriyle hesaplanacaktır.

4. OPTİMUM TRANSFORMATÖR KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

Ortam sıcaklığı transformatörler için en önemli faktörlerdendir. IEC 60076 standardından da bilineceği üzere en yüksek sıcaklık değerinin 40° C olduğu durumda aylık en yüksek ortalama sıcaklık 30° C olmaktadır. Yıllık bazda ise ortalama sıcaklık 20 derece olacaktır. Maksimum sıcaklığın artmasıyla aylık ve yıllık ortalama sıcaklık değerleri de artmaktadır.

Hesaplar için fark denklemlerinin çözümünün yapıldığı Excel programı oluşturulmuştur. Bu hesapların doğruluğunun teyidi için sıcaklık artış testi yapılan bir transformatörde tepe yağ sıcaklık farkı değişimi incelenmiştir. İncelenecek trafonun etiket değerleri tablo 1'de verilmiştir.

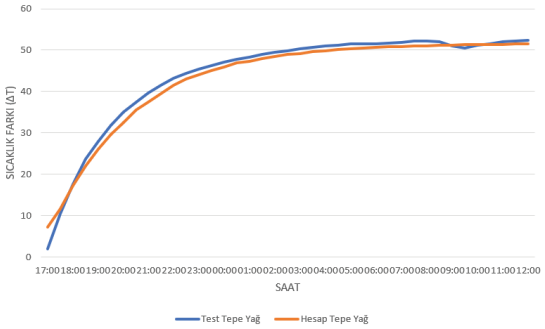
Tablo 1. Transformatör plaka değerleri

Güç (kVA)	6400
Gerilim (kV)	33/0,8/0,8
Bağlantı Grubu	Dy11y11
Soğutma Tipi	ONAN
Frekans (Hz)	50



Şekil 9. Test yapılan transformatör

Hesap programının ve hesapların kontrolü için seçilen transformatör dalga duvarlı yapıdadır. Parametreler τ_0=204 , τ_w=5,6 , R=11,114 , $\Delta\theta_{or}$=51,6 , $\Delta\theta_h$ =14,5 olarak hesaplanmıştır. *x=0,8, y=1,6* , k_{11} *=1* , k_{21} *=1* , k_{22} *=2* olarak IEC 60076-7 standardından alınmıştır. Testten ölçülen ve hesaplanan tepe yağ sıcaklık farkı değişimi şekil 10'da grafik olarak gösterilmiştir.

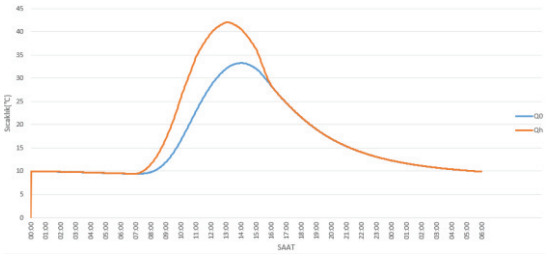


Şekil 10. Tepe yağ sıcaklık sonuçları

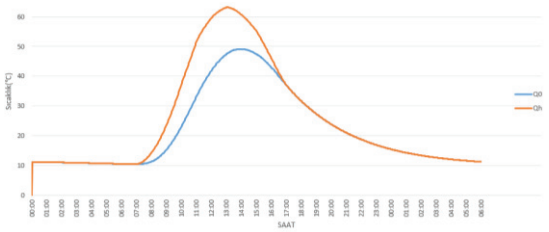
Test ve hesapların iyi bir uyum sağladığı şekil 10'daki grafikte görülmektedir. Yöntemin uygunluğu test verileri ile teyit edilmiştir. Aradaki fark %5'den küçük olmuştur ve k_{11} katsayısını test sonuçlarına göre revize ederek kapatılabilmektedir. Test sonuçlarına göre belirlenen k_{11} katsayısı benzer transformatörlerde de kullanılabilir.

3890 kVA tepe yükü olan GES için optimize transformatör sıcaklık ve yük faktörleri dikkate alınarak tasarlanacaktır. Tasarlanan transformatör mevcut santralde ömür kaybına uğramadan nominal şartlarda çalışacaktır. Çözüm için zaman adımı 1 dakika olarak belirlenmiştir.

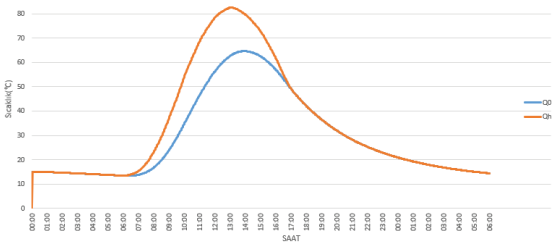
Parametreler, τ_0 =200 ,τ_w =3,1 ,R =6,95, $\Delta\theta_{or}$=60, $\Delta\theta_h$ =18 olarak hesaplanmış ve x=0,8 , y=1,6 , k_{11}=1 , k_{21}=1 , k_{22}=2 IEC 60076-7 standardından alınmıştır. Aşağıdaki grafiklerde (Şekil 11-22) tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığının değişim eğrileri saatlik olarak ayın bir günü için verilmiştir.



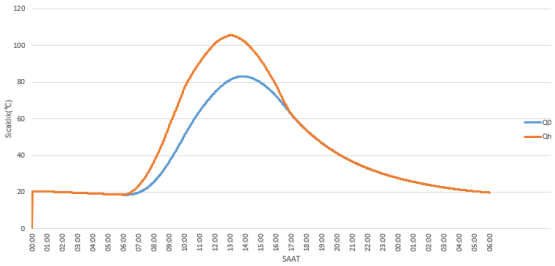
Şekil 11. Ocak ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



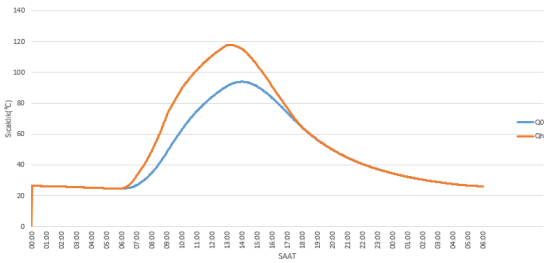
Şekil 12. Şubat ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



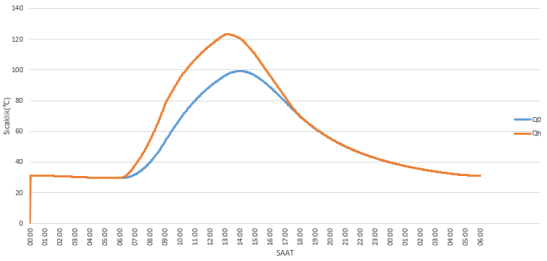
Şekil 13. Mart ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



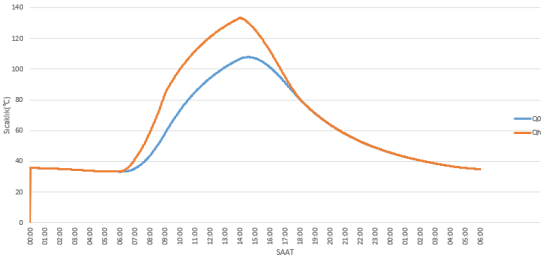
Şekil 14. Nisan ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



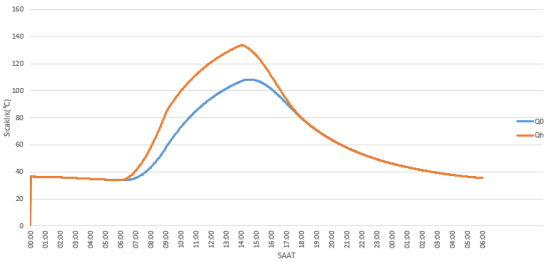
Şekil 15. Mayıs ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



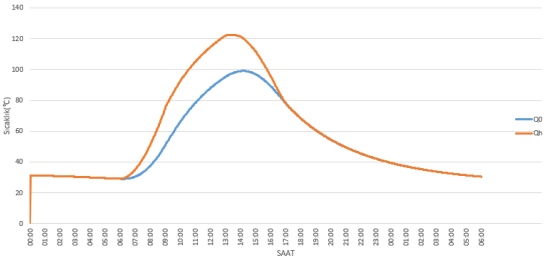
Şekil 16. Haziran ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



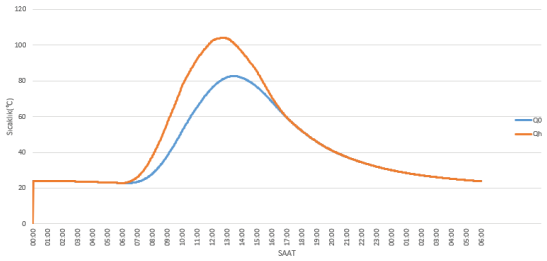
Şekil 17. Temmuz ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



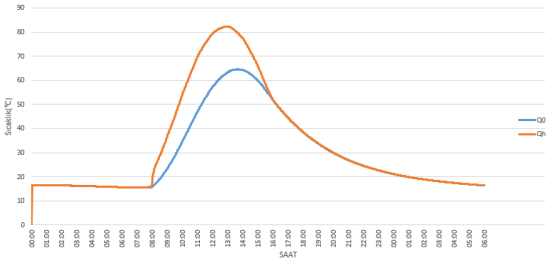
Şekil 18. Ağustos ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



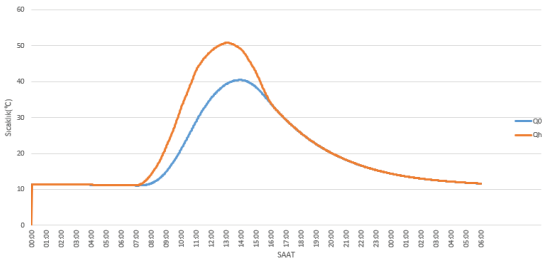
Şekil 19. Eylül ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



Şekil 20. Ekim ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı

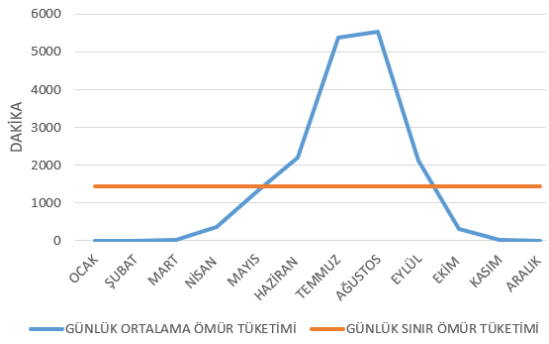


Şekil 21. Kasım ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı



Şekil 22. Aralık ayı tepe yağ ve sıcak nokta sıcaklığı

Grafiklerden de görüldüğü üzere en yüksek sıcaklık ve enerji üretimi ağustos ayında, en düşük sıcaklık ve enerji üretimi ocak ayında meydana gelmiştir.



Şekil 23. Ay bazında günlük ömür tüketimi

Şekil 23'de ise aylık bazda bir günde transformatörde tüketilen ömür için grafik paylaşılmıştır.

Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında transformatör nominal ömrünün üzerinde ömür tüketimi gerçekleştirmiştir. Kalan 8 ay boyunca nominal ömrünün altında çalışmıştır. Bu çalışma rejimi ile yıllık bazda toplam ömürde bir artma ve azalma olmayacak şekilde optimum transformatör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇ

Transformatörler özel durum haricinde tasarım aşmasında sürekli tam yükte çalışacak şekilde tasarlanır. GES'lerde kullanılan transformatörler ülkemizde genellikle tepe yük baz alınarak seçilir ama GES sürekli olarak tam kapasite çalışmamaktadır. Bunun başlıca nedeni güneşlenme ve ışıma değerlerinin sürekli olarak inverterin tepe gücünü verebilecek seviyede olmamasıdır.

Bu çalışmada 3890 kVA maksimum üretimi olan bir GES varsayılmıştır. Optimize edilen 3890 kVA solar yüklü çalışmaya uygun ve tam kapasite sürekli 3890 kVA çalışmaya uygun transformatör arasında %20 maliyet farkı oluşmuştur. Maliyet farkının yanında transformatörde kullanılan alüminyum ve silisli sac miktarındaki azalma ile boyutlarda da azalma meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak optimize edilmiş transformatörlerin kullanılması durumunda transformatör çalışma şeklinde ve performansında değişiklik olmadan yatırım maliyetlerinde ciddi düşüş yaşanmıştır.

Sonuç olarak sürekli tam yükte çalışmayan sistemlerde yatırım maliyetlerinin düşmesi için transformatörün yüklenme optimizasyonu yapılarak tasarlanması sistem açısından daha ekonomik ve optimum olmaktadır.

Sonraki çalışmalarda, belirli bir lokasyonda GES tasarlanabilir. Bu santralde kullanılacak transformatör yüklenme kapasitesine ve ortam sıcaklığına göre en optimum şekilde tasarlanarak, saha uygulaması yapılabilir. Transformatör davranışı 12 ay boyunca takip edilerek, uygunluğu teyit edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Khemmook, P., Suwan-ngam, W., & Khomfoi, S. (2015, June). Suitable power transformers for solar farm applications. In 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (pp. 1-6). IEEE.

[2] Boccaletti, C., & Macilletti, M. (2011, June). Electrical storage systems in cogeneration plants based on the solar energy source. In 2011 international conference on clean electrical power (ICCEP) (pp. 407-412). IEEE.

[3] Khemmook, P., Suwan-ngam, W., & Khomfoi, S. (2015, June). Suitable power transformers for solar farm applications. In 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (pp. 1-6). IEEE.

[4] Trevas, D. A., Peterson, A., Rapp, K. J., & Luksich, J. (2012, May). Optimal sizing of solar energy transformers using natural ester fluid. In *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (pp. 1006-1010). IEEE.

[5] Awadallah, M. A., Xu, T., Venkatesh, B., & Singh, B. N. (2015). On the effects of solar panels on distribution transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 31(3), 1176-1185.

[6] Zhong, X. (2021, December). Study on Down-sizing Inverter Transformers in Solar Farms. In 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)

[7] CODE, P. (2005). Power transformers–Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers

[8] European Commission, Joint Research Centre. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

KONUTLARDA AKILLI TERMOSTAT İLE ISIL KONFOR VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÇÖZÜMLERİ

Kaan Özbahçeci[(1)]	Cansu Doğan[(1)]	Ömer Hısım[(1)]	Engin Dursun[(2)]	Hacer Öztura[(1)]
kaaneyta35@gmail.com	cansudogan3819@gmail.com	omerhisim@icloud.com	engindursun@valf.com.tr	hacer.sekerci@yasar.edu.tr

[(1)]Yaşar Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bornova İzmir
[(2)] Valf Sanayii Aş. Manisa OSB 1.Kısım Yunusemre Manisa

***ÖZET**; Bu projede, sıcak suyun devridaimi ile çalışan radyatörlerin her birinin elektronik termostatik radyatör vanası (eTRV) aracılığıyla kontrol edildiği, oda termostatı ve kombi RF modülü ile kablosuz iletişim kurabilen bir sistem tasarlanmıştır. Yapay zekâ (YZ) kullanılarak sistemin kullanıcı alışkanlıklarını öğrenmesi, bu verileri bir veri setine dönüştürmesi ve böylece kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan sıcaklığın otomatik olarak düzenlenmesi amaçlanmıştır.*

Kullanıcının her bir radyatör için manuel olarak belirlediği sıcaklık değerleri, Arduino Nano aracılığıyla toplanmıştır. Dış ortam sıcaklık ve nem verileri ise, dış mekâna yerleştirilen bir sensör yardımıyla elde edilerek Arduino Uno tarafından işlenmiştir. Toplanan tüm veriler, ana kontrol birimi olan Arduino Mega üzerinde depolanmıştır. Bu platform üzerinde çalışabilecek hafif bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiş ve model, sistemin sınırlı işlem kapasitesine uygun biçimde TensorFlow Lite ve TinyML teknolojileri kullanılarak optimize edilmiştir. Gerçek zamanlı çalışabilme özelliği sayesinde her odanın sıcaklık ayarları kişiselleştirilebilmektedir.

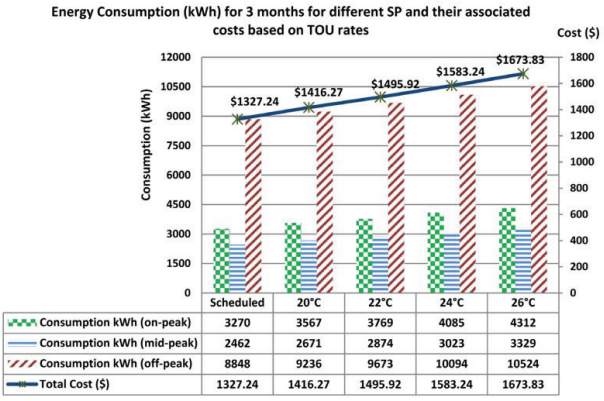
Denetimli öğrenme modeline dayalı olarak geliştirilen sistem, her radyatör için bireysel sıcaklık tercihlerini dikkate alarak çalışmaktadır. Bu sayede, kullanıcı tarafından daha önce belirlenmiş sıcaklık değerlerine göre her alanın sıcaklığı otomatik olarak ayarlanmakta ve kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duyulmadan öneriler sunularak en uygun sıcaklık değeri belirlenmektedir. Bu yapı, her odada ısıl konforun sağlanmasına ve enerji tüketiminin optimize edilmesine olanak tanımaktadır.

1.GİRİŞ

Bu projenin temel amacı, konutlarda yer alan farklı odalardaki bireylerin farklı sıcaklık tercihlerine yanıt verebilecek, kişiselleştirilmiş ve enerji verimliliği yüksek bir akıllı termostat sistemi geliştirmektir. Geliştirilen sistem, kullanıcıların manuel müdahalesine ihtiyaç duymadan geçmiş sıcaklık tercihlerini öğrenerek, her radyatör için ayrı sıcaklık kontrolü sağlayabilen bir kontrol mekanizmasına sahiptir. Bu sayede yalnızca ısıl konfor sağlanmakla kalınmayıp, aynı zamanda enerji tasarrufu da hedeflenmektedir.

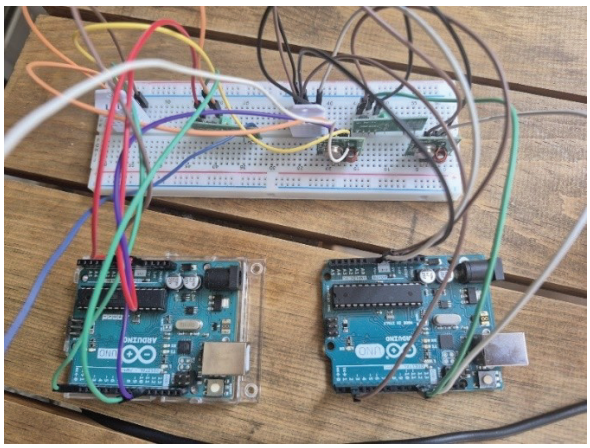
Projenin özgün yönlerinden biri, kullanıcıların geçmiş sıcaklık tercihlerini yapay zekâ algoritmaları ile analiz ederek odaya özel sıcaklık ayarlarının otomatik olarak belirlenmesidir. Böylelikle bireylerin günlük rutinleri ve çevresel koşullar göz önünde bulundurularak, sistem kullanıcı müdahalesi olmadan kendini optimize edebilecektir.

Şekil-1 sabit bir sıcaklık ayar noktası kullanmak yerine farklı sıcaklık ayar noktaları ve haftalık programlar ile enerji tüketiminde önemli ölçüde tasarruf sağlanabileceğini göstermektedir [1].



Şekil 1. *Değişken ısı ayarına göre enerji tüketimi (kWh) ve ilgili maliyetlerin karşılaştırılması [1]*

Ayrıca sistem, dış ortam koşullarını (sıcaklık ve nem gibi) dikkate alarak, iç ortam sıcaklığını en uygun düzeyde tutmayı amaçlamakta ve bu sayede kullanıcı memnuniyeti ile enerji tasarrufu arasında denge kurmaktadır [2]. Şekil-2'de İki adet Ardunino Uno RF433Mhz alıcı ve verici kullanılarak birbirleri ile haberleşmesi sağlanmış ve DHT-22 sıcaklık-nem sensörleri ile ilgili ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2. *Arduino başlangıç tasarımı*

1. Ortam Verisi Toplama

İç ortam ve dış ortamdaki sıcaklık/nem değerlerini sensörler aracılığıyla alıyor.

Dış ortam sensörü büyük ihtimalle dışarıda konumlandırılmak üzere hazırlanmış (görseldeki Arduino'lardan biri bu görevi üstleniyor).

2. Veri Aktarımı ve Merkezi Toplama

Her Arduino, ölçtüğü verileri bir RF modülü ile ana Arduino'ya (MEGA ya da bu testte UNO) gönderiyor.

RF haberleşmesi, odalarda kablo karmaşası olmadan veri toplamaya olanak sağlıyor.

3. Termostatik Kontrol (E-TRV için)

Her odada bulunan Arduino, ortam sıcaklığına göre Elektronik Termostatik Radyatör Vanası (E-TRV)'yi kontrol edecek şekilde programlanacak. Bu sayede kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan akıllı ısıtma sağlanacaktır.]

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, konut içi sıcaklık kontrolünü kişiselleştirebilen, yapay zekâ destekli bir akıllı termostat sistemi geliştirilmiştir. Sistem, her odadaki radyatörlerin sıcaklıklarını bağımsız olarak kontrol edebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Her radyatör, Arduino Nano aracılığıyla kontrol edilen elektronik termostatik vanalar (E-TRV) ile donatılmıştır. E-TRV görseli Şekil-3'de verilmiştir. Bu vanalar, step motorlar yardımıyla açılıp kapanarak su debisini düzenlemekte, böylece her odanın sıcaklığı ayrı ayrı ayarlanabilmektedir. İç ortam sıcaklık ve nem verileri her bir odada yerleştirilen sensörlerle ölçülürken, dış ortam verileri ise Arduino Uno birimine bağlı dış sensörler aracılığıyla elde edilmiştir. Toplanan tüm veriler, sistemin merkezi kontrol birimi olan Arduino

Mega'ya iletilmiş ve burada analiz edilmiştir.



Şekil 3. *Elektronik Termostatik Radyatör Vanası (E-TRV)*

Sistem üç temel modülden oluşmaktadır:

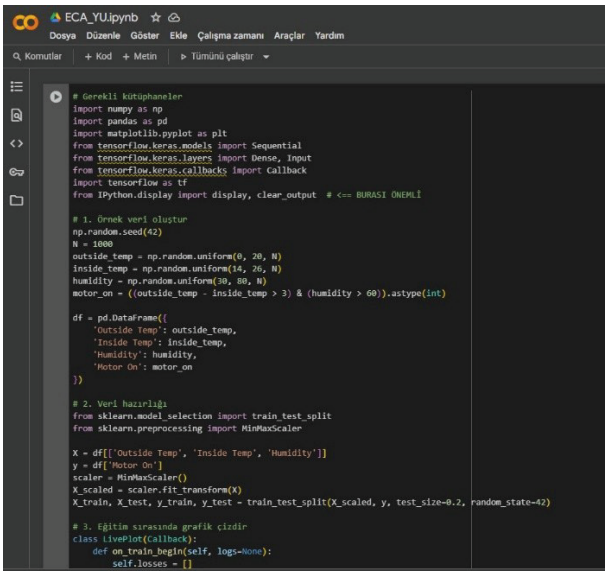
Veri Toplama Modülü: Radyatör bulunan her odadaki Ardunio Nano/Uno üzerindeki DHT-22 sıcaklık ve nem sensörlerinden toplanan veriler 433 MHZ RF modül ile Arduino Mega'ya iletilir.

Veri İşleme ve Kontrol Modülü: Arduino Mega, üzerinde bulunan microSD kart üzerinde toplanan verileri analiz ederek geçmiş kullanıcı tercihlerini öğrenen yapay zekâ algoritmasını çalıştırır.

Karar ve Hareket Modülü: Kullanıcı tercihleri de dikkate alınarak, algoritma değişen ısı ve nem koşullarında öğrendiği verilere dayanarak step motorlar yardımıyla E-TRV'ler çalıştırılır ve odalara özel sıcaklık ayarlamaları yapılır [3-5].

Sistemin donanımsal bileşenleri arasında Arduino Nano (oda bazlı veri toplama ve kontrol), Arduino Uno (dış ortam verisi ölçümü), Arduino Mega (merkezi kontrol), DHT22 sıcaklık-nem sensörleri, düşük akımlı step motorlar ve motor sürücüler yer almaktadır. Ayrıca, sistemin mobil uygulama ve Google Home ile entegrasyonu sağlanarak, kullanıcıların manuel kontrol veya sesli komutlar ile etkileşimde bulunabilmeleri mümkün kılınmıştır [6]. Şekil-4'de google colab üzerinde eğitilen yapay zeka algoritması gösterilmiştir.

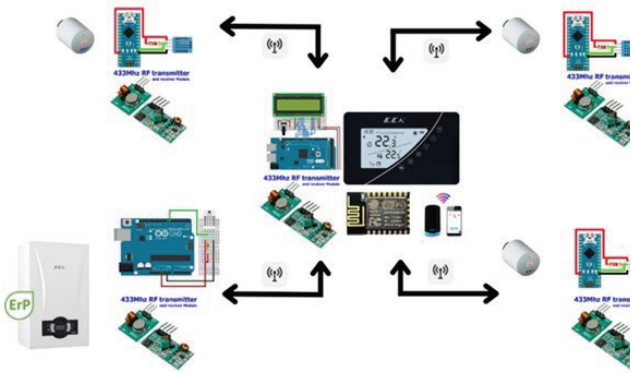
Bu kod, bir yapay sinir ağı (neural network) modeli ile bir sınıflandırma problemi çözmek için hazırlanmıştır. Amaç, dış ortam sıcaklığı, iç ortam sıcaklığı ve nem değerlerine göre bir motorun çalışıp çalışmayacağını (Motor On) tahmin etmektir.



Şekil 4. *Yapay zeka destekli olarak geliştirilen kod*

Geliştirilen yapay sinir ağı modeli, sıcaklık, nem ve geçmiş radyatör durumu gibi çevresel verileri girdi olarak alarak, her odanın sıcaklığını kişisel tercihlere göre ayarlayabilmektedir. Bu model, sınırlı donanım kaynaklarına sahip Arduino Mega üzerinde çalışabilecek biçimde TensorFlow Lite ve TinyML kullanılarak optimize edilmiştir. Sistem, denetimli öğrenmeye dayalı olarak zaman içinde kullanıcı

müdahalesine gerek kalmadan kararlı sıcaklık ayarları önerme kapasitesi kazanmıştır. Şekil-5'de bulunan görsel, oda bazlı sıcaklık kontrolü sağlayan akıllı bir termostat sistemini göstermektedir. Her oda, sıcaklık ve nem sensörleri ile donatılmış bir Arduino birimi tarafından izlenmekte ve 433 MHz RF modülleri ile veriler merkezî kontrol birimine (Arduino Mega) iletilmektedir. Merkezî birim, kullanıcı alışkanlıklarını öğrenerek yapay zekâ destekli sıcaklık ayarlamaları yapmakta ve kombiyi kontrol etmektedir. Sistem ayrıca Wi-Fi üzerinden ECA mobil uygulama ve Google/Apple Home ile uzaktan erişime olanak tanımaktadır.



Şekil 5. *Tasarımın şematik gösterimi*

Bu projede, akıllı ev ısıtma sistemi için bir Lightweight Neural Network (Hafif Yapay Sinir Ağı) modeli kullanılacaktır. Sistem, çevresel verileri analiz ederek peteklerin açılıp kapanmasına yönelik kararlar alacak ve kullanıcıya Google Home ve mobil uygulama üzerinden kontrol imkânı sunacaktır. Yapay sinir ağı, sensörlerden gelen sıcaklık, nem, hareket ve geçmiş petek durumu gibi verileri kullanarak enerji verimli ve kullanıcı dostu bir ısıtma çözümü sunacaktır.

Kullanılacak model, Arduino Mega'nın işlem gücü ve bellek kapasitesine uygun şekilde tasarlanacaktır. Modelin giriş katmanı, çevresel verileri ve kullanıcı tercihlerini alırken, çıkış katmanı peteklerin açılması veya kapanmasına karar verecektir. Gizli katman sayısı ve nöron sayısı minimal düzeyde tutulacak, böylece model hafif bir yapıda kalacak ve gerçek zamanlı çalışabilecektir. TensorFlow Lite kullanılarak eğitilen model, TinyML platformunda optimize edilecek ve Arduino Mega'ya entegre edilecektir.

Eğitilecek sinir ağı modeli, çevresel faktörler ile kullanıcı ihtiyaçlarını öğrenerek doğru kararlar almayı hedefleyecektir. Modelin girişleri, sıcaklık (°C), nem (%), hareket algılama durumu (sıcaklık ayarlı), geçmiş petek durumu (sıcaklık ayarlı) ve saat-tarih bilgisi gibi değişkenlerden oluşacaktır. Çıkış ise peteklerin açık (sıcaklık ayarlı) veya kapalı (0) olması yönünde bir sınıflandırma olacaktır. Bu model hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebildiği için akıllı ev ortamındaki dinamik koşullara kolayca uyum sağlayacaktır.

Geliştirilen yapay zekâ destekli akıllı termostat sistemi, konutlarda oda bazlı sıcaklık kontrolü sağlayarak hem kullanıcı konforunu artırmakta hem de enerji verimliliğini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Sistemin gerçekleştirilme sürecinde her odada ayrı bir Arduino Nano birimi konumlandırılmış ve bu birimler sıcaklık ile nem verilerini toplayarak step motor aracılığıyla termostatik vanaları kontrol etmiştir. Merkezi kontrol birimi olan Arduino Mega, tüm veri akışını yönetmiş ve analiz etmiştir. Sistem, kullanıcı geçmiş tercihlerini öğrenerek otonom karar alma

yeteneği kazanmış, mobil uygulama ve Google/Apple Home entegrasyonu ile de kullanıcı dostu bir arayüz sunmuştur.

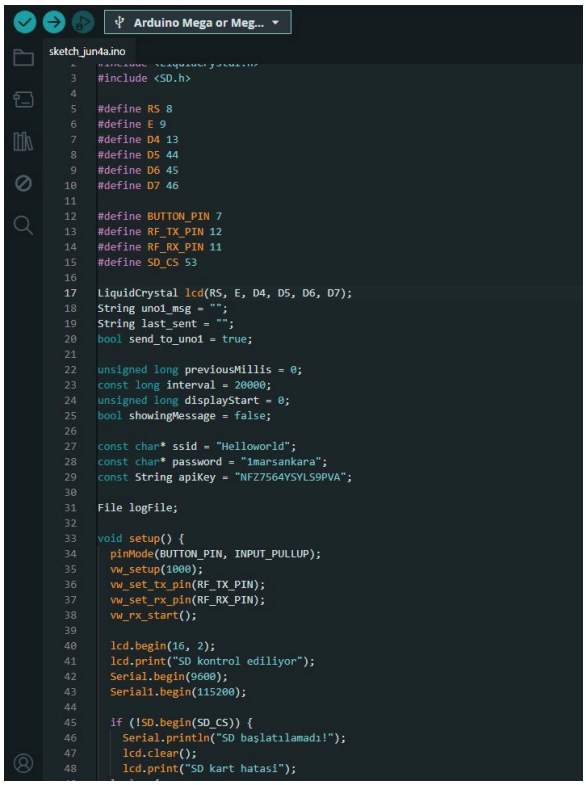
Evdeyken Oda Sıcaklık Ayarları (°C)	Dışarıdayken Oda Sıcaklık Ayarları (°C)
Salon: 22, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 23	–
Salon: 21, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 23	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16
Salon: 21, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 22	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16
Salon: 22, Yatak O.: 21, Çocuk O.: 23	–
Salon: 22, Yatak O.: 21, Çocuk O.: 23	–
Salon: 21, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 23	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16
Salon: 21, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 22	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16
Salon: 21, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 22	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16
Salon: 21, Yatak O.: 20, Çocuk O.: 23	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16
Salon: 22, Yatak O.: 21, Çocuk O.: 23	Salon: 17, Yatak O.: 16, Çocuk O.: 16

Şekil 6. *Testler esnasında ölçülen değerler*

Testler kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmiş ve her odadaki sıcaklık değişimleri hassas sensörlerle ölçülmüştür**.** Yapay zekâ destekli kontrol mekanizması sayesinde hedeflenen konfor aralığı başarıyla korunmuştur. Enerji tasarrufu açısından değerlendirildiğinde ise sistem yalnızca gerekli durumlarda radyatörleri aktive ederek manuel kullanım ile kıyaslandığında kullanıcı hatası kaynaklı israfın önüne geçmesi hedeflenmiştir [1, 7, 8]. Özellikle düşük güç tüketimli bileşenlerin tercih edilmesi çevre dostu bir çözüm olarak öne çıkmıştır.

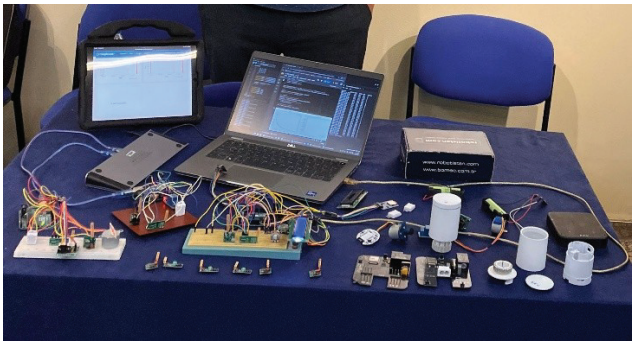
Datetime	Outside Temp	Inside Temp	Humidity	Motor On
2024-11-01 00:00	10.7	12.2	79.5	1
2024-11-01 01:00	20.9	22.2	83.1	0
2024-11-01 02:00	16.3	17.9	55.1	1
2024-11-01 03:00	19.4	19.7	55.9	0
2024-11-01 04:00	15.5	15.9	71.1	1
2024-11-01 05:00	21.0	22.9	72.7	0
2024-11-01 06:00	16.7	18.9	53.7	1
2024-11-01 07:00	20.5	22.0	72.4	0
2024-11-01 08:00	19.6	21.2	84.1	0
2024-11-01 09:00	13.8	16.8	83.8	1
2024-11-01 10:00	11.6	13.4	68.7	1
2024-11-01 11:00	19.1	19.9	54.4	0
2024-11-01 12:00	12.6	14.1	76.3	1
2024-11-01 13:00	16.8	18.8	60.9	1
2024-11-01 14:00	16.8	17.8	59.5	1
2024-11-01 15:00	12.9	15.0	72.4	1
2024-11-01 16:00	12.1	13.7	74.6	1
2024-11-01 17:00	18.7	20.6	61.9	0
2024-11-01 18:00	16.7	19.3	49.4	1
2024-11-01 19:00	11.3	13.8	80.2	1
2024-11-01 20:00	13.0	15.8	79.5	1
2024-11-01 21:00	17.3	19.1	76.7	1
2024-11-01 22:00	18.3	20.7	90.0	0
2024-11-01 23:00	9.0	10.8	64.3	1
2024-11-02 00:00	10.4	12.2	76.4	1
2024-11-02 01:00	12.8	15.0	87.7	1
2024-11-02 02:00	14.4	17.2	85.1	1
2024-11-02 03:00	13.7	15.7	64.4	1
2024-11-02 04:00	14.8	17.4	82.1	1
2024-11-02 05:00	22.8	24.7	70.5	0

Şekil 7. *İç ve dış ortam sıcaklık-nem verileri(Dataset)*



Şekil 8. *IoT Tabanlı Isıtma Sisteminin Merkezi Kontrol Mimarisi*

Sistem, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile de uyum içerisindedir. SKA 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar), SKA 12 (Sorumlu Üretim ve Tüketim) ve SKA 13 (İklim Eylemi) başta olmak üzere birçok hedefe katkı sağlamakta, bireysel farkındalıkla toplumsal dönüşümü desteklemektedir [8, 9].



Şekil 9. *Nihai devre*

3. SONUÇ

Geliştirilen sistemin avantajları arasında kişiselleştirilmiş ısıtma, düşük enerji maliyeti, kullanıcı alışkanlıklarını öğrenebilen yapay zekâ yapısı ve kullanıcı dostu arayüzler yer almaktadır. Öte yandan, sistemin kablosuz bağlantı gerektirmesi ve ilk kurulumda teknik bilgi ihtiyacı gibi sınırlamaları da bulunmaktadır. Birden fazla kullanıcının farklı tercihleri olduğunda, sistemin öğrenme algoritmalarının daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

Gelecek perspektifinde; sistemin ticarileştirilmesi, daha gelişmiş makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonu, dış hava tahminlerinin sisteme dâhil edilmesi, donanım sayısının azaltılarak maliyetin düşürülmesi, çok dilli kullanıcı arayüzü ve merkezi ısıtma sistemlerine entegrasyon gibi hedefler bulunmaktadır. Bu gelişmelerle birlikte sistemin, akıllı şehir altyapılarına entegre edilebilecek seviyeye ulaşarak sürdürülebilir yaşam çözümlerine katkı sunması öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Keshtkar, A., Arzanpour, S., Keshtkar, F., & Ahmadi, P. (2015). Smart residential load reduction via fuzzy logic, wireless sensors, and smart grid incentives. Energy and Buildings, 104, 165–180.

[2] International Energy Agency, “Energy Efficiency 2021,” IEA, Paris, 2021.

[3] Energy and Buildings, “Smart Thermostats for Residential Applications: A Review,” Elsevier, Vol. 149, 2017, pp. 249–259.

[4] Arduino Official Website, https://www.arduino.cc/

[5] DHT22 Sensor Datasheet, Adafruit Industries, https://www.adafruit.com/

[6] Google Home Developer Guide, https://developers.google.com/assistant

[7] European Union, “Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings,” Brussels, 2010.

[8] E. Vine, “Occupant behavior and the potential for conservation,” Energy and Buildings, Vol. 42, Issue 12, 2010, pp. 2454–2463.

[9] United Nations, “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development,” 2015.

[10] United Nations Environment Programme (UNEP), “Emissions Gap Report 2022,” Nairobi, Kenya, 2022.

LCC-S KOMPANZASYONLU ENDÜKTİF KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SİSTEMİ TASARIMI

Asım Furkan GÖK[1], Alperen ETELİK[2], Mutlu BOZTEPE[3]

Ege Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100 Izmir, TÜRKİYE
[1]05210000610@ogrenci.ege.edu.tr, [2]05210000635@ogrenci.ege.edu.tr, [3]mutlu.boztepe@ege.edu.tr

ÖZET

Bu tez çalışmasında, LCC-S kompanzasyon topolojisi kullanılarak geliştirilen, kararlı çıkış gerilimi karakteristiğine sahip bir kablosuz güç transferi (WPT) sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem, özellikle elektrikli araçlar gibi hareketli yüklerin şarj edilmesine yönelik olup, primer tarafta LCC ve sekonder tarafta seri kapasitör (S) ile rezonans sağlayarak enerji transferi gerçekleştirmektedir. Sistem, DC kaynak, yarım köprü evirici, LCC topolojisi, kablosuz güç aktarımı sağlayan bobinler, diyot köprüsü, filtre ve yük kısımlarından oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında hem sistemin teorik tasarım süreçleri hem de PSIM ortamında yapılan benzetim analizleri detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, kurulan prototip devre üzerinden alınan deneysel sonuçlara da yer verilerek tasarımın doğruluğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Güç Transferi, LCC-S Topolojisi, Rezonans Yarım Köprü Evirici

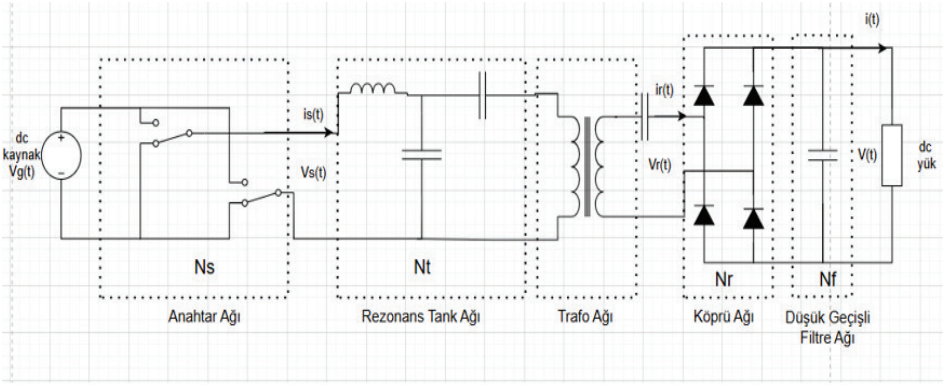
1. GİRİŞ

Kablosuz güç transferi (WPT) sistemleri, günümüzde elektrikli araçlar, medikal cihazlar ve endüstriyel otomasyon gibi birçok uygulama alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle temas gerektirmeyen enerji aktarımı sayesinde hareketli ya da izoleli sistemlerde güvenli, verimli ve uzun ömürlü çözümler sunmaktadır. Bu sistemlerin en önemli bileşenlerinden biri olan rezonans tabanlı kompanzasyon topolojileri, enerji transferinde maksimum verim sağlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, WPT sistemlerinde rezonanslı kompanzasyon topolojilerinin kullanımı yaygındır. Yang ve ark. [1] yaptığı çalışmada, sabit çıkış gerilimi için LCC-S topolojisinin devre şeması belirtilmiştir. Şekil 1'de devrenin temel şeması da verilmiştir. Bu yapının sekonder tarafta kullanılan seri kapasitör ile kararlı bir güç aktarımı sağladığı vurgulanmıştır. Yine benzer sistemlerde, yüksek verimlilik ve düşük bileşen gerilim stresi için yarım köprü evirici topolojisi tercih edilmiştir [2].

Rezonans tabanlı topolojiler sayesinde anahtarlama kayıpları azaltılmakta ve sistemin genel verimliliği artırılmaktadır. Bu bağlamda, ZVS (Zero Voltage Switching) veya ZCS (Zero Current Switching) gibi yumuşak anahtarlama teknikleri üzerine de birçok çalışma yapılmıştır [4][5]. LCC-S gibi topolojiler bu avantajları, ek yardımcı devre gereksinimi olmadan sağlayabilmektedir.

Ayrıca, bazı yeni nesil dönüştürücülerde, bileşen sayısının azaltılması, sistem boyutlarının küçültülmesi ve ekonomik maliyet hedefleri doğrultusunda, yüksek verimli tek aşamalı dönüştürücü yapıları önerilmiştir. Bu bağlamda, bu çalışmada önerilen LCC-S tabanlı WPT sistemi, düşük bileşen sayısı, yüksek güç yoğunluğu ve verimli enerji

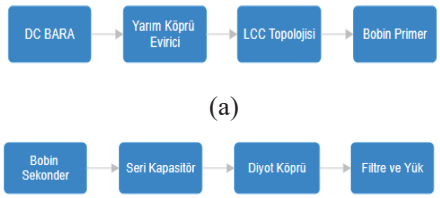


Şekil 1. LCC-S topoloji temel devre şeması

aktarımı ile literatürdeki benzer sistemlerle rekabet edebilir niteliktedir. Bu çalışmada, LCC-S kompanzasyon topolojisi kullanılarak, sabit çıkış gerilimi sağlayabilen bir kablosuz güç transferi sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem; DC kaynak, yarım köprü evirici, LCC topolojisi, primer-sekonder bobinler, seri kapasitör (S), diyot köprüsü, filtre ve yük birimlerinden oluşmaktadır. Sistem tasarımı hem teorik olarak ele alınmış hem de PSIM ortamında yapılan simülasyon analizleriyle desteklenmiştir. Ayrıca prototip devre kurularak deneysel sonuçlar elde edilmiştir.

2. LCC-S TOPOLOJİSİ

LCC-S topolojisi, kablosuz güç transferi (WPT) sistemlerinde sabit çıkış gerilimi (CV) sağlamak amacıyla kullanılan rezonans tabanlı bir kompanzasyon yapısıdır. Şekil-1'de prensip devre şeması görülen bu topolojide primer tarafta, bir seri endüktans, bir paralel kapasitör ve bir seri kapasitör yer alarak LCC Rezonans Tank Ağı oluşturur; sekonder tarafta ise sadece bir seri kapasitör bulunur. Primer devre rezonans koşuluna getirilerek yüksek frekansta maksimum güç aktarımı sağlanır ve sistem,

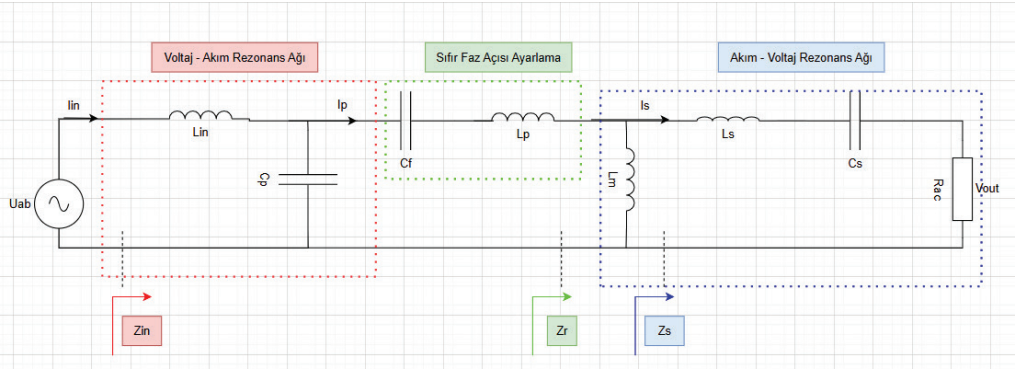


(a)

(b)

Şekil-2: a) Primer ve b) sekonder devre aşamaları

değişen yük koşullarına karşı kararlı bir çıkış gerilimi üretebilir. Şekil-2(a) ve (b)'de görüldüğü gibi bu devrenin çalışma mantığı şu şekildedir; sistem, doğru gerilim kaynağından aldığı DC gerilimi yarım köprü evirici sayesinde yüksek frekanslı alternatif akıma dönüştürür. Bu AC sinyal, primer taraftaki LCC rezonans devresine uygulanır; burada seri endüktans ve kapasitörler belirli bir rezonans frekansında enerji kayıplarını minimize ederek salınım yapar. Rezonanslı primer bobin, karşısındaki sekonder bobinle manyetik kuplaj yoluyla kablosuz enerji aktarımı gerçekleştirir. Sekonder taraftaki seri kapasitörle birlikte oluşan rezonans, transfer edilen enerjinin etkin biçimde alınmasını ve sabit bir çıkış gerilimi elde edilmesini sağlar. Son olarak, sekonderden gelen AC enerji diyot köprüsü ile doğrultulup filtre devresiyle düzeltilerek temiz ve stabil bir DC çıkış sağlanır. Böylece, LCC-S tabanlı WPT sistemi,



Şekil 3. LCC-S topoloji temel harmonik eşdeğer devresi

izolasyonlu, güvenli ve yüksek verimli enerji transferi imkânı sunar.

3. TASARIM VE SİMULASYON ÇALIŞMALARI

LCC-S topolojisine dayanan kablosuz güç transferi sisteminin tasarımında öncelikle sistemin temel harmonik eşdeğer devresi Şekil 3'teki gibi elde edilir. Şekil 4'te görülen kompanzasyon empedans eşleme ile voltaj-akım rezonans ağı devresinde X empedansı yazılırsa;

$$X=\omega_0 \cdot L_{in}$$

$$j \cdot X=\frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot C_p}$$

Düğüm denklemi yazılırsa;

$$I_1+I_2=I_3$$

$$I_3=\frac{Vin-Y}{j \cdot X}+\frac{0-Y}{-j \cdot X}=\frac{Vin}{j \cdot X}$$

I_3 akımının yükten bağımsız olarak değer aldığı görülür. I_3 ifadesi eşdeğer devreyi sadeleştirmek için kullanılırsa Şekil 5 elde edilebilir. Burada $Cs \gg Lr$ kabul edilirse aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

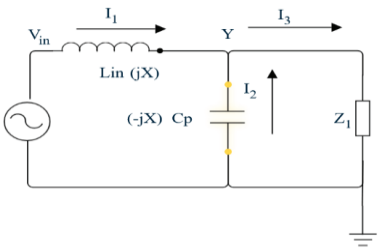
$$\frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot C'}=\frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot Cs}+j \cdot \omega_0 \cdot Lr$$

$$C'=\frac{Cs}{1-\omega_0^2 \cdot Lr \cdot Cs}$$

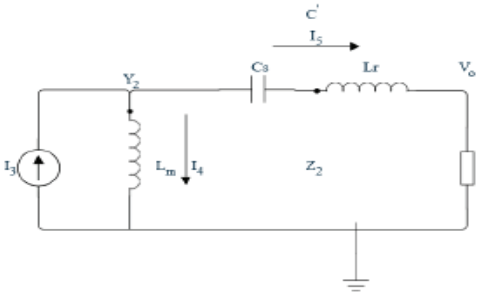
$$K=\omega_0 \cdot Lm$$

$$K \cdot j=\frac{1}{j \cdot \omega_0 \cdot C'}$$

$$I3=I4+I5$$



Şekil 4. Gerilim-Akım Kaynağı Dönüşümü



Şekil 5. Akım - Gerilim Rezonans Ağı

$$I3=\frac{Y2}{j \cdot K}+\frac{Y2-V0}{-j \cdot K}$$

$$I3=\frac{Vo}{j \cdot K}$$

$$Vo=M \cdot \frac{Vin}{Lin}$$

$$\omega_0^2=\frac{1}{Cs \cdot Lm+Lr}$$

LCC-S topolojisinin karakteristik yapısı gereği, uygun parametre seçimiyle Yarım köprü evirici çıkış gerilimi ile evirici akımı arasında yaklaşık sıfır derece faz farkı

sağlanabilmektedir. Bu durum, sistemin yüksek güç faktörü ile çalışmasına, dolayısıyla inverterde anahtarlama kayıplarının azalmasına ve daha verimli bir enerji transferinin gerçekleşmesine imkân verir. Ayrıca sıfır faz açısı koşulu, kontrol algoritmasının basitleşmesine ve sistemin kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır.

Bu nedenle tasarım parametreleri belirlenirken sadece rezonans frekansına ulaşmak değil, aynı zamanda inverterin sıfır faz açısına yakın çalışmasını sağlayacak koşullar da göz önünde bulundurulmuştur. Sıfır faz açısı için yapılan hesaplamalar aşağıdaki gibidir;

$$X=\omega_0 \cdot Lr-\frac{1}{\omega_0 \cdot Cs}$$

$$Zs=j \cdot X+R_{ac}$$

$$Zr=j \cdot \omega \cdot M \,||Zs=\frac{j \cdot \omega \cdot M \cdot Zs}{j \cdot \omega \cdot M+Zs}$$

$$Zin=\left[\left(j \cdot \omega \cdot Lr+\frac{1}{j \cdot \omega \cdot Cf}+Zr\right)\middle|\middle|\frac{1}{\left((j \cdot \omega \cdot Cp)+(j \cdot \omega \cdot Lin)\right]}\right]$$

$$Zin=\frac{\omega^2 \cdot Cf \cdot Lin \cdot Rac}{A \cdot Rac+\omega^4 \cdot M^2 \cdot Cp \cdot Cf}$$

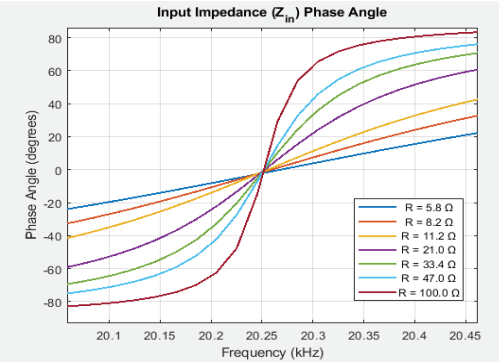
$$A=j \cdot \omega \cdot (Lp-Lin)$$

$$Cf=\frac{Lin \cdot Cp}{Lp-Lin}$$

$$Zin=\frac{8(Lin^2 \cdot RAc)}{\pi^2 \cdot M^2}$$

Giriş faz açısının frekansa göre değişimi MATLAB uygulaması ile hesaplanıp Şekil 6'da verilmiştir.

Primer taraftaki LCC rezonans devresini oluşturan endüktans ve kapasitör değerleri, hedeflenen çalışma frekansına göre hesaplanarak seçilir. Yarım köprü evirici, yüksek frekanslı AC sinyal üretmek için uygun anahtarlama elemanları ile tasarlanır. Sekonder tarafta ise bobin ve seri kapasitör rezonansının sağlanması için bileşen değerleri optimize edilir.



Şekil 6. Giriş Faz Açısı-Frekans Grafiği

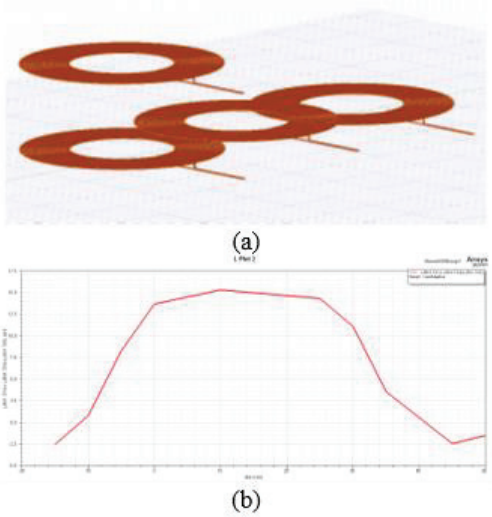
Bu doğrultuda yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen primer ve sekonder taraf parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım parametreleri

Parametre	*Değer*
Lin	12 uH
Cp	4.57 uF
Cf	580 nF
Lp	120 uH
Ls	120 uH
M	15 uH
Cs	530 nF

Enerjinin kablosuz iletimi manyetik kuplajla gerçekleşirken, kuplaj katsayısının verimliliği doğrudan etkilediği için bobin geometrileri ve konumlandırmaları tasarımda dikkatle planlanır. Doğrultucu ve filtre devresi, sekonder çıkış geriliminin sabit olması amacıyla boyutlandırılır.
Kablosuz enerji transferinde en önemli parametrelerden birisi de karşılıklı endüktans değeridir ve enerji transfer veriminin yüksek olması için karşılıklı endüktans değerinin yüksek olması gerekmektedir. Tasarlanan dinamik kablosuz güç aktarım sistemi karşılıklı endüktans değerinin bobinlerin pozisyonuna göre değişimi ANSYS MAXWELL ile elde edilmiş ve Şekil

7'de verilmiştir. Buna göre alıcı bobin hareket halinde iken karşılıklı endüktans değerinin çok az değişimle sabit tutulabildiği görülmektedir.



Şekil 7. a) bobinlerin yerleşimi ve b) alıcı bobin pozisyonuna göre karşılıklı endüktans değişimi

Bu çalışmada LCC-S topolojisine ait kablosuz güç transferi sisteminin tasarım parametreleri, hedeflenen çıkış gücü, rezonans frekansı ve sabit gerilim koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir;

$$Lin=\pi\cdot\frac{\sqrt{2}}{4}\cdot Lm\cdot\frac{Uab}{Ubat}$$

$$Cp=\frac{1}{w^2\cdot Lin}$$

$$Cf=\frac{Lin\cdot Cp}{Lp-Lin}$$

$$Cs=\frac{1}{w^2\cdot Ls}$$

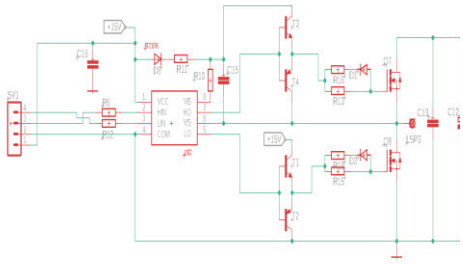
$$Lp'=Lin<-\rightarrow C1=Cp$$

$$w^2=\frac{1}{Lp'\cdot C1}=\frac{1}{Lin\cdot Cp'}$$

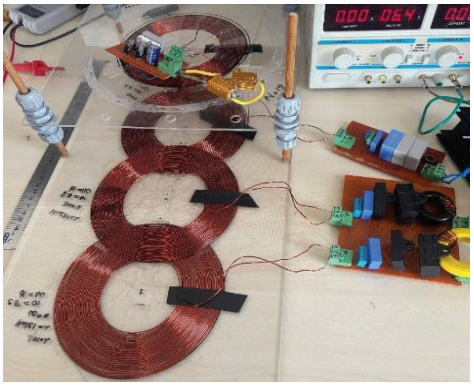
$$Cs'=\frac{Lin}{w^2\cdot(Lin\cdot Ls-2\cdot Lm^2)}$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen LCC-S topolojisine sahip kablosuz güç transferi deneysel prototipinin kontrolü ve anahtarlama sinyallerinin üretilmesi STM32F103 işlemci tabanlı bir mikrodenetleyici kartı ile gerçekleştirilmiştir. Güç devresi olarak Şekil 8'de şeması verilen



Şekil 8. Yarım Köprü Evirici şeması



Şekil 9. Deney prototipinin görünüşü

yarım köprü devresi kullanılmıştır. Devrede anahtarlama elemanları olarak IRFP460 MOSFET'ler tercih edilmiştir. Doğrultma işlemi için yüksek hızlı CMD diyotları kullanılmıştır. Primer ve sekonder taraf için seçilen kondansatör, endüktans ve bobin değerleri hesaplamalar sonucunda optimize edilmiş olup, bu parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Rezonans devresinde, yüksek RMS akıma dayanım sağlamak amacıyla film kapasitörler ve tasarlanan primer-sekonder bobinler yer almaktadır. Deney prototipinin bir fotoğrafı Şekil 9'da görülmektedir.

Sistemin enerji kaynağı olarak 15 V DC giriş gerilimi kullanılmış, bu gerilim yarım köprü evirici üzerinden LCC-S rezonans devresine

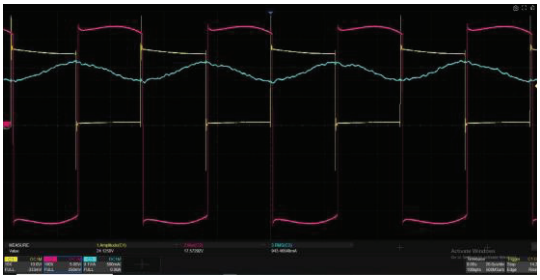
aktarılmıştır. Deneysel sistemin çıkış gerilimi değişen yüklere karşı ölçülmüş ve Tablo 2'de görüldüğü gibi 7,5 V civarında sabit kaldığı gözlenmiştir. Buna karşın yük empedansı değiştiğinden dolayı gerilim sabit olmasına karşın güç değişken olmaktadır. Farklı yük değerleri için sistemde ölçülen giriş ve çıkış elektriksel büyüklükleri ise Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo-2 Sistemin Çıkış Voltaj Sonuçları

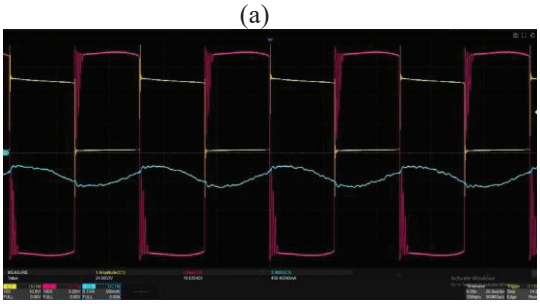
Frekans = 20.3 KHz	Çıkış Voltaj Değerleri
R = 1 Ω	7.18 V
R = 12 Ω	7.31 V
R = 37 Ω	7.5 V
R = 49 Ω	7.59 V
R = 50 Ω	7.61 V

Tablo 3. Deneysel sonuçlar

R	Vin	Iin	Vo	Io
1Ω	14.6V	2.21 A	7.91 V	4.02 A
11.2Ω	14.6V	1.86 A	11.82 V	1.18 A
33 Ω	14.62V	1.82 A	12.67 V	0.63 A

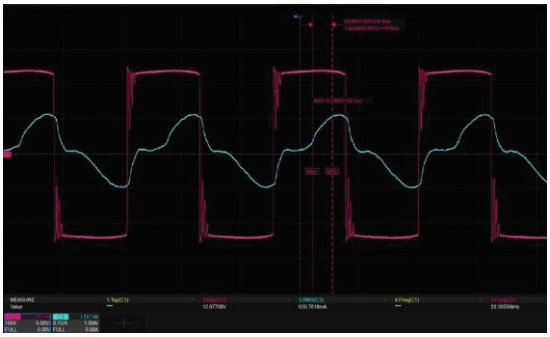


(a)



(b)

Şekil 10. Hareketsiz sistem için yarım köprü çıkış gerilimi (sarı), alıcı bobin sargı gerilimi (kırmızı) ve akımı (mavi) a) R=11.2 Ohm b) R=33 Ohm)



Şekil-11 R=33 Ohm Hareketli sistem için alıcı bobin sargı gerilimi (kırmızı) ve akımı (mavi)

Ayrıca sistemin çalışmasını doğrulamak amacıyla, bazı önemli parametrelerin osiloskop üzerinden elde edilen ölçülmüş dalga şekilleri de sunulmuştur. Şekil 10'da bobinler hareketsiz olduğu durumda, Şekil 11'de ise hareketli olduğu durumda iken alınan sonuçlar verilmiştir.

5. SONUÇLAR

LCC-S kompanzasyonlu endüktif kablosuz güç transfer sisteminin tasarımı, analizi, simülasyonu ve deneysel olarak doğrulanması başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu proje kapsamında geliştirilen LCC-S topoloji kablosuz güç transferi sistemi, sabit çıkış gerilimi ve temassız enerji aktarımı gibi önemli avantajlarıyla öne çıkmakta olup, bu alandaki literatüre katkı sağlayacak niteliktedir. Sistem hem teorik hem de uygulamalı yönleriyle mühendislik fakültelerinde okuyan öğrenciler için değerli bir referans proje niteliği taşımaktadır.

Projenin gerçekleştirilmesi sürecinde çeşitli mühendislik kısıtları göz önünde bulundurularak, sistemin maliyeti, güvenliği ve çevresel etkileri dikkatle analiz edilmiştir. Kapsamlı bir piyasa araştırması sonucunda, kullanılan tüm bileşenlerin fiyat/performans oranı en

yüksek olacak şekilde seçilmiştir. Bu seçim yapılırken yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığına olan etkiler de değerlendirilmiş; düşük elektromanyetik yayınıma sahip, toksik içermeyen malzemelerin kullanımına özen gösterilmiştir. Ayrıca projede, özel üretim gerektirmeyen ve piyasada yaygın olarak bulunan malzemeler tercih edilerek, sistemin yeniden üretilebilirliği ve sürekliliği desteklenmiştir. Bu sayede, benzer sistemlerin farklı koşullarda da kolaylıkla kurulabilmesi ve uygulanabilmesi mümkün hale getirilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen temel bulgular şunlardır:

- LCC-S kompanzasyon topolojisinin, geniş bir yük aralığında sabit akım ve/veya sabit gerilim çıkışı sağlayabildiği hem teorik analizler hem de simülasyonlar ile gösterilmiştir.
- ANSYS Maxwell kullanılarak yapılan bobin simülasyonları, dinnamik sistemeler için bobin tasarımının optimizasyonu için değerli veriler sağlamıştır.
- Prototip sistemden elde edilen deneysel ölçüm sonuçları, simülasyon bulgularını büyük ölçüde doğrulamış ve LCC-S topolojisinin gerçek dünya uygulamalarında sabit voltaj çıkışı ile güç transferi sağlayabildiğini kanıtlamıştır.

6. KAYNAKÇA

[1] J. Yang, X. Zhang, K. Zhang, X. Cui, C. Jiao and X. Yang, "Design of LCC-S Compensation Topology and Optimization of Misalignment Tolerance for Inductive Power Transfer," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 191309-191318, 2020.

[2] Y. Chen, H. Zhang, S. -J. Park and D. -H. Kim, "A Switching Hybrid LCC-S Compensation Topology for Constant Current/Voltage EV Wireless Charging," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133924-133935, 2019.

[3] Y. Wang, H. Wang, T. Liang, X. Zhang, D. Xu and L. Cai, "Analysis and design of an LCC/S compensated resonant converter for inductively coupled power transfer," *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Harbin, China, pp. 1-5, 2017.

[4] Z. Liu, H. Xu and H. Chen, "Research on Series-Series Compensation and LCC Compensation Networks for Wireless Power Transfer System," *2018 IEEE 3rd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Chengdu, China, pp. 129-133, 2018.

TOPRAKLAYICI FORMÜLLERINDE YÖNETMELIK KAYNAKLI UYUŞMAZLIKLARIN İNCELENMESI

Nejat Cahit GENÇER

E-ID TEKNOLOJİ A.Ş

ÖZET

Türkiye'de 21.09.2001 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği (ETTY) içerisinde Ek- K ve Ek-T'de geçen halka topraklaması formüllerinin aynı alanda yapılan hesaplamalar neticesinde bu formüllerden çıkan sonuçlar karşılaştırıldığında gerek Ek-K daki gerekse dere yapılan hesaplamalarda aralarında belirgin bir fark olduğu ayrıca ana formüllerden çıkan sonuçların basit formülden daha yüksek bir direnç değeri olduğu görülmüştür.

Bununla birlikte Ek-T deki Derin (çubuk) topraklayıcı ana formül ile yaklaşık formüllerinden çıkan sonuçlardan yaklaşık direncin ana formülden daha büyük bir değerde olduğu hesaplanmıştır.

Özellikle basit-yaklaşık formüllerden çıkan hesabın güvenlik açısından daha yüksek bir değer çıkması gerekirken ana formülden daha küçük bir direnç değerinin çıkması dikkat çekmektedir.

Bu durum mühendisleri proje hazırlıklarında fizibilitelerde hataya sürükleyebilir.

Çok önemli bir konuyu da atlamamak gerekir o da ETTY 'de verilen formüller hep homojen toprak içerisinde olması koşulu ile geçerlidir. Bunun böyle olduğunu yapılan topraklama hesapları ile sahada yapılan uygulama sonucunu ölçüp karşılaştırarak görülebilir.

Toprağın homojen bir yapıda mı yoksa çok katmanlı bir yapıya mı sahip olduğu ancak farklı noktalarda bir çok farklı derinlikte yapılan özgül toprak direnci değerlerinin bilgisayar proğramlarına girerek hesaplanabilir.

Kilit tanımlar: Halka topraklaması,Derin(Çubuk) topraklaması,ana formül, yaklaşık basit formül, homojen-katmanlı toprak…

GİRİŞ

21 Ağustos 2001 Tarih ve 24500 Sayılı Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği'nde (ETTY) Ek -K'da halka topraklayıcı formülü ;

Homojen toprak içerisinde halka şeklinde topraklayıcıların yayılma direnci;

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi^2 .D} ln \frac{2\pi D}{d}$$

Burada;

$D = \frac{L}{\pi}$	Halka topraklayıcının çapı (m),
L	Şerit ve halka topraklayıcının uzunluğu (m),
d	Örgülü iletken çapı veya şerit kalınlığının yarısı (m)
ρ_E	Toprak özdirenci (Ω m)

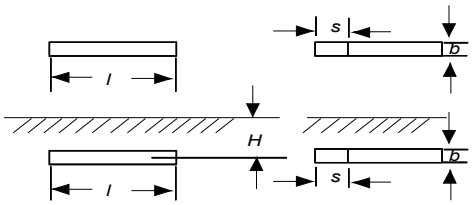
Ek-T'de ise yaklaşık formül:

$$R_E \approx \frac{2.\rho_E}{3.D}$$

$$D = 1{,}13.\sqrt{A}$$

Olarak verilmiştir.

d için ise şu şekilde hesaplama yapılması gerektiği belirtilmiştir.



$d = \frac{1}{2} b$ veya $d = \frac{2(b+s)}{\pi}$

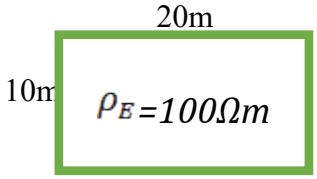
Bu formüllerde,

l	Topraklayıcının uzunluğu,(m)
b	Topraklayıcının kalınlığı,(m)
d	Topraklayıcı kalınlığının yarısı veya yuvarlak iletkenin çapı,(m)
s	Topraklayıcının genişliği,(m)
H	Topraklayıcının gömülme derinliği.(m)

Verilmiştir.

Formüller arasındaki uyumsuzluğu göstermek için aşağıdaki örnek hesaplar yapılmıştır.

10m*20m bir alanda örnek hesap;



Bu ölçülerde yapılmış bir sahada halka topraklaması hesaplamaları;

D'yi, $D = \frac{L}{\pi}$ formülünden hesaplayacak olursak;

Topraklama iletken boyu L;

L=20m+20m+10m+10m=60m

$$D = \frac{60m}{3,14} = 19,1m$$

Saha daire şeklinde olsa idi D'nin bu şekilde hesaplanması doğru olacaktı ama dörtgen bir sahada bu formül uygulandığında D farklı çıkmaktadır.

Halka topraklama iletkeni 30mm*3,5mm şerit olursa d iki şekilde hesabına göre R_E değerleri Ek-K'ya göre hesaplanırsa;

1- $d = \frac{1}{2} b$,

$d = \frac{1}{2} 0,0035 = 0,00175m$

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi^2 .D} ln \frac{2\pi .D}{d}$$

$$R_E = \frac{100\Omega m}{3,14^2 .19,1m} ln \frac{2.3,14.19,1m}{0,00175m} = 5,91\Omega$$

2- $d = \frac{2(b+s)}{\pi}$,

$d = \frac{2(0,03m+0,0035m)}{3,14}$ =0,02133m

$$R_E = \frac{100\Omega m}{3,14^2 .19,1m} ln \frac{2.3,14.19,1m}{0,02133m} = 4,58\Omega$$

Yuvarlak iletken olursa;

d=10mm(0,01m)

$$R_E = \frac{100\Omega m}{3,14^2 .19,1m} ln \frac{2.3,14.19,1m}{0,01m} = 4,98\Omega$$

Olarak hesaplanabilir.

Aynı sahadaki halka topraklaması ETTY Ek-T deki basit formül ile hesaplanacak olursa;

$$R_E \approx \frac{2.\rho_E}{3.D}$$

$$D = 1{,}13.\sqrt{A}$$

D; Halka topraklayıcının
çapı (m),

A(Alan)=20m.10m=200m^2

$D = 1{,}13\sqrt{200m^2}$=15,98m olarak bulunur. Buradan saha topraklama direnci;

$R_E = \frac{100\Omega m}{3.15{,}96m} = 4{,}17\Omega$ hesaplanır.

ETTY Ek-T deki ana formül olan

$R_E = \frac{\rho_E}{\pi^2 .D} ln \frac{2\pi D}{d}$ ve D'yi de

$D = 1{,}13.\sqrt{A}$ gibi hesaplarsak;

D=15,98m

d=0,02133m için;R_E=5,37Ω

d=0,00175m için;R_E=6,95Ω

d=0,01m için;R_E=5,85Ω

olarak bulunur.

ETTY Ek-T deki gibi basit formül ile hesap yapılırsa (burada gömülme derinliği ve iletken çapı hesaba katılmıyor) ASLINDA ana formül ile hesaplanan değerlerden daha büyük bir değer çıkması gerekirken 4,17Ω gibi daha küçük bir değer hesaplanmıştır.

Yani ana formülde bir hata olabileceği veya eşdeğer çap D' nin daire olmayan bir alan olmadığında ve iletken çapı olan d'nin bulunmasında bir hata olacağı düşünülmektedir.

Ancak İngiliz kaynaklarında gömülme derinliği ve topraklama iletken çapı da hesaba katılmaktadır.

Engineering Recommendation EREC S34Issue 2, November 2018 de;

B.1.4 Formula R3: Ring electrode;

h =derinlik (m)
r= halka yarıçapı (m)
$r = \sqrt{(A/\pi)}$

d= iletken çapı (m)

A=Alan(m^2)=200m^2

$R_E = \frac{\rho_E}{4.\pi^2 .r} ln \frac{64.r^2}{d.h}$

Olarak verilmektedir.

d=0,02133m için;R_E=4,08Ω

d=0,00175m için;R_E=4,87Ω

d=0,01m için;R_E=4,32Ω

Hesaplanır.

Görüldüğü gibi topraklama iletkeni çapı hesaplarda bariz bir fark oluşturmamaktadır.

Aynı alanda aynı derinlikte yapılan halka topraklamasında iletken çapı değiştikçe farklı direnç değerleri bulunması ve aralarındaki farkların da büyük olması düşündürücüdür.Bu sonuçları bir tabloda toparlayacak olursak;

ETTY Ek-K $\frac{\rho_E}{\pi^2 . D} ln \frac{2\pi D}{d}$ D=19,1m	d(m)	$R_E(\Omega)$
	0,02133	4,58
	0,00175	5,91
	0,01	4,98
ETTY Ek-T $R_E \approx \frac{2.\rho_E}{3.D}$ D=15,98m		4,17
ETTY Ek-T $\frac{\rho_E}{\pi^2 . D} ln \frac{2\pi D}{d}$ D=15,98m	d(m)	$R_E(\Omega)$
	0,02133	5,37
	0,00175	6,95
	0,01	5,85
EREC $\frac{\rho_E}{4.\pi^2 . r} ln \frac{64.r^2}{d.h}$	d(m)	$R_E(\Omega)$
	0,02133	4,08
	0,00175	4,87
	0,01	4,32

ETTY Ek-K daki formülde d=0,01m topraklayıcı çapı hesaplandığında bulunan R_E =5,91 ohm ile Ek-T deki basit formülden çıkan R_E=4,17ohm değeri aralarındaki % fark 29 kadar ve basit formül daha küçük bir değerdedir.

Basit formülden çıkan değer ile Ek-T de çıkan 6,95 ohm değeri arasındaki %40 fark dikkat çekmektedir.

Gerçek formül: Daha hassas, tüm parametreleri dikkate alan, ayrıntılı sonuç verir.

-Kısa/basitleştirilmiş formül: Genelde hızlı hesap için kullanılır. Bu formül, gerçek durumu tam olarak vermez ama daha büyük veya daha "korumacı" bir sonuç verir.

Bu şekilde kısa formülün verdiği sonuç:
-Gerçek ihtiyacın altında kalmaz,
-Gereğinden biraz büyük olur ama daha güvenlidir.

Ama burada basit formül daha düşük bir değerdedir ve tekniğe tezat teşkil eder.

Akla gelen şey gerçek formül veya basit formülün birinin hatalı olabileceğidir.

Şimdi hangi değer bizim için doğru kabul edilecek hangi formülü kullanacağız tereddüt oluşmaktadır.

Bununla birlikte aynı formül D topraklanan alanın çapı ile d topraklayıcı 'nın farklı hesaplanması ile elde edilen değerlerde incelendiğinde çok farklı değerler olduğu görülecektir.

İngiliz kaynaklarında gömülme derinliği ve topraklama iletken çapı da hesaba katıldığı zaman elde edilen sonuç basit formülden çıkan sonuca çok yakındır.

Bununla birlikte Ek T'deki Derin (çubuk) topraklayıcı formülleri olarak,

Homojen toprak içinde düşey olarak gömülmüş derin topraklayıcıların yayılma direnci;

Ana formül

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi . l} . \ln \frac{4.l}{d}$$

Yaklaşık hesap ile

$$R_E = \frac{\rho_E}{l}$$ bulunur.

Verilmiştir.

ρ_E(toprak özdirenci) =100Ωm
L(çubuk boyu) =2m
d(iletken çapı) =0,01m

için hesap yapıldığında;

Ana formülden ;
R_E=53,22Ω

Yaklaşık hesap ile ;
R_E=50Ω

Bulunmaktadır.

Burada da yaklaşık hesaptan çıkan sonuç ana formülden fazla olduğu görülmektedir.

SONUÇ

21.09.2001 sayılı RG ‘de yayımlanarak yürürlüğe giren Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği Ek- K ve Ek-T’de geçen halka topraklaması formüllerinin aynı alanda yapılan hesap sonuçlarının aralarında çok farklı değerlerin olduğu görülmüştür.

ETTY’deki formüllerde halkanın döşeme derinliği h hesaba katılmamaktadır. Ancak İngiliz kaynaklarında h hesaba katılmaktadır ki bu da dikkat çekmektedir.

Yine ETTY ‘de Ek-T deki Derin(Çubuk) topraklayıcı ana formülü ile yaklaşık formül aynı koşullarda karşılaştırıldığında %6 gibi yaklaşık formül ana formüle göre daha düşük bir değer çıkmaktadır.

Özellikle basit(yaklaşık) formülden çıkan hesabın ana formülle yapılan hesaptan güvenlik açısından daha yüksek bir değer çıkması gerekirken ana formülden daha küçük bir direnç değerinin çıkması kabul edilemez.

ETTY ‘de verilen formüller hep homojen toprak içerisinde olması koşulu ile geçerlidir. Bunun böyle olduğunu yapılan topraklama hesapları ile sahada yapılan uygulama sonucunu ölçüp karşılaştırarak görülebilir.

Toprağın homojen bir yapıda mı yoksa çok katmanlı bir yapıya mı sahip olduğu ancak farklı noktalarda bir çok farklı derinlikte yapılan özgül toprak direnci değerlerinin bilgisayar proğramlarına girerek hesaplanmalıdır.

LİTERATÜR

1-ElektrikTesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Ankara 2001

2-Engineering Recommendation EREC S34Issue 2, November 2018