

Elektrik-Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Alanında Yaklaşımlar ve Uygulamalar

Editör
İSHAK PARLAR



BİDGE Yayınları

**Elektrik-elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Alanında
Yaklaşımlar Ve Uygulamalar**

Editör: İSHAK PARLAR

ISBN: 978-625-8567-02-1

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Günümüzde mühendislik problemleri, tek bir disiplinin sınırları içerisinde ele alınamayacak kadar karmaşık ve çok boyutlu bir yapıya sahiptir. Enerji sistemlerinden elektronik donanımlara, haberleşme teknolojilerinden akıllı algılama ve yazılım tabanlı uygulamalara kadar uzanan bu geniş yelpaze, disiplinlerarası yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu kitap, elektrik, elektronik, haberleşme ve bu dalların alt dallarını da kapsayan güncel teorik çalışmalar ve uygulamaya dönük araştırmaları bir araya getirerek, okuyucuya çağdaş mühendislik yaklaşımlarına bütüncül bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Akademik araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler ve sektör paydaşları için başvuru niteliğinde olması hedeflenen bu kitap, disiplinler arası etkileşimin mühendislik çözümlerindeki rolünü vurgulayan seçkin çalışmaları içermektedir.

Dr. Öğr. Üyesi İshak PARLAR

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

KESİR-MERTEBELİ AKIM-MODLU ANALOG SÜZGEÇLERİN DÜŞÜK FREKANS UYGULAMALARINDAKİ YERİ VE ÖNEMİ	1
---	---

FADİLE ŞEN

DERİN ÖĞRENME İLE AKILLI GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ ...	15
---	----

FATİH SERTTAŞ

TÜRKİYE STANDARTLARI ÇERÇEVESİNDE ENDÜSTRİYEL KUVVETLİ AKIM ELEKTRİK İÇ TESİSAT PROJELERİNDE MÜHENDİSLİK HESAPLAMALARI	35
--	----

BARAN ARAS, MÜSLÜM GÜR

HAVA VE UZAY ARAÇLARI İÇİN MODERN UÇUŞ KONTROL YÖNTEMLERİ	51
--	----

HARUN ÇELİK

KISMİ YENİDEN YAPILANDIRMANIN FPGA'DE TASARIM AKIŞI	71
--	----

BAHADIR ÖZKILBAÇ

SABİT GENİŞBANT ERİŞİM TEKNOLOJİLERİNDE GELİŞİM VE DOĞRUDAN EVE FİBER (FTTH) UYGULAMALARININ ANALİZİ	89
--	----

BEKİR SAMİ TEZEKİCİ, TURGAY KARACAN

GÖMÜLÜ GÜVENLİK	111
-----------------------	-----

MUSTAFA ENGİN

V2G ARAÇTAN ŞEBEKEYE TEKNOLOJİSİNİN GÜÇ SİSTEM KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ ..	143
--	-----

SEDRETTİN SÜLE, ASIM KAYGUSUZ

X- IŞINI KIRINIMI(XRD) ANALİZİ VE KULLANIM ALANLARI	170
--	-----

YUNUS AKALTUN

PCPDTBT ARA KATMANLI SCHOTTKY BARİYER DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE YÜKSEK FREKANSLI MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜNDE KULLANIMI	181
---	-----

ÖZGÜN UZ, BURAK TAŞ, ÖMER BERKAN ÇELİK, ÖZGE TÜZÜN ÖZMEN

BÖLÜM 1

KESİR-MERTEBELİ AKIM-MODLU ANALOG SÜZGEÇLERİN DÜŞÜK FREKANS UYGULAMALARINDAKİ YERİ VE ÖNEMİ

1. FADİLE ŞEN¹

Giriş

Analog süzgeçler, mühendislik sistemlerinde sinyallerin istenmeyen bileşenlerden arındırılması, bilgi taşıyan frekans bantlarının seçilmesi ve sistem davranışının kararlı hâle getirilmesi açısından temel bir rol üstlenmektedir. Haberleşme sistemlerinde bant sınırlama, kontrol mühendisliğinde gürültü bastırma, biyomedikal uygulamalarda fizyolojik sinyallerin ayrıştırılması ve savunma sistemlerinde güvenilir veri iletimi gibi pek çok alanda analog süzgeçler vazgeçilmez yapı taşlarıdır. Bu uygulamalarda süzgeç performansı; frekans seçiciliği, geçiş bandı eğimi, faz davranışı, gürültü duyarlılığı, bünyesinde bulunan aktif ve pasif elemanların toleranslarından ve güç tüketimi gibi ölçütler üzerinden değerlendirilmektedir.

¹ Öğr. Gör. Dr., Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslekyüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Şanlıurfa/Türkiye,
Orcid: 0000-0001-5007-5471

Geleneksel analog süzgeçler çoğunlukla tamsayı-mertebe olarak tasarlanmakta ve uzun yıllar boyunca mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır. Ancak günümüzde sistemlerin daha düşük frekanslarda, daha yüksek hassasiyetle, daha yüksek kararlılıkla ve daha az güç tüketimli olarak çalışmasına duyulan ihtiyacı artmıştır. İstenilen bu ihtiyaçlarla beraber, özellikle geçiş bandının esnek biçimde kontrol edilememesi ve süzgeç eğiminin yalnızca tamsayı-mertebeğine bağlı kalması, belirli uygulamalarda tasarım özgürlüğünü kısıtlamakta tasarımcının ihtiyacını karşılayamamaktadır.

Tasarımcıların ihtiyacı doğrultusunda, kesir-mertebe hesap (fractional-order calculus) kavramının analog devre tasarımına dâhil edilmesi, süzgeç davranışlarının daha esnek bir biçimde şekillendirilmesine olanak tanımıştır. Günümüzde oldukça popüler ve literatürde önemli bir araştırma alanına sahip olan kesir-mertebe analog süzgeçler, geleneksel tamsayı-mertebe analog süzgeçlerden farklı olarak, sadece devre bileşenlerine değil aynı zamanda kesir-mertebe parametresine de bağlıdır. Kesir-mertebe parametresi süzgece ekstra bir serbestlik derecesi vermektedir. Kesir-mertebe parametresi sayesinde frekans cevabının hassas bir şekilde ayarlanabilmesini mümkün kılmaktadır ve bu durum kesir-mertebe süzgeçlerin eşsiz bir özelliğidir. Sonuç olarak kesir-mertebe süzgeçler, süzgece tasarım esnekliği sunarak, süzgecin tüm gereksinimlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Kesir-mertebe parametresi sayesinde süzgeçler, özellikle düşük güç tüketimli, yüksek kararlılık ve yüksek hassasiyet gerektiren çok düşük frekans (Very Low Frequency - VLF) bandında çalışan mühendislik sistemleri için önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu kitap bölümünde, kesir-mertebe analog süzgeçlerin mühendislik alanına sağladığı katkılar; akım-modlu çalışma prensipleri çerçevesinde ele alınmakta ve düşük frekans

uygulamalarındaki potansiyelleri bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmektedir.

Kesir-Mertebeli Hesaplama ve Analog Süzgeçlere Etkisi

Klasik tamsayı-mertebeli analog süzgeçleri kesir-mertebeli hale getiren kesir-mertebeli hesaplama (fractional calculus), yararlanılmaktadır. Bu hesaplama, türev ve integral işlemlerinin yalnızca tamsayı-mertebelerle sınırlı kalmadan reel veya kompleks mertebelerde de gerçekleştirilebileceğini ortaya koyan matematiksel bir disiplindir. Bu alanın tarihsel temeli 17. yüzyıla dayanmaktadır. 1695 yılında Gottfried Wilhelm Leibniz ile Guillaume de l'Hôpital arasında geçen yazışmalarda, klasik tamsayı-mertebeli türev gösterimi olan $d^n y / dx^n$ ifadesinde türevin mertebesi (n) tamsayı değil de örneğin $n = 1/2$ gibi bir kesirli değer olduğunda ne anlama geleceğine dair sorusu, kesir-mertebeli türev ve integral kavramlarının ilk temellerini atmıştır (Oldham & Spanier, 1974). Ardından Euler, Laplace ve Fourier gibi öncü matematikçiler, bu alanın analitik temellerini geliştirmiş; 19. yüzyılda ise Liouville ve Riemann, türev ve integral işlemlerinin kesir-mertebeler için tanımlanmasına yönelik sistematik yaklaşımlar ortaya koymuştur (Liouville, 1832; Riemann, 1847).

Kesir-mertebeli hesaplamanın gelişiminde öne çıkan ve ilk tanımlardan biri Denklem (1) de verilen Riemann–Liouville türevi olup, integral dönüşümleri temelinde oluşturulmuştur.

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{d^n}{dt^n} \left[\frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \right] \quad (1)$$

Buna karşın Denklem (2) de verilen Grünwald–Letnikov tanımı, sonlu farklar yaklaşımına dayalı olması nedeniyle sayısal

çözüm yöntemleri açısından oldukça kullanışlıdır (Grünwald, 1867).

$${}_a D^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{m=0}^{\left[\frac{t-a}{h} \right]} (-1)^m \frac{\Gamma(\alpha+1)}{m! \Gamma(\alpha-m+1)} f(t-mh), \quad (2)$$

1967 yılında Caputo tarafından geliştirilen ve Denklem (3) de verilen Caputo türevi ise başlangıç koşullarının klasik tamsayı-mertebeli türevlerde olduğu gibi ifade edilebilmesine olanak tanıyarak mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmıştır (Caputo, 1967:13). Günümüzde Caputo–Fabrizio ve Atangana–Baleanu gibi yeni tanımlar, kesir-mertebeli türev kavramını daha geniş uygulama alanlarına taşımaktadır (Caputo & Fabrizio, 2015:1; Atangana & Baleanu, 2016:20).

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha+1-n}} d\tau \quad (3)$$

Kesir-mertebeli analog süzgeç devrelerinin tasarımında ise zaman-alanında karmaşık ve zor olan bu diferansiyel denklemlerin çözümünü içermektedir. Tasarım denklemlerindeki zorlukların üstesinden gelmek için ise Denklem (3) verilen ifadeye Laplace dönüşümü uygulanmakta olup, Denklem (4) verilmektedir (Şen, 2025).

$$L\left\{{}_0 D_t^\alpha f(t)\right\} = s^\alpha \cdot F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{\alpha-k-1} \cdot f^{(k)}(0) \quad (4)$$

Yukarıda verilen Denklem (4) de ki ifade sıfır başlangıç koşulları altında yeniden düzenlenirse aşağıda verilen Denklem (5) elde edilmektedir.

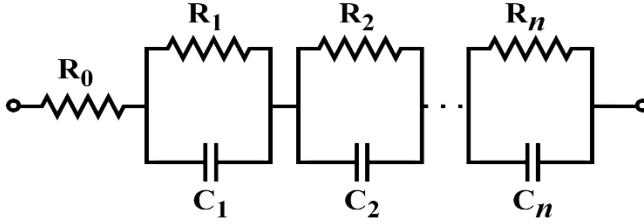
$$L\left\{{}_0 D_t^\alpha f(t)\right\} = s^\alpha \cdot F(s) \quad (5)$$

Yukarıda verilen denklemler yardımıyla kesir-mertebeli hale dönüştürülen analog süzgeç devrelerinde, süzgeçlerin genlik ve faz

karakteristikleri kesir-mertebesi sayesinde doğrudan belirlemektedir. Yani klasik tamsayı-mertebeli süzgeç devrelerinde süzgeç eğimleri ve geçiş bandı davranışları belirli matematiksel sınırlar içerisinde kalmakta iken kesir-mertebeli süzgeçlerde ise genlik eğimi, kesir-mertebe parametresine bağlı olarak ayarlanabilmekte; böylece geçiş bandı daha yumuşak ya da daha keskin hâle getirilebilmektedir. Süzgeçlerin frekans tepkilerinin daha esnek ve kontrollü bir biçimde şekillendirilmesini sağlayan bu özellik, özellikle bant geçişlerinin kritik olduğu mühendislik uygulamalarında tasarımcıya önemli bir serbestlik kazandırmaktadır. Örneğin kontrol sistemlerinde kararlılık sınırlarının iyileştirilmesi, biyomedikal sinyal işleme uygulamalarında fizyolojik sinyallerin daha doğru ayrıştırılması ve haberleşme sistemlerinde bant içi girişimlerin azaltılması bu esnekliğin sağladığı kazanımlar arasında yer almaktadır (Freeborn, 2013:13; Elwakil, 2010:10; Tsirimokou & Psychalinos, 2016:44; Koton, Herencsar & Kubanek, 2018:86; Sen & Kircay, 2021:30).

Kesir-mertebeli davranışın fiziksel olarak gerçekleştirilmesi, genellikle kesir-mertebeli kapasitör veya kesir-mertebeli empedans kavramları üzerinden sağlanmaktadır. Ancak bu elemanlar günümüzde ticari olarak doğrudan temin edilemediğinden, pratik uygulamalarda sürekli kesir genişlemesi, Matsuda, Carlson ve Oustaloup tarafından önerilen çeşitli yaklaşık modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Daha sonra bu yaklaşık modellemeler uygun şekilde yapılandırılmış Foster I, Foster II, Cauer I ve Cauer II RC ağları kullanılarak, oluşturulmaktadır. Bu ağlardan en çok minimum sayıda pasif eleman içeren ve gerçek modellemelere yakın olan Foster type RC- I ağları kullanılmaktadır. Ayrıca bu yaklaşım, kesir-mertebeli teorik modellerin gerçek devre ortamına uyarlanmasını mümkün kılmakta ve mühendislik uygulamaları açısından uygulanabilir çözümler sunmaktadır (Tsirimokou, 2017:78).

Şekil 1 Kesir-mertebe kapasitörü meydana getirmek için kullanılan Foster type RC- I ağı



Kaynak: Tsirimokou (2017:78)

Akım-Modlu Süzgeç Yapılarının Mühendislik Açısından Avantajları

Analog süzgeç tasarımlarında geleneksel olarak gerilim-modlu yapılar yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak yüksek frekanslı ve düşük gerilimli uygulamalarda gerilim-modlu tasarımların sınırlı bant genişliği, düşük hız ve düşük çıkış salınım aralıkları gibi dezavantajları ön plana çıkmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, son yıllarda analog süzgeç devreleri akım-modlu olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Akım-modlu devreler; yüksek bant genişliği, geniş dinamik aralık ve düşük güç tüketimi gibi özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Akım-modlu çalışmada sinyal işleme doğrudan akım üzerinden gerçekleştirildiği için, parazitik kapasitansların ve istenmeyen gerilim salınımlarının etkisi önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Tangsrirat & Surakamponorn, 2008:62).

Akım-modlu süzgeç yapıları, özellikle entegre devre teknolojileriyle uyumlu olmaları nedeniyle modern mikroelektronik sistemlerde avantaj sağlamaktadır. Düşük besleme gerilimleri altında çalışabilmeleri, minimum sayıda ve sadece topraklı pasif

elemanlarla gerçekleştirilebilmeleri ve yüksek doğrusal davranış sergilemeleri bu yapıların öne çıkan özelliklerindendir. Ayrıca, sadece düşük frekanslı çalışmalarda değil, yüksek frekanslı çalışmalarda da kararlı çalışma yetenekleri sayesinde akım-modlu devreler geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır.

Kesir-mertebeli sistem kavramının akım-modlu süzgeçlerle birleştirilmesi, her iki yaklaşımın avantajlarını bir araya getiren güçlü bir mühendislik çözümü sunmaktadır. Bu birleşim sayesinde, hem frekans cevabında esneklik sağlanmakta hem de düşük güç tüketimi ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için etkin çözümler geliştirilebilmektedir.

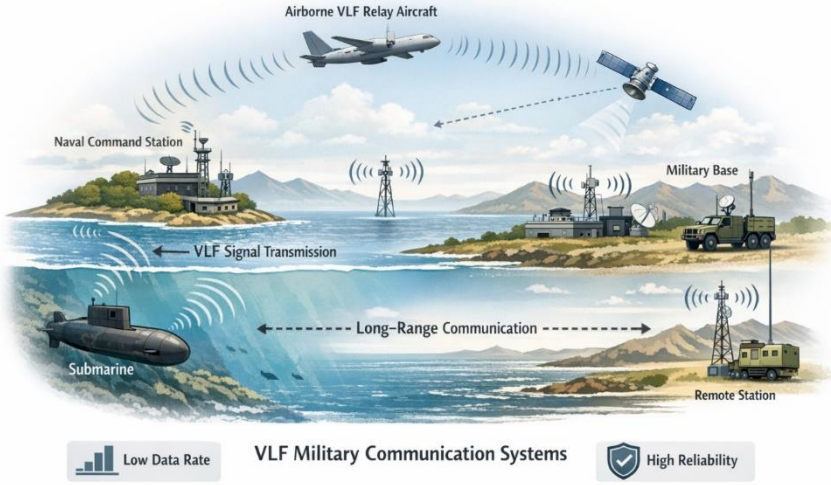
Kesir-Mertebeli Akım-Modlu Süzgeçlerin Düşük Frekans Uygulamaları

Çok düşük frekans bandında çalışan mühendislik sistemleri, fiziksel ve çevresel koşullara karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Uzun dalga boylarına sahip bu frekans aralığında, elektromanyetik gürültü, çevresel etkileşimler ve sistem içi parazitik etkiler, sinyal bütünlüğünü doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle, VLF bandında kullanılan süzgeçlerin yalnızca istenmeyen frekans bileşenlerini bastırması yeterli olmayıp, aynı zamanda uzun süreli çalışmalarda kararlı bir frekans ve faz davranışı sergilemesi de beklenmektedir (Langhammer, Dvorak & Sotner, 2020:25).

Denizaltı haberleşme sistemleri ve uzun menzilli askeri iletişim altyapıları, düşük frekans uygulamalarına verilebilecek en belirgin örnekler arasında yer almaktadır. Bu tür sistemlerde sinyal iletimi çoğunlukla düşük veri hızlarıyla gerçekleştirilmekte, ancak iletilen bilginin güvenilirliği ve sürekliliği kritik önem taşımaktadır. Kesir-mertebeli akım-modlu süzgeçler, geçiş bandının keskinliğini, kesir-mertebe parametresi aracılığıyla ayarlayabilme yeteneği sayesinde, bu tür uygulamalarda bant dışı gürültünün daha kontrollü

biçimde bastırılmasına olanak tanımaktadır (Saraçoğlu, 2019; Hayakawa, 2008; Li, Wang & Liu, 2018).

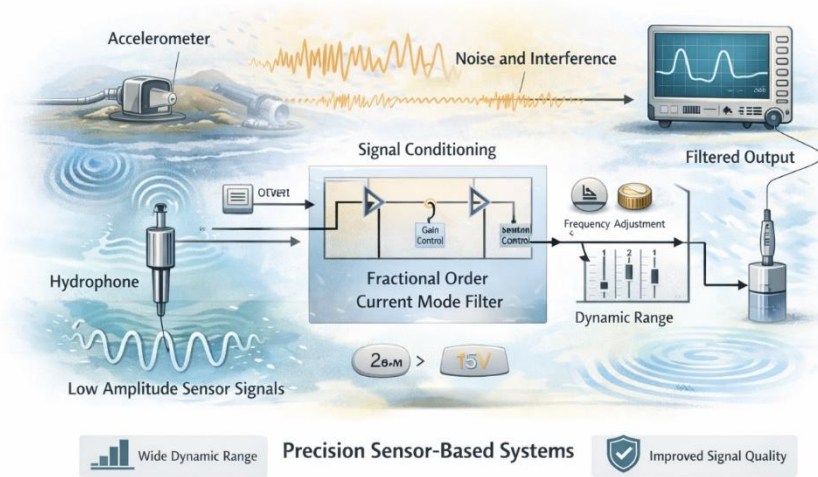
Şekil 2 Denizaltı haberleşme sistemleri ve uzun menzilli askeri iletişim altyapılarında VLF bandının kullanımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Askeri haberleşmenin yanı sıra düşük frekans uygulamalarına verilebilecek bir diğer önemli örnek ise hassas sensör tabanlı sistemlerdir. Düşük frekanslı sinyallerinin üretildiği ve işlendiği bu sistemlerde ölçülen sinyallerin genliği oldukça düşük seviyelerde olabilmekte ve bu sinyaller gürültüden kolaylıkla etkilenebilmektedir. Kesir-mertebeli akım-modlu süzgeç yapıları ile bu sistemler, geniş dinamik aralıkları sayesinde hem düşük genlikli sinyallerin işlenmesine imkân tanımakta hem de kesir-mertebeli yapıların sunduğu esneklikle sinyal kalitesini artırmaktadır (Elwakil, 2010:10).

Şekil 3 Hassas sensör tabanlı düşük frekans sistemlerinde kesir-mertebeli akım-modlu süzgeç kullanımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Genel olarak düşük frekans uygulamalarında en önemli kriterlerden biri tasarlanan süzgeç devrelerinin enerji verimliliğidir. Uzun süreli çalışması gereken ve çoğu zaman sınırlı enerji kaynaklarına sahip olan bu süzgeç devreleri, hem kesir-mertebeli hem de akım-modlu olarak tasarlanması sayesinde düşük besleme gerilimleri altında çalışabilmektedir ve devre karmaşıklığının sınırlı olması sayesinde tüm gereksinimlere uygun çözümler sunmaktadır. Bu özellikler, söz konusu süzgeçlerin yalnızca simülasyon ve laboratuvar ortamlarında değil, gerçek saha uygulamalarında da tercih edilmesini sağlamaktadır.

Dayanıklılık, Güvenilirlik ve Uygulanabilirlik Açısından Değerlendirme

İstenilen frekans bant aralığında çalıştırılmak üzere tasarlanan süzgecin, mühendislik açısından başarısı yalnızca teorik

performansıyla değil, aynı zamanda üretim toleranslarına ve parametre değişimlerine karşı gösterdiği dayanıklılıkla da ölçülmektedir. Gerçek devre ortamlarında pasif eleman toleransları, sıcaklık değişimleri ve üretim sapmaları kaçınılmazdır. Bu nedenle, bir süzgeç tasarımının güvenilirliği, söz konusu belirsizlikler karşısında sergilediği davranışla doğrudan ilişkilidir. Kesir-mertebeli ve akım-modlu olarak tasarlanan süzgeç devrelerinde özellikle akım-modlu çalışmanın doğası gereği sahip olduğu düşük empedans seviyeleri, parazitik etkilerin devre performansı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Bu nedenle tasarlanan süzgeç devleri tatmin edici bir dayanıklılık sergileyebilmektedir.

Güvenilirlik açısından da bakıldığında yalnızca devre elemanlarının toleranslarıyla sınırlı olmayıp, sistemin uzun süreli çalışma koşulları altında performansını koruyabilme yeteneğini de kapsamaktadır. Düşük frekans uygulamalarında süzgeçlerin uzun süre kararlı bir frekans cevabı sergilemesi kritik önem taşımaktadır. Kesir-mertebeli ve akım-modlu süzgeçler, hem yapısal sadelikleri hem de esnek tasarım parametreleri sayesinde bu gereksinimleri karşılayabilecek bir potansiyel sunmaktadır.

Uygulanabilirlik açısından bakıldığında ise kesir-mertebeli pasif elemanların (kondansatör ve indüktör) ticari olarak üretilmemesine rağmen kolaylıkla temin edilebilen pasif elemanlar kullanarak uygulanabilmesidir. RC tabanlı yaklaşık modeller, kesir-mertebeli davranışın pratik devreler aracılığıyla elde edilmesini mümkün kılmakta ve bu sayede teorik yaklaşımlar mühendislik uygulamalarına aktarılabilir. Bu bağlamda, söz konusu süzgeçler yalnızca akademik çalışmalar için değil, gerçek mühendislik sistemleri için de güvenilir ve uygulanabilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç

Bu kitap bölümünde, kesir-mertebeli akım-modlu analog süzgeçlerin mühendislik sistemleri açısından sunduğu teorik ve pratik avantajlar ele alınmıştır. Süzgeç tasarımında kesir-mertebe parametresinin hem istenilen durdurma bandı zayıflatmasını hem de geçiş bandından durdurma bandına geçiş eğiminin daha keskin bir şekilde kontrol edilmesini sağlamsıyla birlikte akım-modlu çalışmanın getirdiği yüksek doğrusalılık, geniş dinamik aralık, düşük güç/gerilim tüketimi, geniş bant genişliği, entegre tasarımına uygunluk gibi performans kazanımlarıyla birleştiğinde, özellikle düşük frekans uygulamalarında dikkat çekici ve yenilikçi çözümler ortaya çıkmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmaların; farklı kesir-mertebe yaklaşımlarının karşılaştırılması, farklı frekans bant aralıklarında daha yüksek entegrasyon seviyelerine sahip tasarımların geliştirilmesi ve çok disiplinli mühendislik alanlarına uyarlanması yönünde ilerlemesi beklenmektedir. Bu doğrultuda kesir-mertebeli akım-modlu süzgeçler, modern mühendislik problemlerine yüksek performanslı, sade yapılı esnek, verimli ve sürdürülebilir çözümler sunmaya devam edecektir.

Kaynakça

Atangana, A., & Baleanu, D. (2016). New fractional derivatives with nonlocal and nonsingular kernel: Theory and application to heat transfer model. *Thermal Science*, 20(2), 763–769.

Caputo, M. (1967). Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent. *Geophysical Journal International*, 13(5), 529–539.

Caputo, M., & Fabrizio, M. (2015). A new definition of fractional derivative without singular kernel. *Progress in Fractional Differentiation and Applications*, 1(2), 1–13.

Elwakil, A. S. (2010). Fractional-order circuits and systems: An emerging interdisciplinary research area. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 10(4), 40–50.

Freeborn, T. J. (2013). Fractional-order circuit models: Methods, tools, and applications. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 13(1), 9–24.

Grünwald, A. K. (1867). Über begrenzte Derivationen und deren Anwendung. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 12, 441–480.

Hayakawa, M. (2008). Subionospheric VLF/LF probing of ionospheric perturbations associated with earthquakes. In *Proceedings of the SICE Annual Conference* (pp. 1668–1671).

Koton, J., Herencsar, N., & Kubanek, D. (2018). Fractional-order filters: Design, simulation and implementation. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 86, 1–9.

Langhammer, L., Dvorak, J., & Sotner, R. (2020). Fractional-order filters for low-frequency applications: Trends and challenges. *Journal of Advanced Research*, 25, 257–274.

Li, G., Wang, Y., & Liu, C. (2018). Analysis of VLF radio wave propagation characteristics and its influence on underwater platform communication. In *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS)* (pp. 83–87). IEEE.

Liouville, J. (1832). Mémoire sur quelques questions de géométrie et de mécanique. *Journal de l'École Polytechnique*, 13, 1–69.

Oldham, K. B., & Spanier, J. (1974). *The fractional calculus*. Academic Press.

Riemann, B. (1847). Versuche über die Darstellung einer Function durch eine trigonometrische Reihe. *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*.

Saraçoğlu, M. S. (2019). *ULF–VLF–LF bantları için alıcı tasarımı ve geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sen, F., & Kircay, A. (2021). MO-CCCI-based current-mode fractional-order universal filter. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 30(8), 2150132.

Şen, F. (2025). *VLF–MF uygulamaları için tamsayı ve kesir mertebeli akım-modlu süzgeç tasarımlarının gerçekleştirilmesi* (Doktora tezi). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tangsrirat, W., & Surakamponorn, W. (2008). Current-mode filter design using CFOA-based structures. *International Journal of Electronics and Communications*, 62(6), 436–444.

Tsirimokou, G. (2017). A systematic procedure for deriving RC networks of fractional-order element emulators using MATLAB. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 78, 7–14.

Tsirimokou, G., & Psychalinos, C. (2016). Design and implementation of fractional-order circuits and systems. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 44(9), 1812–1830.

BÖLÜM 2

DERİN ÖĞRENME İLE AKILLI GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ

FATİH SERTTAŞ¹

Giriş

Günümüz enerji sistemlerinde güç kalitesi, artan elektronik yüklerin ve doğrusal olmayan elemanların kullanımıyla birlikte daha karmaşık bir hal almıştır. Özellikle harmonik bozulmalar, enerji iletim ve dağıtım ağlarında hem verimlilik kayıplarına hem de ekipman ömrünün kısılmasına neden olan temel problemlerdendir (Bollen & Gu, 2006; Arrillaga & Watson, 2003). Güç kapasitörleri, reaktif güç kompanzasyonu amacıyla yaygın biçimde kullanılmalarına rağmen, harmonik içeren ağlarda rezonans, aşırı ısınma ve izolasyon arızaları gibi sorunlara maruz kalabilmektedir (Xu & Liu, 2017). Bu nedenle, kapasitörlerin harmonik stres altındaki davranışlarının modellenmesi ve izlenmesi, güç kalitesi yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır (Singh, Al-Haddad, & Chandra, 1999).

IEEE 519 standardı, harmonik gerilim ve akım sınırlarını tanımlayarak bu problemlerin kontrol altına alınmasını hedefleyen

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3109-716X

temel düzenlemelerden biridir (IEEE Std 519-2014, 2014). Ancak, modern sistemlerdeki yük çeşitliliği ve harmonik bileşenlerin dinamik karakteri, bu tür standart yaklaşımların ötesine geçilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle, harmonik bileşenlerin spektral dağılımının zamanla değişmesi, klasik analiz yöntemlerinin sınırlılıklarını ortaya koymaktadır (Acha, Madrigal, & Miller, 2002).

Bu noktada, derin öğrenme tabanlı yöntemler, karmaşık dalga şekillerinin yüksek boyutlu temsillerini öğrenme kapasitesi sayesinde güçlü bir alternatif sunmaktadır (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015). Gerilim ve akım dalga şekillerinden çıkarılan spektral öznitelikler yardımıyla harmonik senaryoların otomatik sınıflandırılması, hem güç kalitesi denetimi hem de proaktif bakım stratejileri açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Wang, Zhou, & Wu, 2019). Böyle bir yaklaşım, IEEE tarafından tanımlanan harmonik senaryoların doğrulukla tespit edilmesine olanak tanıyarak, kapasitör performansının daha bütüncül bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılar (Mohammadi-Ivatloo & Elkamel, 2018).

Ayrıca, veri temelli güç kalitesi analizi alanında yapılan son çalışmalar, derin sinir ağlarının harmonik tespiti, arıza tanıma ve sistem izleme gibi uygulamalarda yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir (Zhao et al., 2021; Vázquez et al., 2020). Bu gelişmeler, klasik yöntemlerle elde edilen analitik modellerin, yapay zekâ destekli yaklaşımlarla bütünleştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Kundur, 1994). Böylece, harmonik stresin etkileri yalnızca frekans analizleriyle değil, aynı zamanda öğrenme temelli dinamik sınıflandırma çerçevesinde değerlendirilebilmektedir.

Bu bölümde, IEEE tarafından tanımlanan harmonik gerilim senaryoları altında çalışan güç kapasitörlerinin davranışları derin öğrenme tabanlı bir güç kalitesi analiz çerçevesinde ele alınmaktadır. Amaç, hem klasik güç kalitesi ölçütlerini hem de modern yapay zekâ yaklaşımlarını bir araya getirerek harmonik stresin sistematik,

otomatik ve yüksek doğrulukla sınıflandırılmasını sağlamaktır. Bu yaklaşım, enerji sistemlerinde proaktif bakım, yük yönetimi optimizasyonu ve akıllı şebeke izleme uygulamalarına katkı sunacaktır.

1. Kullanılan Veri Seti ve Temel Özellikleri

1.1. Veri Setinin Kaynağı ve Amacı

Bu çalışmada kullanılan veri seti, polipropilen ve all-film güç kapasitörlerinin, harmonik gerilimler altındaki davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine dayanmaktadır. Veri seti, Spavieri (2017) tarafından yayımlanan ve açık erişime sunulan deneysel ölçümlerden oluşmaktadır.

Deneyler, IEEE, IEC ve PRODIST (Brezilya) güç kalitesi standartlarında tanımlanan harmonik sınırlar esas alınarak gerçekleştirilmiş olup, ölçülen dalga şekilleri gerçekçi güç kalitesi senaryolarını temsil etmektedir. Bu yönüyle veri seti, sentetik olarak üretilmiş sinyallerden farklı olarak, gerçek sistem davranışını yansıtan bir yapıya sahiptir.

Veri seti bileşenleri:

- 460 adet laboratuvar deneyi
- 1380 adet dalga şekli dosyası

Her deney için:

- Gerilim dalga şekli
- Akım dalga şekli
- Aktif güç dalga şekli

olmak üzere yapılandırılmıştır. Her bir deney seti, iki farklı güç kapasitörü için tekrarlanmıştır. Bu durum, kapasitör tipine bağlı davranış farklılıklarının incelenmesine olanak sağlamaktadır.

1.2. Harmonik Senaryoların Tanımı (IEEE, IEC ve PRODIST)

Veri seti, farklı güç kalitesi standartlarına göre tanımlanmış etiketli harmonik gerilim senaryoları içermektedir. Çalışma kapsamında özellikle IEEE tabanlı senaryolar dikkate alınmıştır. Bunlar IEEE01, IEEE02, IEEE03, IEEE04, IEEE05 olarak sıralanmaktadır.

Bu senaryolar, IEEE standartlarında tanımlanan farklı harmonik spektrumları ve bozulma seviyelerini temsil etmektedir. IEEE01 senaryosu daha ağır harmonik içeriğe sahipken, IEEE02 senaryosu daha düşük harmonik bozulmayı temsil etmektedir. Dolayısıyla bu sınıflandırma, artan harmonik stres seviyesi şeklinde yorumlanabilmektedir.

Karşılaştırma amacıyla ayrıca:

- IEC07, IEC08, IEC09
- PROD02
- SIN (saf sinüzoidal referans) senaryoları da veri setinde yer almaktadır.

1.3. Gerilim Seviyeleri ve Ölçekleme

Her bir harmonik senaryo için deneyler, 209 V ile 231 V arasında değişen nominal RMS gerilim seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece aynı harmonik içerik farklı gerilim genlikleri altında kapasitör davranışları gözlemlenmiştir.

Bu yapı, çalışmada, harmonik bozulmanın etkisini gerilim seviyesinin etkisinden ayırarak incelemeye imkân tanımaktadır.

Her deney için aşağıdaki büyüklükler ölçülmüştür:

- Gerilim dalga şekli $v(t)$
- Akım dalga şekli $i(t)$

- Aktif güç dalga şekli $p(t)$

Dalga şekilleri zaman alanında örneklenmiş olup, her kayıt birden fazla şebeke periyodunu içermektedir. Ölçümlerin örnekleme frekansı deneysel kurulum tarafından belirlenmiş ve harmonik analiz için yeterli bant genişliği sağlamaktadır.

1.4. Veri Sayısı ve Çalışmada Kullanılan Kayıtlar

Bu çalışmada, yalnızca gerekli dosyaları eksiksiz içeren kayıtlar değerlendirmeye alınmış ve toplamda 272 adet geçerli kayıt analiz edilmiştir. Her kayıt; kapasitör türü, harmonik senaryo etiketi, nominal gerilim seviyesi, gerilim akım ve güç dalga şekilleri gibi bilgileri içermektedir. Bu yapı, istatistiksel olarak anlamlı karşılaştırmalar yapılmasına olanak sağlamaktadır.

2. IEEE Tabanlı Güç Kalitesi Analiz Yöntemi

2.1. Analizin Kapsamı ve Yaklaşım

Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz, **IEEE tarafından tanımlanan harmonik gerilim senaryoları** altında güç kapasitörlerinin elektriksel tepkilerini nicel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Analiz, yalnızca gerilim harmonik bozulmasının seviyesini değil, aynı zamanda bu bozulmanın kapasitör akımı ve aktif güç üzerindeki etkilerini de kapsayacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu bağlamda analiz yaklaşımı gerilim harmonik bozulmasının nicel olarak belirlenmesi, kapasitör akımındaki harmonik tepkilerin değerlendirilmesi, gerilim seviyesi değişiminin kapasitör davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi olarak üç temel bileşene dayanmaktadır. Bu yaklaşım, klasik güç kalitesi değerlendirmelerinin ötesine geçerek **cihaz temelli bir güç kalitesi analizi** sunmayı hedeflemektedir.

2.2. Zaman Alanı Ölçümlerinden RMS Değerlerin Hesaplanması

Her bir deney kaydı için ölçülen gerilim ve akım dalga şekillerinden, zaman alanında **etkin (RMS) değerler** hesaplanmıştır. RMS değerler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$X_{\{RMS\}} = \sqrt{\left\{ \left\{ \frac{1}{N} \right\} \sum_{\{n=1\}}^{\{N\}} x^2(n) \right\}}$$

Burada x(n), gerilim veya akım dalga şeklinin zamana bağlı örneklerini, N ise toplam örnek sayısını ifade etmektedir. Bu hesaplamalar ile nominal gerilim seviyesinin doğrulanması, harmonik içerik altında kapasitör akımındaki genel büyüklük değişimleri nicel olarak analiz edilmiştir.

2.3. Harmonik Analiz ve THD Hesaplama Yöntemi

Gerilim ve akım dalga şekilleri, frekans alanına dönüştürülerek harmonik bileşenleri elde edilmiştir. Bunun için her bir dalga şekline Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanmıştır. FFT sonucunda elde edilen harmonik genlikler kullanılarak Gerilim Toplam Harmonik Bozulma Oranı (THDv) ve Akım Toplam Harmonik Bozulma Oranı (THDi) hesaplanmıştır.

THD, aşağıdaki genel ifade ile tanımlanmıştır:

$$THD = \frac{\left\{ \sqrt{\sum_{h=2}^H X_h^2} \right\}}{X_1}$$

burada:

X_1 : temel frekans bileşeninin genliği,

X_h : h. harmonik bileşenin genliği,

H: analiz edilen maksimum harmonik derecesidir.

Bu çalışmada, **25. harmonik mertebesine kadar** olan bileşenler dikkate alınmıştır. Bu seçim, hem IEEE standartlarında önerilen sınırlar hem de ölçüm sisteminin bant genişliği ile uyumludur.

2.4. IEEE Harmonik Senaryolarına Göre Gruplama

Her bir kayıt, veri setinde tanımlı olan **IEEE01–IEEE05** etiketlerine göre gruplandırılmıştır. Bu etiketler, IEEE standartlarında tanımlanan farklı harmonik gerilim profillerini temsil etmektedir.

Bu gruplama sayesinde; aynı harmonik senaryoya ait farklı gerilim seviyeleri birlikte değerlendirilmiş, her bir IEEE senaryosu için ortalama ve dağılım değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntem, tekil ölçümlere bağlı kalmadan, **senaryo bazlı güç kalitesi değerlendirmesi** yapılmasına olanak sağlamaktadır.

2.5. Gerilim Seviyesinin Etkisinin Ayrıştırılması

Her bir IEEE harmonik senaryosu, **209 V ile 231 V** arasında değişen nominal RMS gerilim seviyelerinde tekrarlandığından, analizde gerilim seviyesi etkisi ayrıca ele alınmıştır.

Bu amaçla aynı IEEE senaryosu altında, farklı nominal gerilim seviyelerine karşılık gelen kapasitör akımı ve harmonik bozulma değerleri karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde harmonik bozulmanın etkisi, gerilim genliğinin etkisinden ayrıştırılarak incelenebilmiştir.

2.6. Kapasitör Tipine Bağlı Davranışların İncelenmesi

Analiz, iki farklı güç kapasitörü için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Böylece aynı harmonik gerilim profili altında, farklı kapasitörlerin verdiği elektriksel tepkiler doğrudan karşılaştırılabilmiştir. Bu karşılaştırma, kapasitör yapısının ve

elektriksel parametrelerinin, harmonik koşullar altında oluşan akım ve güç davranışları üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

2.7. Analizin Çıktıları

Bu bölümde tanımlanan analiz yöntemi sonucunda aşağıdaki nicel çıktılar elde edilmiştir:

- Her IEEE senaryosu için ortalama **THD_v** ve **THD_i** değerleri
- Nominal gerilim seviyesine bağlı **RMS akım değişimleri**
- Kapasitör tipine bağlı harmonik duyarlılık farkları
- Gerilim ve akım harmonik bozulmaları arasındaki ilişki

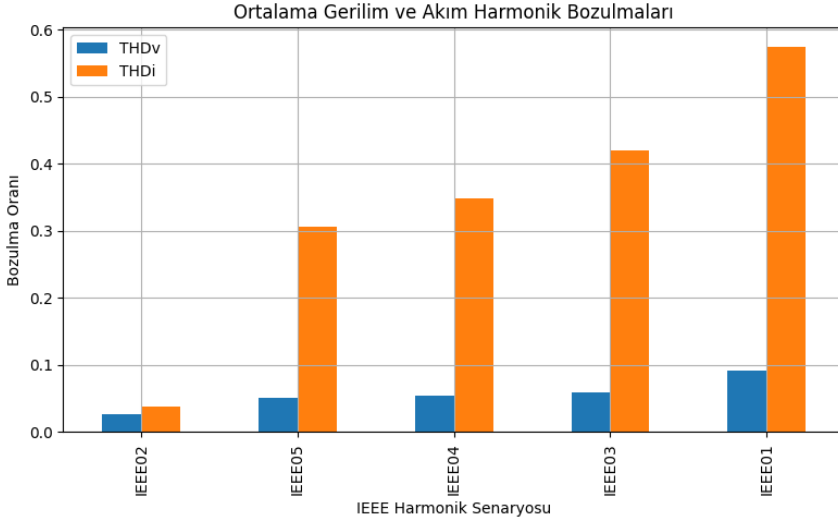
3. IEEE Tabanlı Güç Kalitesi Analiz Sonuçları

Bu bölümde, IEEE tarafından tanımlanan harmonik gerilim senaryoları altında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular grafikler yardımıyla sunulmaktadır. Analiz sonuçları; gerilim harmonik bozulması, kapasitör akım tepkisi ve nominal gerilim seviyesinin etkisi başlıkları altında ele alınmıştır.

3.1. IEEE Harmonik Senaryolarına Göre Gerilim ve Akım Harmonik Bozulmaları

IEEE01–IEEE05 senaryoları için hesaplanan ortalama gerilim toplam harmonik bozulma oranı (THD_v) ve akım toplam harmonik bozulma oranı (THD_i) değerleri Grafik 1’de sunulmuştur.

Grafik 1 Ortalama Gerilim ve Akım Harmonik Bozulmaları



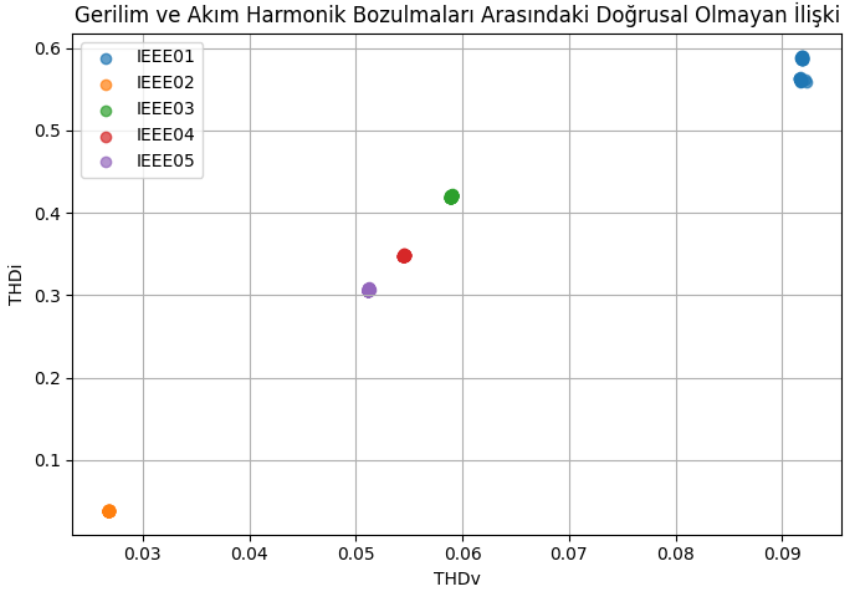
Elde edilen sonuçlara göre, IEEE02 senaryosu, tüm IEEE senaryoları arasında en düşük THDv ve THDi değerlerine sahiptir. IEEE05, IEEE04 ve IEEE03 senaryoları orta seviyede harmonik bozulma göstermektedir. IEEE01 senaryosu, en yüksek gerilim ve akım harmonik bozulma değerlerine sahip senaryo olarak öne çıkmaktadır.

Gerilim harmonik bozulma oranı senaryolar arasında kademeli bir artış sergilerken, akım harmonik bozulma oranındaki artışın çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Özellikle IEEE01 senaryosunda THDi değerleri, diğer senaryolara kıyasla oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır.

3.2. Gerilim Harmonik Bozulması ile Akım Harmonik Bozulması Arasındaki İlişki

Gerilim harmonik bozulması (THDv) ile kapasitör akımındaki harmonik bozulma (THDi) arasındaki ilişki, IEEE senaryoları bazında Şekil 2’de gösterilmiştir.

Grafik 2 Gerilim – Akım Harmonik Bozulmaları Arasındaki İlişki



Bu grafikten elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenebilir:

THDv değerleri senaryolar arasında sınırlı bir aralıkta değişmektedir. Buna karşılık THDi değerleri, THDv’deki artışa bağlı olarak hızlı ve keskin bir yükseliş göstermektedir. THDv–THDi ilişkisi doğrusal bir karakter sergilememekte, belirgin bir doğrusal olmayan davranış ortaya koymaktadır. IEEE01 senaryosu, hem en yüksek THDv hem de en yüksek THDi değerlerinin gözlemlendiği senaryo olarak dikkat çekmektedir. IEEE02 senaryosunda ise her iki metrik de düşük seviyelerde kalmaktadır.

3.3. Nominal Gerilim Seviyesinin Kapasitör RMS Akımı Üzerindeki Etkisi

IEEE01 harmonik senaryosu altında, nominal RMS gerilim seviyesinin kapasitör RMS akımı üzerindeki etkisi Şekil 3’te sunulmuştur. Analiz, 209 V ile 231 V arasındaki gerilim seviyeleri için gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, nominal gerilim seviyesi arttıkça, kapasitör RMS akımında artış gözlemlenmektedir. Bu artış, her iki kapasitör için de yaklaşık doğrusal bir eğilim göstermektedir. Aynı gerilim ve harmonik senaryo altında, iki farklı kapasitör arasında RMS akım değerleri bakımından belirgin farklar bulunmaktadır.

Bu sonuçlar, gerilim seviyesindeki değişimin kapasitör akımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu, ancak bu etkinin büyüklüğünün kapasitör tipine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

3.4. Kapasitör Tipine Bağlı Sonuçların Karşılaştırılması

Analiz sonuçları, farklı kapasitörlerin aynı harmonik gerilim koşulları altında farklı elektriksel tepkiler verdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, aynı IEEE senaryosu altında THD_v değerleri benzer seviyelerde kalmasına rağmen, THD_i ve RMS akım değerleri kapasitör tipine bağlı olarak değişmektedir.

Bu durum, kapasitörlerin harmonik koşullara karşı duyarlılığının yalnızca gerilim harmonik içeriğine değil, aynı zamanda kapasitörün yapısal ve elektriksel özelliklerine de bağlı olduğunu göstermektedir.

3.5. Sonuçların Nicel Özeti

IEEE tabanlı analiz sonucunda elde edilen temel nicel bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- IEEE senaryoları arasında THD_v değerleri sınırlı bir aralıkta değişmektedir.
- THD_i değerleri, THD_v'deki artışa kıyasla çok daha yüksek oranlarda artış göstermektedir.
- Nominal gerilim seviyesi arttıkça kapasitör RMS akımı da artmaktadır.

Kapasitör tipi, harmonik koşullar altında akım ve güç davranışını belirgin şekilde etkilemektedir.

4. Derin Öğrenme Tabanlı Harmonik Senaryo Analizi

4.1. Çalışmanın Amacı ve Yaklaşım

Bu bölümde, IEEE tarafından tanımlanan harmonik gerilim senaryolarının (IEEE01–IEEE05), ölçülen gerilim ve akım dalga şekillerinden otomatik olarak sınıflandırılması amacıyla derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunulmaktadır. Güç kalitesi değerlendirmelerinde harmonik profillerin doğru biçimde tanınması; izleme, teşhis ve önleyici bakım uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir.

Önceki bölümlerde gerçekleştirilen deneysel analizler, gerilim harmonik bozulma oranının (THDv) senaryolar arasında sınırlı değişkenlik gösterdiğini, buna karşılık kapasitör akımındaki harmonik bozulmanın (THDi) çok daha ayırt edici bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Bu gözlem doğrultusunda, derin öğrenme analizinde yalnızca zaman alanındaki ham dalga şekillerine değil, harmonik bileşenlerin spektral özelliklerine dayalı bir veri temsili benimsenmiştir.

4.2. Baseline Yaklaşımlar ve Motivasyon

Derin öğrenme analizine geçmeden önce, farklı giriş temsillerinin sınıflandırma başarımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki temel baseline yaklaşım değerlendirilmiştir.

İlk olarak, yalnızca gerilim dalga şeklinin kullanıldığı zaman alanı tabanlı bir derin öğrenme modeli denenmiştir. Bu yaklaşımda model, IEEE harmonik senaryolarını ayırt edememiş ve test örneklerini tek bir sınıfa yığan trivial bir davranış sergilemiştir. Bu sonuç, gerilim dalga şekillerinin ve THDv değerlerinin senaryolar arasında yeterli ayırt edici bilgi sunmadığını göstermektedir.

İkinci olarak, gerilim ve akım dalga şekillerinin birlikte kullanıldığı zaman alanı tabanlı bir model uygulanmıştır. Bu yaklaşım sınıflandırma performansını kısmen artırmış olsa da, özellikle birbirine yakın harmonik profillere sahip senaryolarda sınıf karışmalarının devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu iki baseline deneme, harmonik senaryoların esasen frekans alanında tanımlandığını ve zaman alanı temsillerinin her durumda yeterli ayırım gücü sağlamadığını ortaya koymuştur.

4.3. Önerilen Derin Öğrenme Modeli

4.3.1. Veri Temsili ve Öznitelik Çıkarımı

Önerilen yaklaşımda, her bir kayıt için gerilim ve akım dalga şekilleri frekans alanına taşınarak harmonik öznitelikler çıkarılmıştır. FFT kullanılarak 1–25. harmonik mertebelerine ait bileşenler elde edilmiştir. Her bir harmonik için aşağıdaki öznitelikler hesaplanmıştır:

- Harmonik genliği (magnitude),
- Harmonik fazı, sinüs ve kosinüs bileşenleri şeklinde temsil edilmiştir.

Genlik öznitelikleri, spektrum şeklinin korunması ve gerilim seviyesi değişimlerinin etkisinin azaltılması amacıyla temel bileşene göre normalize edilmiştir. Faz bilgisinin sinüs ve kosinüs bileşenleriyle temsil edilmesi, faz sarmalanması (phase wrapping) problemini azaltarak modele daha kararlı bir giriş sağlamıştır.

Bu işlem sonucunda, her kayıt için;

- Gerilim sinyali: genlik + faz (sin/cos),
- Akım sinyali: genlik + faz (sin/cos) olmak üzere toplam 150 boyutlu bir öznitelik vektörü oluşturulmuştur.

4.3.2. Model Mimarisi

Sınıflandırma modeli olarak, spektral özniteliklerle uyumlu ve sınırlı veri boyutlarında kararlı öğrenme sağlayan bir çok katmanlı algılayıcı (MLP) tercih edilmiştir. Model mimarisi sırasıyla belirtilen bileşenlerden oluşmaktadır. 150 boyutlu öznitelik vektörü giriş katmanına sahiptir. Birinci gizli katman: 128 nöron, ReLU aktivasyonu ile çalışmaktadır. Dropout katmanı (aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla) ve 64 nörondan oluşan ReLU aktivasyonlu ikinci gizli katman bulunmaktadır. Çıkış katmanında ise IEEE01–IEEE05 sınıfları için softmax aktivasyonu kullanılmıştır.

Model, Adam optimizasyon algoritması ve çapraz entropi kayıp fonksiyonu kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim sürecinde erken durdurma (early stopping) ve öğrenme oranı azaltma mekanizmaları uygulanarak modelin genelleme yeteneği artırılmıştır.

4.4. Sonuçlar

İlk aşamada, yalnızca gerilim dalga şekli kullanılarak zaman alanı tabanlı bir derin öğrenme modeli eğitilmiştir. Bu yaklaşımda model, IEEE01–IEEE05 senaryolarını anlamlı biçimde ayırt edememiştir.

4.4.1. Yalnız Gerilim Dalga Şekli (V-only) ile Zaman Alanı Modeli

Elde edilen test sonuçları şu şekildedir:

- Toplam doğruluk (Accuracy): %20
- Model, test verilerinin tamamını **IEEE02** sınıfına atamıştır.
- IEEE01, IEEE03, IEEE04 ve IEEE05 sınıfları için:
- Duyarlılık (Recall): **0.00**
- F1-skoru: **0.00**

Bu sonuç, gerilim dalga şeklinin ve gerilim harmonik bozulma seviyelerinin (THDv) senaryolar arasında sınırlı farklılık göstermesi nedeniyle, tek başına yeterli ayırt edici bilgi sunmadığını ortaya koymaktadır.

4.4.2. Gerilim ve Akım Dalga Şekli (V+I) ile Zaman Alanı Modeli

İkinci aşamada, gerilim ve akım dalga şekilleri birlikte kullanılarak zaman alanı tabanlı bir derin öğrenme modeli uygulanmıştır. Bu yaklaşım, yalnız gerilim kullanılan modele kıyasla sınıflandırma performansını artırmıştır; ancak tüm sınıflar için kararlı bir ayırım sağlanamamıştır.

Bu model için elde edilen test sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Toplam doğruluk (Accuracy): %35
- Ağırlıklı F1-skoru: %28
- IEEE05 sınıfı için:
- Recall: %90
- IEEE01 ve IEEE03 sınıfları için:
- Kısmi doğru sınıflandırmalar gözlenmiştir.
- IEEE02 ve IEEE04 sınıfları için:
- Hiçbir doğru tahmin üretilenmemiştir (Recall = 0.00).

Bu sonuçlar, akım dalga şeklinin modele eklenmesinin ayırım gücünü artırdığını; ancak zaman alanı temsillerinin, birbirine yakın harmonik profilleri ayırt etmekte hâlâ yetersiz kaldığını göstermektedir.

4.4.3. Harmonik Genlik Öznitelikleri ile Frekans Alanı Modeli

Üçüncü aşamada, gerilim ve akım dalga şekillerinden FFT yardımıyla çıkarılan **1–25. harmonik genlik bileşenleri** kullanılarak spektral temsile dayalı bir sınıflandırma modeli eğitilmiştir.

Bu yaklaşımda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Toplam doğruluk (Accuracy): %80
- IEEE01, IEEE02 ve IEEE05 sınıfları:
- Tam doğru sınıflandırılmıştır (Recall = 1.00).
- IEEE03 sınıfı:
- Recall = **1.00**, Precision = **0.50**
- IEEE04 sınıfı:
- Recall = **0.00**

Tüm IEEE04 örnekleri **IEEE03** olarak sınıflandırılmıştır.

Bu bulgu, IEEE03 ve IEEE04 senaryolarının yalnızca harmonik genlik spektrumu açısından birbirine oldukça yakın olduğunu ve genlik bilgisiyle tam ayrımın mümkün olmadığını göstermektedir.

4.4.4. Harmonik Genlik ve Faz Öznitelikleri ile Önerilen Model

Son aşamada, harmonik genlik özniteliklerine ek olarak **faz bilgisinin sinüs ve kosinüs bileşenleriyle temsil edildiği** spektral öznitelikler kullanılmıştır. Bu öznitelikler, gerilim ve akım sinyalleri için birlikte modele sunulmuştur.

Bu yaklaşımda elde edilen test sonuçları aşağıda verilmiştir:

- Toplam doğruluk (Accuracy): %100
- Macro F1-skoru: 1.00

- IEEE01–IEEE05 sınıflarının tamamı:
- Precision = **1.00**
- Recall = **1.00**
- F1-skoru = **1.00**

Karışıklık matrisi, tüm sınıflar için tamamen köşegen yapıda olup herhangi bir sınıf karışmasının bulunmadığını göstermektedir. Özellikle önceki aşamalarda ayırt edilemeyen IEEE03 ve IEEE04 senaryolarının, faz bilgisinin modele eklenmesiyle birlikte net biçimde ayrıştırıldığı görülmüştür.

4.4.5. Sonuçların Karşılaştırmalı Özeti

Elde edilen sonuçlar, Tablo X'te özetlenmektedir:

- V-only zaman alanı model: **%20 doğruluk**
- V+I zaman alanı model: **%35 doğruluk**
- FFT genlik tabanlı model: **%80 doğruluk**
- FFT genlik + faz tabanlı önerilen model: **%100 doğruluk**

Bu karşılaştırma, güç kalitesi analizinde derin öğrenme başarımının büyük ölçüde **veri temsiline** bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4.5 Genel Değerlendirme

Sayısal sonuçlar, IEEE harmonik senaryolarının tanımının doğrudan spektral bileşenlere dayandığını ve bu nedenle frekans alanında, özellikle faz bilgisi içeren temsillerin, zaman alanı temsillerine kıyasla çok daha yüksek ayırt edicilik sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda, önerilen spektral öznelik tabanlı derin öğrenme yaklaşımı, güç kalitesi izleme ve otomatik harmonik teşhis uygulamaları için güçlü bir alternatif sunmaktadır.

Sonuç

Bu kitap bölümünde, IEEE tarafından tanımlanan harmonik gerilim senaryoları altında çalışan güç kapasitörlerinin davranışı, güç kalitesi perspektifinden ele alınmış ve derin öğrenme tabanlı bir analiz çerçevesi geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, gerilim ve akım dalga şekillerine dayalı farklı veri temsillerinin, harmonik senaryoların otomatik olarak sınıflandırılmasındaki etkisi sistematik biçimde incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, yalnızca gerilim dalga şekline dayalı zaman alanı temsillerinin IEEE harmonik senaryolarını ayırt etmekte yetersiz kaldığını; akım bilgisinin modele eklenmesiyle sınıflandırma performansının artmasına rağmen, zaman alanı yaklaşımlarının yakın harmonik profillere sahip senaryolar için sınırlı kaldığını göstermiştir. Buna karşılık, frekans alanında çıkarılan harmonik genlik özniteliklerinin kullanılmasıyla sınıflandırma başarımı belirgin biçimde yükselmiş; ancak bazı senaryoların (özellikle IEEE03 ve IEEE04) genlik spektrumlarının benzerliği nedeniyle tam ayırım sağlanamamıştır.

Çalışmanın en önemli bulgusu, harmonik genlik bilgisine ek olarak faz bileşenlerinin (sinüs ve kosinüs gösterimiyle) modele dâhil edilmesiyle elde edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, IEEE01–IEEE05 harmonik senaryoları test verisi üzerinde hatasız biçimde sınıflandırılmış ve tüm sınıflar için yüksek doğruluk ve F1-skor değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuç, harmonik senaryoların ayırt edilmesinde faz örüntülerinin kritik bir rol oynadığını ve yalnızca genlik tabanlı değerlendirmelerin bazı durumlarda yetersiz kalabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu bölümde; güç kalitesi analizinde derin öğrenme uygulamalarının başarımının büyük ölçüde veri temsiline bağlı olduğunu göstermekte ve gerilim–akım spektral bileşenlerini birlikte kullanan, faz bilgisini içeren yaklaşımların güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Önerilen yöntem, otomatik güç kalitesi izleme, harmonik stres analizi ve standartlara

dayalı senaryo tanıma uygulamaları için uygulanabilir ve genişletilebilir bir çerçeve sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, farklı standartlara (IEC, PRODIST) ait senaryoların dâhil edilmesi, saha ölçümlerine dayalı veri setleriyle modelin genellenebilirliğinin test edilmesi ve çapraz doğrulama tabanlı performans analizlerinin yapılması planlanmaktadır. Bu yönde yapılacak çalışmaların, yapay zekâ destekli güç kalitesi değerlendirme sistemlerinin pratik uygulamalara entegrasyonunu daha da güçlendireceği değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Acha, E., Madrigal, M., & Miller, T. J. E. (2002). Power system harmonics: Computer modeling and analysis. Wiley.

Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). Power system harmonics. Wiley.

Bollen, M. H. J., & Gu, I. Y. H. (2006). Signal processing of power quality disturbances. Wiley-IEEE Press.

IEEE Std 519-2014. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Power and Energy Society.

Kundur, P. (1994). Power system stability and control. McGraw-Hill.

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444.

Mohammadi-Ivatloo, B., & Elkamel, A. (2018). Optimization of power system operation: Methods and applications. Springer.

Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A. (1999). A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(5), 960–971.

Vázquez, S., Franquelo, L. G., Rodríguez, J., Leon, J. I., Carrasco, J. M., & Galván, E. (2020). Model-based predictive control in power converters: Recent developments and challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(9), 7405–7416.

Wang, F., Zhou, H., & Wu, Q. (2019). Deep learning-based detection and classification of power quality disturbances: A review. *Electric Power Systems Research*, 170, 17–25.

Xu, W., & Liu, Y. (2017). Harmonic resonance and its prevention in industrial power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2236–2245.

Zhao, Z., Zhang, H., & Li, Y. (2021). Intelligent monitoring of power quality using convolutional neural networks. *Applied Energy*, 288, 116684.

BÖLÜM 3

TÜRKİYE STANDARTLARI ÇERÇEVESİNDE ENDÜSTRİYEL KUVVETLİ AKIM ELEKTRİK İÇ TESİSAT PROJELERİNDE MÜHENDİSLİK HESAPLAMALARI

Baran Aras¹
Müslüm Gür²

Giriş

Elektrik iç tesisat projeleri, bir yapının elektriksel gereksinimlerini belirlemede en temel verilerdir. Elektrik iç tesisat projelerinin hazırlanmasında yapının kullanım amacına göre ilgili kanun, yönetmelik ve ulusal/uluslararası standartlar esas alınır (ENERJİ & Bakanlığı, 2001; Gazete, 1984, 2024). Elektrik iç tesisat projeleri yalnızca mühendislik çizimlerinden ibaret değildir. Kapsamlı mühendislik hesaplamaları içerirler. Çünkü bu hesaplamalar yapıya yönelik uygulamaları direkt olarak etkilemektedir.

Elektrik iç tesisat projelerinin hazırlanmasında, yürürlükte bulunan kanun, yönetmelik ve ulusal ve uluslararası standartlar temel referans olarak alınmaktadır (ENERJİ & Bakanlığı, 2001;

¹ Lecturer, Cankiri Karatekin University, Vocational School, Department of Electrical and Energy, Orcid: 0000-0001-7694-9165

² Lecturer Cankiri Karatekin University, Vocational School, Department of Electronics and Automation, Orcid: 0000-0002-4842-5345

Gazete, 1984). Bununla birlikte, yapı sahipleri veya işletmeler tarafından talep edilen özel proje gereksinimleri de söz konusu mevzuat ve standartların sınırları içerisinde kalmak koşuluyla projelendirme sürecine dâhil edilebilmektedir.

Endüstriyel tesislerde üretim süreçlerinin sürekliliği, enerji verimliliği ve işletme güvenliği gibi hususlar, elektrik iç tesisat projelerinde yapılan mühendislik hesaplarının önemini daha da artırmaktadır. Bu tesislerde yapılan elektriksel mühendislik hesaplamaları, yükün doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bu kapsamda öncelikle kurulu güç ve talep güç hesaplamaları yapılır. Bir tesisin yaklaşık elektrik tüketimini bu hesaplar ortaya koymaktadır. Güçler belirlendikten sonra, kablo ve koruma elemanlarının seçimine yönelik kısa devre ve maksimum akım hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Kısa devre hesapları, olası arıza durumlarında sistem elemanlarının maruz kalacağı akımların belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu hesaplar, kabloların termik ve dinamik dayanımının yanı sıra sigorta ve kesicilerin doğru seçilmesini sağlamaktadır (Çetin, 2023; Ural, 2021). Maksimum akım hesapları ise kablo kesitlerinin ve koruma elemanlarının sürekli işletme koşullarında güvenli çalışmasını temin etmeye yönelik olarak yapılmaktadır. Kablo kesitlerinin belirlenmesinde ek olarak gerilim düşümü hesaplamaları yapılmaktadır (Ural, 2021).

Endüstriyel tesislerde reaktif gücün kontrol altına alınması ve enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla kurulan kompanzasyon sistemleri, uygun hesaplamalarla desteklenirse hem şebeke üzerindeki yükü azaltmakta hem de enerji maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Vardar, Çam, & Yalçın, 2010).

Endüstriyel tesislerin çoğu yüksek talep gücünden dolayı kendi dağıtım transformatörlerine sahiptirler. Bundan dolayı transformatör güç belirleme hesaplamaları da yapılmaktadır.

Endüstriyel elektrik iç tesisat projelerinde kullanılan kuvvetli akım temel mühendislik hesaplamaları için tipik bir endüstriyel tesise ait örnek bir yükleme cetveli esas alınarak sunulmuştur. Hesaplamalar, ilgili standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmiş olup, proje çizimi ve uygulama süreçleri kapsam dışında bırakılmıştır. Çalışmanın amacı, elektrik iç tesisat projelerinde kullanılan

mühendislik hesaplarının sistematik bir şekilde ortaya konulması ve bu hesaplamaların projelendirme sürecindeki öneminin vurgulanmasıdır. Hesaplamalarda alçak gerilim (0,4 kV) üç fazlı sistem esas alınmış, yüklerin sürekli çalışma koşulları dikkate alınmış ve ilgili standartlarda verilen sınır değerler referans alınmıştır (Ural, 2021). Çalışma kapsamında, proje çizimleri ve uygulama detayları değerlendirme dışı bırakılarak yalnızca mühendislik hesaplamalarına odaklanılmıştır.

Endüstriyel Kuvvetli Akım Elektrik İç Tesisatlarına İlişkin Mevzuat ve Standartlar

Endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projelerinde gerçekleştirilen mühendislik hesaplamaları, Türkiye’de yürürlükte bulunan ilgili kanun, yönetmelik ve standartlar esas alınarak yapılmaktadır (ENERJİ & Bakanlığı, 2001; Gazete, 1984, 2024). Bu düzenlemeler, elektrik tesisatlarının güvenli, süreklilik arz eden ve teknik açıdan uygun şekilde tasarlanmasını ve işletilmesini amaçlamaktadır.

Türkiye’de elektrik iç tesisatlarına yönelik temel düzenleme, Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği olup, bu yönetmelik tesisatların projelendirilmesi ve hesaplanmasında uyulması gereken esasları belirlemektedir (Gazete, 1984). Endüstriyel tesislerde kuvvetli akım sistemlerine ilişkin hesaplamalarda ayrıca Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği hükümleri dikkate alınmaktadır (Gazete, 2024). Topraklama sistemlerine yönelik hesaplamalar ise Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği kapsamında ele alınmaktadır (ENERJİ & Bakanlığı, 2001). Bunun yanı sıra, elektrik iç tesisat projelerinde yapılan mühendislik hesaplamaları, Türk Standartları Enstitüsü tarafından yayımlanan ilgili standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Özellikle TS HD 60364 serisi standartlar, kablo seçimi, kısa devre akımı, gerilim düşümü ve koruma önlemlerine ilişkin hesaplama esaslarını tanımlamaktadır (Paker & Ekmekci, 2022).

Bu bölümde sunulan mühendislik hesaplamaları, belirtilen mevzuat ve standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, çalışma

kapsamı yalnızca endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projelerinde kullanılan hesaplama esasları ile sınırlandırılmıştır.

Pano Yükleme Cetvellerine Göre Güç Hesaplamaları

Endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projelerinde güç hesaplamalarının başlangıç verisini oluşturan Tablo 1.'de verilen pano yükleme cetveli esas alınarak kurulu güç ve talep gücü hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Yükleme cetveli; tesiste bulunan alıcıların adı, adetleri, birim güçleri ve varsa çalışma karakteristiklerini içerecek şekilde düzenlenmiştir. Hesaplamalar, projelendirme sürecinde kullanılan standart yaklaşım doğrultusunda aktif güç (kW) üzerinden yürütülmüş; talep gücü hesabında eşzamanlılık talep güç katsayıları dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Endüstriyel Tesise Ait Örnek Pano Yükleme Cetveli

Pano Adı	DT-1	DT-2	DT-3	DT-4	DT-5	DT-6	DT-7
Giriş	T.M.Ş	T.M.Ş.	T.M.Ş.	A.O.S.	A.O.S.	T.M.Ş.	A.O.S.
T.M.Ş.	3x40A	3x63A	3x63A	3x40 A	3x25 A	3x63A	1x16 A
A.O.S.	35 kA	55 kA	35 kA	10 kA	10 kA	35 kA	6 kA
Kolon	T.M.Ş	T.M.Ş.	T.M.Ş.	A.O.S.	A.O.S.	T.M.Ş.	A.O.S.
T.M.Ş.	3x63A	3x80A	3x80A	3x50 A	3x32 A	3x80A	3x40 A
A.O.S.	35 kA	55 kA	55 kA	10 kA	10 kA	35 kA	10 kA
Aydınlatma Adedi	33	22	34	17	21	20	0
Priz Adedi	16	0	19	20	11	2	28
Motor Adedi	0	5	6	0	0	5	0
Kolon Kablosu (mm ²)	5x4	5x10	5x10	5x4	5x4	4x16	3x2,5
R Fazı (W)	3112	9340	6100	2300	1200	6800	1500
S Fazı (W)	2500	9300	6372	3872	900	6800	1500
T Fazı (W)	2793	8992	5876	2918	738	6392	1200
Toplam Güç (W)	8405	27632	18348	9090	2838	19992	4200

Tablo 1.'de tesisin ana dağıtım panosu (ADP)'den beslenen yedi adet dağıtım tablosuna (DT) sahip olduğunu görülmektedir. Pano çıkışları güç ve tiplerine göre termik manyetik şalter (TMŞ) veya anahtarlı otomatik sigorta (AOS) ile korunmaktadır. Tabloda aydınlatma, priz ve motor sayıları ile birlikte kolon hattı besleme kablosunun kesitleri de gösterilmiştir. Son olarak R, S, T fazlarındaki yük dağılımı ve toplam güç watt cinsinden verilmiştir.

Yükleme cetvellerinde R, S, T fazlarının dengeli veya dengeli duruma yakın şekilde yüklenmesi dağıtım şebekelerinin sürdürülebilirliği ve hat güvenliği açısından en önemli uygulama etmenlerinden birisidir. Yüklemeye cetvelleri projenin raporsal özeti olarak görülebilir.

Tablo 1.'de verilen yüklerden yola çıkarak kurulu güç ve talep güç hesaplanmıştır. Kurulu güç P_K , talep güç P_T olarak yazılıp, Eşitlik (1) ve (2)'den yola çıkarak Eşitlik (3) ve Eşitlik (4) oluşturulmuştur (Yapıcıoğlu, Sayan, & Terzioğlu, 2019).

$$P_K = \sum_{i=1}^n P_{DTi} \quad (1)$$

$$P_T = P_K \times k, \text{ (} k=\text{eş zamanlı güç katsayısı)} \quad (2)$$

$$P_K = P_{DT1} + P_{DT2} + P_{DT3} + P_{DT4} + P_{DT5} + P_{DT6} + P_{DT7} \quad (3)$$

$$P_T \approx P_K, \text{ (endüstriyel tesislerde } k \approx 1) \quad (4)$$

Eşitlik (3)'e göre hesaplama yapıldığında kurulu güç 90505 W, Eşitlik (4)'e göre talep güçte 90505 W olmuştur.

Endüstriyel tesislerde üretim karakteristiğine bağlı olarak talep katsayısı değişkenlik gösterebilir. Sürekli çalışan ve eş zamanlı yüklerin baskın olduğu tesislerde talep katsayısının 1'e yakın kabul edilmesi yaygın bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu kapsamda hesaplamalarda talep katsayısı 1 olarak değerlendirilmiştir (Gazete, 1984).

Yapı Ana Giriş Hattı Kablo ve Aşırı Akım Koruma Elemanı Hesaplamaları

Yapılarda ana giriş hattı, ana kolon hattı olarak adlandırılmaktadır. Yapılar elektrik dağıtım şirketlerine bağlı olan hatlardan ana besleme kabloları ile enerji irtibatı sağlarlar (Gazete, 1984). Ana giriş kablosunun standartlara ve mühendislik hesaplamalarına uygun seçilmesi özellikle endüstriyel tesislerde işletmenin sürdürülebilirliği elektriksel sistemlerin çalışabilmesi ve herhangi arıza sebeplerinin oluşmaması için önemlidir (ENERJİ & Bakanlığı, 2001; Gazete, 2024). Aynı şekilde giriş aşırı akım koruma

şalterlerinin de standartlara ve elektriksel yüklere bağlı olarak uygun hesaplanması gereklidir (Çetin, 2023). Özellikle ana girişte bulunan şalterlerin maksimum akım koruma değeri kablonun akım taşıma kapasitesinden belirli bir derecede düşük olması gereklidir. Eğer şalterin maksimum akım koruma değeri kablonun akım taşıma kapasitesinden büyük olursa, bu kapasiteden fazla olan akımın kablo ve tesisat üzerindeki olumsuz etkileri önlemez (Body, 2017).

Bu durumda ana kolon hattı kablosunun maksimum akım taşıma kapasitesi ve giriş şalterinin maksimum akımının hesaplanması için ilk olarak şebekeden çekilecek akım bulunmalı (Kaşıkçı).

Kablo kesit hesabında akım taşıma kapasitesine ek olarak gerilim düşümü hesaplaması yapılmalıdır. Bunun sebebi ise uzun mesafelerde hat empedansına bağlı olarak yük için gerilim seviyeleri düşüş gösterir. Bunun önüne geçebilmek için kablo seçimlerinde gerilim düşümü hesaplaması da önemlidir (Kaşıkçı).

$\cos\phi$ güç katsayısı, olmak üzere Eşitlik (5)'de yük tarafından çekilecek akım hesaplanmıştır. Eşitlik (6)'da ise akım taşıma kapasitesi uygun olan kablo kesiti için gerilim düşümü hesaplaması yapılmıştır. Türkiye'de hazırlanmış olan yönetmeliklere göre endüstriyel tesislerde izin verilen maksimum gerilim düşümü oranı <3 olmalıdır (Gazete, 1984). Eşitlik (5)'de verilen V_{F-F} faz-faz arası gerilim ve 0,97 kompanzasyon sonrası hedef $\cos\phi$ değeri olmak üzere:

$$I = \frac{P_T}{\cos\phi \times \sqrt{3} \times V_{F-F}} = \frac{90505}{0,97 \times \sqrt{3} \times 400} \quad (5)$$

Akım değeri Eşitlik (5)'e göre 141,857A bulunmuştur. Bu akım değerine göre $3 \times 50 + 25 \text{ mm}^2$ NYY kablonun akım taşıma kapasitesi uygun bulunmuştur. Gerilim düşümü değeri %e, kablonun uzunluğu l , kesiti S olmak üzere:

$$\%e = 0,0124 \left(\frac{P_T \times l}{S} \right) = 0,0124 \left(\frac{90505 \times 40}{50} \right) \quad (6)$$

%e değeri Eşitlik (6)'ya göre $0,901 < 3$ bulunmuştur. $3 \times 50 + 25 \text{ mm}^2$ NYY kablo bu durumda hem akım taşıma kapasitesi hemde gerilim

düşümü bakımından hesaplanan talep güç değerine uygun kablo olarak seçilmiştir. 0,0124 katsayısı üç fazlı besleme noktaları için kullanılır ve tek faz için bu katsayı 0,074 olarak hesaplamaya eklenir (Gazete, 1984).

3×50+25 mm² NYY kablo taşıyabileceği akım değeri standartlara uygun kataloglarda 160A olarak belirlenmiştir (İSPİRLİ & KALENDERLİ). Bu durumda seçilecek ana giriş şalterinin nominal akımı 160A’i aşmamalıdır. 160A nominal akım değerine sahip T.M.Ş. seçimi uygun olmuştur. Çünkü bu değer altında da endüstriyel tesis tam yükte çalışırken enerjinin kesilmesine sebep olacaktır (Kaşıkçı).

İç Tesisat Panolarına Ait Kablo Kesiti ve Aşırı Akım Koruma Elemanlarının Hesaplanması

Gerilim düşümü kontrolleri gerçekleştirilirken, yükleme cetvelinden elde edilen faz akımları ile kolon kablolarının kesitleri temel alınmıştır. En yüksek yüke sahip faz akımı dikkate alınarak yapılan bu analiz, tesisatın en zorlu çalışma koşullarında dahi güvenliğini sağlayacak şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bilindiği üzere, daha büyük kesitli kablolar kullanılan kolon hatlarında gerilim düşümü daha düşük seviyelerde kalırken; kesiti küçük ve uzun mesafeye sahip hatlarda bu düşüm daha belirgin hale gelmektedir (Cronshaw, 2011; Gazete, 1984).

Kolon kablolarının kesitleri yalnızca akım taşıma kapasitesi açısından değil, aynı zamanda gerilim düşümü kriterlerine göre de yeterli bulunmuştur. Yüğü yüksek olan panolara giden hatlarda daha büyük kesitli kabloların tercih edilmesi, gerilim düşümünü standartlarda belirtilen sınırlar içinde tutmaya yardımcı olmaktadır (Cronshaw, 2011). Düşük yük seviyesine sahip panolar için seçilen kabloların ise hem ekonomik hem de teknik açıdan yeterli olduğu gözlemlenmiştir.

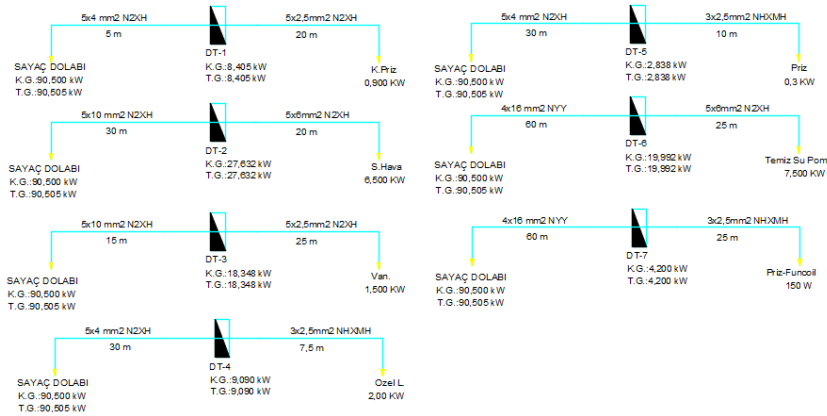
Gerilim düşümü kontrolleri, iç tesisat projelerinde enerji kalitesini korumak ve alıcı cihazların sağlıklı çalışmasını temin etmek açısından kritik bir adımdır (Photovoltaics & Storage, 2009). Kolon kabloları üzerinde yapılan bu kontroller, tesis genelinde

dengeli ve kararlı bir gerilim dağılımının sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, gerilim düşümü hesaplamaları; faz akımları, kablo kesitleri ve hat özellikleri birlikte dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler, kolon hatlarında oluşan gerilim düşümlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ve seçilen kablo kesitlerinin bu açıdan da uygun olduğunu göstermektedir. Gerilim düşümü kontrolleri, izleyen aşamalarda yapılacak koruma elemanı koordinasyonu ve sistem performans değerlendirmeleri için tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Eşitlik (5) ve (6) DT-1, DT-2, DT-3, DT-4, DT-5, DT-6, DT-7 panoları için ayrı ayrı kullanılmıştır. Ana kolon hattı dışındaki gerilim düşümü hesaplamaları ADP-DT, DT-En uzak linye hattı olarak ayrı ayrı hesaplanan iki gerilim düşümü aralığının toplamıyla hesaplanır (Gazete, 1984). Şekil 1’de DT panoları için gerilim düşümü diyagramı gösterilmiştir.

Şekil 1. DT Panolarına Ait Gerilim Düşümü Diyagramları



Şekil 1. için tüm DT'lere Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) uygulanırsa Tablo 1.'de verilen kolon kablosu, kolon ve giriş aşırı akım koruyucu elemanlarının uygun olduğu görülmüştür. Sırasıyla gerilim düşümü değerleri DT-1 için 0,219, DT-2 için 1,297, DT-3 için 0,610, DT-4 için 1,298, DT-5 için 0,353, DT-6 için 1,199 ve DT-7 için 0,124 bulunmuştur. Bu değerlerin tamamı <3 %e değerine uygundur.

Kompanzasyon Sistemi Hesaplamaları

Endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projelerinde kompanzasyon sistemleri, reaktif gücün kontrol altına alınması ve enerji iletim sisteminin verimli şekilde işletilmesi açısından önemli bir tasarım bileşenidir. Endüktif karakterli yüklerin yoğun olarak bulunduğu endüstriyel tesislerde, reaktif gücün artması güç katsayısının düşmesine ve şebekeden çekilen görünür gücün yükselmesine neden olmaktadır. Bu durum hem enerji iletim elemanlarının gereksiz yüklenmesine hem de işletme maliyetlerinin artmasına yol açabilmektedir (Cronshaw, 2011).

Kompanzasyon sistemlerinin temel amacı, tesisin güç katsayısını kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutarak reaktif güç ihtiyacını yerinde karşılamaktır. Türkiye’de yürürlükte bulunan mevzuat ve uygulamalar kapsamında, endüstriyel tesislerde güç katsayısının belirli bir değerin altına düşmesi durumunda reaktif enerji bedeli uygulanmaktadır (ÇELEBİ & Müdürlüğü). Bu nedenle kompanzasyon sistemleri, yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli bir tasarım unsurudur.

Kompanzasyon hesabında temel büyüklükler; tesisin aktif gücü (P), mevcut güç katsayısı ($\cos\phi_1$) ve hedeflenen güç katsayısıdır ($\cos\phi_2$). Gerekli kondansatör gücü (Q_C), bu büyüklükler kullanılarak Eşitlik (7) analiz edilmiştir (Berry & Walter, 2018).

$$Q_C = P_T (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \quad (7)$$

Burada $\tan\phi_1 - \tan\phi_2$, k katsayısını oluşturmaktadır. Bu katsayı kompanzasyon k katsayısı tablosundan belirlenmektedir (Vardar et al., 2010). Mevcut dağıtım hattı $\cos\phi$ değeri 0,8 alınır, hesaplamalar kapsamında hedef $\cos\phi$ değeri 0,97 olarak belirlenmiştir. Endüstriyel tesislerde 0,95 üzerinde olması tercih edilmelidir. İlgili katsayı tablosundan bu değerler kapsamında 0,5 olarak alınmıştır. Bu durumda Q_C değeri $P_T \cdot 0,5$ olur. Sonuç olarak gerekli kondansatör gücü 45,253 kVAr olur. Bu değer üzerinde kondansatör gücü projede tesis edilmelidir. 50 kVAr’lık bir kompanzasyon sistemi uygundur.

Endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan motorlar, transformatörler ve sürücüler (frekans konvertörleri, yumuşak yol

vericiler vb.) endüktif karakterli yükler oluşturmaktadır. Bu tür yükler, çalışma prensipleri gereği manyetik alan oluşturmak için reaktif güce ihtiyaç duymakta ve bu durum güç katsayısının düşmesine neden olmaktadır (Duffey & Stratford, 2002). Özellikle hız kontrolü amacıyla kullanılan motor sürücüler, endüktif yük etkisine ek olarak doğrultucu ve anahtarlama yapıları nedeniyle şebekeye harmonik bileşenler de enjekte edebilmektedir. Endüktif yüklerin ve sürücülerin yoğun olarak bulunduğu tesislerde, reaktif güç ihtiyacının doğru şekilde belirlenmesi ve kompanzasyon sisteminin bu yük karakteristiğine uygun olarak tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde, hem reaktif enerji cezaları hem de harmoniklerin neden olduğu ilave kayıplar ve ekipman zorlanmaları ortaya çıkabilmektedir (Jaekel, 2008). Bu nedenle kompanzasyon sistemi tasarımında, motorlu yüklerin ve sürücülerin etkileri birlikte değerlendirilerek uygun kapasitede ve gerektiğinde filtreli çözümler tercih edilmektedir (Duffey & Stratford, 2002; Jaekel, 2008). Bu sebeple toplam 7,5 kVAr 3 kademeli şönt reaktörün kompanzasyon sistemine entegrasyonu yük karakteristiğini olumlu yönde etkileyecektir. Şönt reaktör gücü, tesisin yük karakteristiği ve sürücülerin şebeke üzerindeki etkileri dikkate alınarak örnek bir tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilmiştir.

Trafo ve Jeneratör Güç Hesaplamaları

Endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projelerinde, trafo ve jeneratör güçlerinin doğru belirlenmesi; tesisin enerji sürekliliği, güvenli işletilmesi ve yüklerin kesintisiz bir şekilde beslenmesi açısından kritik öneme sahiptir (Kaşıkçı). Bu ekipmanların seçimi yalnızca toplam aktif güce bağlı kalmadan; talep gücü, yüklerin özellikleri, güç katsayısı ve çeşitli işletme senaryoları birlikte değerlendirilerek yapılır (Commission, 2001).

Trafo güç hesaplamalarında temel alınan başlıca veri, tesisin talep gücüdür. Yükleme cetvelinden elde edilen ve eşzamanlılık katsayıları gözetilerek belirlenen bu değer, trafonun sürekli olarak beslemesi gereken yük seviyesini gösterir (IEEE., 1993). Trafo gücü belirlenirken, yalnızca aktif güç değil, aynı zamanda güç katsayısı da göz önüne alınarak görünür güç (S) cinsinden hesap yapılır (CODE, 2005). Genellikle, hesaplanan görünür gücün üzerinde

standart bir trafo seçilmesi tercih edilir. Bu uygulama, gelecekteki olası yük artışlarına ve işletme esnekliğine karşı bir güvenlik payı sağlar. Ayrıca, kısa süreli aşırı yüklenme kapasitesi, çevresel koşullar ve trafo soğutma sınıfı gibi teknik kriterler de seçim sürecinde dikkate alınır (CODE, 2005; Commission, 2001; IEEE., 1993).

Eğer tesis motorlu yüklerin yoğun olduğu bir yapıdaysa, jeneratörün kalkış akımlarını karşılayabilecek kapasitede seçilmesi hayati öneme sahiptir. Bu nedenle jeneratör gücü hesaplanırken, görünür gücün üzerine belirli bir güvenlik katsayısı eklenir veya motor kalkış senaryoları doğrultusunda daha yüksek kapasiteli bir jeneratör tercih edilir (IEEE., 1993; Neitzel, Simon, Widup, & Schuerger, 2015).

Jeneratör gücü hesaplamaları, trafo hesaplamalarından farklı olarak sadece sürekli yükleri değil, aynı zamanda yüksek kalkış akımına sahip motorlu yüklerin etkisini de göz önünde bulundurur (IEEE., 1993; Neitzel et al., 2015). Endüstriyel tesislerde jeneratörler genellikle yedek enerji kaynağı olarak kullanıldığından, hangi yükleri (yalnızca kritik olanlar mı yoksa tüm tesis mi) besleyeceği önceden belirlenmelidir. Hesaplamalarda, bu yüklerin toplam aktif gücü ve güç katsayısı esas alınırken, motor kalkışları sırasında meydana gelebilecek ani yüklenmeler de dikkate alınır (IEEE., 1993; Neitzel et al., 2015).

Trafo ve jeneratör güçlerinin birlikte değerlendirilmesi, hem normal işletme koşullarında hem de enerji kesintilerinde tesisin güvenli ve kesintisiz enerji alabilmesini mümkün kılar (IEEE., 1993). Doğru güçte seçilen trafo ve jeneratörler, aşırı yüklenmeleri ve gerilim dalgalanmalarını önleyerek, tesisin genel işletme performansını olumlu yönde etkiler.

Eşitlik (8)'de uygun trafo güç hesabı yapılmıştır. Endüstriyel tesislerde hem jeneratör hem trafo güçlerinin görünür güce göre belirlenmesinden dolayı jeneratör gücü belirlenirken, trafo gücü ile tesisin talep gücü arasındaki ilişki dikkate alınmış ve jeneratörün kritik yükleri besleyecek kapasitede seçilmesi esas alınmıştır (IEEE., 1993; Neitzel et al., 2015). Bu sebeple $S_{\text{TRAFO}} = S_{\text{JENERATÖR}}$ olarak alınmıştır.

$$S_{TRAFO} = S_{JENERATÖR} = \frac{P_T}{\cos\varphi} = \frac{90505}{0,97} = 93304 \text{ W} \quad (8)$$

Eşitlik (8)'e göre 100 kVA trafo ve jeneratör hesaplamaları yapılan endüstriyel tesis için uygundur.

Sonuç

Endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projeleri, bir tesisin güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde işletilebilmesi açısından büyük önem taşıyan mühendislik çalışmalarını içerir. Bu projelerde yapılan mühendislik hesaplamaları yalnızca yasal bir gereklilik değil; aynı zamanda işletme güvenliği, enerji kalitesi ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da belirleyici rol oynamaktadır (Gazete, 1984, 2024).

Bu kitap bölümünde, endüstriyel tesislerde sıkça karşılaşılan elektrik iç tesisat projelerinde kullanılan kuvvetli akım mühendislik hesapları sistematik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Yükleme cetvellerine dayanarak yapılan kurulu güç ve talep gücü hesapları, tesisin elektrik yük profilinin doğru şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Bu hesaplamalar, ilerleyen aşamalarda yapılan kısa devre akımı, kablo kesiti, maksimum akım ve gerilim düşümü hesaplamaları için temel bir veri kaynağı olmuştur.

Kısa devre akımı analizlerinde, alçak gerilim şebekeleri için kabul edilen kısa devre seviyeleri ve seçilen koruma elemanlarının kesme kapasiteleri dikkate alınarak güvenli bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Bu çerçevede, dağıtım panolarında kullanılan termik manyetik şalterler ve otomatik sigortaların olası kısa devre koşullarına karşı yeterli dayanım sağladığı görülmektedir.

Kablo kesiti ve maksimum akım hesaplamaları, hem iletkenlerin termik dayanıklılığı hem de koruma elemanlarıyla uyumlu çalışma koşulları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Gerilim düşümü hesaplamalarının sonucunda, kolon ve linye hatlarındaki gerilim düşümlerinin mevcut standartlarda belirtilen sınırların içinde kaldığı tespit edilmiştir (Kaşıkçı). Bu, alıcıların sorunsuz çalışmasını ve tesis genelinde

enerji kalitesinin korunmasını sağlayacak uygun bir tasarının uygulandığını göstermektedir.

Ayrıca, kompanzasyon sistemi hesaplamaları sayesinde reaktif gücün kontrol altına alınmasına yönelik gerekli kondansatör kapasitesi belirlenmiştir. Endüktif yükler ve motor sürücülerinin sisteme etkileri de dikkate alınarak, güç katsayısının iyileştirilmesine yönelik teknik bir çerçeve sunulmuştur.

Trafo ve jeneratör güç hesaplamaları ise tesisin talep gücü ve yük karakteristikleri temel alınarak uygun görünür güç değerleri üzerinden yapılmıştır. Bu yaklaşım, hem normal çalışma koşullarında hem de enerji kesintilerinde tesisin güvenli ve sürekli enerji beslemesine sahip olmasına katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu bölümde ele alınan mühendislik hesaplamaları, endüstriyel kuvvetli akım elektrik iç tesisat projelerinde uygulanması gereken temel tasarım ilkelerini bütüncül bir perspektifle sunmaktadır. Aktarılan hesaplama yöntemleri, ilgili mevzuat ve standartlar doğrultusunda güvenli, uygulanabilir ve sistematik bir projelendirme sürecine katkıda bulunmaktadır. Bu içerik, benzer projeler için yol gösterici bir kaynak niteliği taşımakta ve mühendislik hesaplarının önemini vurgulamaktadır.

Kaynakça

- Berry, C. A., & Walter, D. J. (2018). AC Circuit Analysis. In *Fundamentals of Industrial Electronics* (pp. 2-1-2-40): CRC Press.
- Body, C. (2017). International electrotechnical commission. *Young, 2017*, 05-18.
- CODE, P. (2005). Power transformers–part 7: loading guide for oil-immersed power transformers.
- Commission, I. E. (2001). IEC 60364: Low-voltage electrical installations. *Geneva, Switzerland: IEC*.
- Cronshaw, G. (2011). Energy efficiency of low-voltage electrical installations.
- ÇELEBİ, Ö., & Müdürlüğü, K. O. S. B. ORGANİZE SANAYİ BÖLGELERİNDE ENERJİ KALİTESİ GÖRÜNÜMÜ VE KÂHTA OSB'DE ENERJİ KALİTESİ UYGULAMA ÇALIŞMALARI.
- Çetin, R. (2023). *Enerji sistemlerinde meydana gelen geçici olayların otomasyon sistemleri üzerindeki etkileri*. Hitit University (Turkey),
- Duffey, C. K., & Stratford, R. P. (2002). Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Transactions on industry applications*, 25(6), 1025-1034.
- ENERJİ, V. T. K. B., & Bakanlığı, T. K. (2001). Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği. In: AĞUSTOS.
- Gazete, R. (1984). ELEKTRİK İÇ TESİSLERİ YÖNETMELİĞİ, Resmî Gazete Tarihi: 04.11. 1984 Resmî Gazete Sayısı: 18565. In.
- Gazete, R. (2024). Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği. In: Erişim.

IEEE. (1993). *Electric Power Distribution for Industrial Plants*: IEEE.

İSPİRLİ, M. M., & KALENDERLİ, Ö. ENERJİ KABLOSU SEÇİMİ İÇİN MOBİL CİHAZ YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ.

Jaekel, B. W. (2008). *Description and classification of electromagnetic environments-revision of IEC 61000-2-5*. Paper presented at the 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.

Kaşıkcı, İ. GÜNCEL STANDARTLAR DOĞRULTUSUNDA ALÇAK GERİLİM ELEKTRİK TESİSLERİNİN TASARIMI, UYGULAMASI VE DENETİMİ.

Neitzel, D. K., Simon, M. E., Widup, R., & Schuerger, R. J. (2015). An overview of IEEE 3007 series standards: addressing the operations, management, maintenance, and safety of industrial and commercial power systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, 21(4), 56-60.

Paker, S., & Ekmekci, I. (2022). Electrical hazards in industrial facilities and evaluation of the measures. *REVUE ROUMAINE DES SCIENCES TECHNIQUES—SÉRIE ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGÉTIQUE*, 67(2), 133-138.

Photovoltaics, D. G., & Storage, E. (2009). IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.

Ural, İ. (2021). Elektrik tesislerinde topraklama sistemleri ve bir yerleşim bölgesinde uygulaması.

Vardar, T., Çam, E., & Yalçın, E. (2010). Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Enerji Verimliliği ve Kamu Kurumlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2(2), 20-24.

Yapıcıoğlu, M. F., Sayan, H. H., & Terzioğlu, H. (2019). Karabük ilindeki alçak gerilim dağıtım sistemlerinde elektrik tüketiminin analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 411-417.

BÖLÜM 4

HAVA VE UZAY ARAÇLARI İÇİN MODERN UÇUŞ KONTROL YÖNTEMLERİ

HARUN ÇELİK¹

Giriş

Uçmak, insanoğlunun binlerce yıllık hayalidir. Bunu gerçekleştirmek için çok uzun yıllar çalışmıştır. Biyolojik yapısı gereği kendisi için bunu başaramamış olsa da XX. yüzyılın başlarından itibaren uçuşu gerçekleştirebilecek motorlu araçlar tasarlamayı başarmıştır. Bu tarihten sonra hızla gelişen hava ve uzay araçları günümüzde çok geniş bir yelpazede, çok farklı amaçlarla, yine çok farklı türlerde ve sınıflarda üretilebilmektedir.

Hava ve uzay araçları günümüzde bilimsel teorilerin uygulama alanı bulduğu en ileri teknolojilerdendir. Uçuş, tasarımı hem oldukça karmaşık hem de oldukça hassas olan bir hava-uzay aracının dengesini, kararlılığını ve kontrolünü de içeren kapsamlı bir süreçtir. Tüm hava araçları aynı fizik kurallarıyla hareket ederler, ancak bu hareketleri hem şekillerine, ağırlıklarına ve itki güçlerine hem de yapılarına, kontrol sistemlerine, hızlarına ve atmosfere bağlı olarak çok farklı olabilir. Uçuşun emniyetle

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Erciyes Üniversitesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, haruncelik@erciyes.edu.tr, Orcid: 0000-0001-5352-3428

gerçekleşmesi veya hareketin kontrol altında tutulması için tüm bunların birlikte ele alınması gerekir. Kontrol, uçuşun sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için hayati öneme sahiptir. Kontrol gereklilikleri ele alınarak tasarlanan bir araç, pilot veya astronot ihtiyaçlarına göre yönlendirilebilme ayarları yapılabileceği gibi tasarlanan elektronik sistemlerle kontrol, otomatik olarak da gerçekleştirilebilir.

Otomatik kontrol, bir sistemin davranışının hedeflenen şekilde gerçekleşmesi için insan müdahalesi olmadan yönlendirilmesi ve yönetilmesidir. Bu amaçla tasarlanan kontrol sistemi, sahip olduğu yapı ve istenen hedefler aracılığıyla dinamik sistemin davranışını denetler. Kontrol sistemleri, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu sistemlerinin tasarımı için ise çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Yaklaşımların her biri farklı teknik ve matematiksel temellere dayanan yöntemler barındırmaktadır. Bu yaklaşımlar klasik ve modern kontrol başlıkları altında sınıflandırılabilir.

Klasik kontrol, sistem dinamiklerini ifade eden temel diferansiyel denklemlerin zaman düzleminde çözümünün karmaşasından ve zorluğundan kurtulmak için Laplace dönüşümü ile frekans düzleminde transfer fonksiyonları, blok şemaları gibi yöntemlerin kullanılmasına dayanır. Bir sistemin davranışını ortaya koyan diferansiyel denklem, bir transfer fonksiyonuna dönüştürülerek sistem davranışının (çıkışının) bir temsilini, sistemi uyaranın (girdinin) bir temsiliyle cebirsel olarak ilişkilendiren matematiksel bir model oluşturulur. Diferansiyel denklemin cebirsel bir denkleme dönüştürülmesi, hesaplamaların çok daha kolay matematiksel işlemlerle yapılmasını ve birbirine bağlı alt sistemlerin daha kolay modellenmesini sağlar. Laplace düzlemi tekniklerinin en büyük üstünlüğü, sistemin kararlılığı ile geçici hal davranışı bilgisini çok hızlı sağlamasıdır. Bu sayede değişen sistem parametrelerinin etkileri anında görülerek istenen hedefleri

sağlayacak tasarım yapılabilmektedir. Klasik kontrolün temel eksikliği ise sınırlı uygulanabilirliğidir. Yani bu kontrol sadece doğrusal zamanla değişmeyen sistemlere veya bu yapıda olduğu varsayılabilen sistemlere uygulanabilir.

1960'larda uzay mühendisliği araştırmalarının artışıyla birlikte, tasarlanan gelişmiş sistemlerde otomatik kontrol sistemlerine olan ihtiyacın kapsamı da artmıştır. Doğrusal zamanla değişmeyen diferansiyel denklemler ve bunlardan türetilen transfer fonksiyonları kullanılarak sistemlerin modellenmesi ve kontrol edilmesi gün geçtikçe yetersiz hale gelmiştir. Modern kontrol, klasik kontrolün bu eksikliğini gidermek için zaman düzleminde durum uzay gösterimini kullanan ve çok daha çeşitli sistemlerin modellenmesi, analiz edilmesi ve tasarlanması için bütüncül bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır.

Klasik kontrol basit sistemler ve doğrusal sistemler için daha uygunken modern kontrol, teknolojinin gelişmesiyle doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin daha karmaşık matematiksel modelleriyle çalışabilmektedir. Modern kontrol sayesinde daha hassas kontrol gerektiren ve doğrusal olmayan sistemlerin denetimi de yapılabilmektedir. Klasik kontrolde doğrusal zamanla değişmeyen diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen sistemler, frekans düzleminde, transfer fonksiyonları ve blok şemaları ile analiz edilir veya tasarlanırken; modern kontrolde doğrusal olmayan diferansiyel denklemler ile ifade edilen sistemler de zaman düzleminde, durum uzay gösterimi ve işaret akış şemaları kullanılarak analiz ve kontrol edilmektedir.

Klasik kontrol daha katı yaklaşımlara sahip olduğundan yöntemleri arasında fazla çeşitlilik yoktur, temel birkaç yöntem barındırır. Modern kontrol ise oldukça çeşitli yöntemler ve farklı algoritmalar barındırmaktadır. Bunun önemli nedenlerinden biri de modern kontrolün bilgisayar hesaplamalarına daha uygun olması, bilgisayarlar sayesinde de farklı karmaşık yöntemlerin daha kolay

geliştirilebilmesidir. Klasik kontrolde ise analiz ve tasarım aşamasında kullanılan yöntemlerde hesaplamaların elle de yapılabilir olması gerekmektedir.

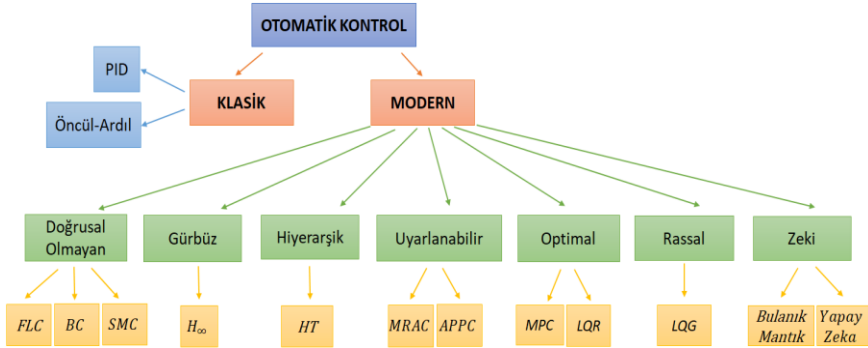
Klasik kontrol yöntemlerinden Oransal İntegral Türev (proportional-integral-derivative, PID) algoritması kolay tasarlanabilmeleri nedeniyle oldukça yaygındır. Sistem davranışının hızlı ve hassas şekilde izlenebilmesi en önemli üstünlüğüdür. PID kontrolde sürekli olarak bir hata değeri -yani amaçlanan durum ile mevcut durum arasındaki fark- hesaplanır ve sistemin kontrol girdisi ayarlanarak hatayı en aza düşürmesine çalışılır. PID kontrolörün amacı, sistemi istenilen değerde tutmak için çıkış sonucunu giriş ile karşılaştırarak aradaki hata değerini hesaplamak ve oransal-integral-türev katsayılarını kullanarak, bu üç bileşeni toplayıp sistemi kararlı hale getirmektir. PID'nin yanında öncül-ardıl (lead-lag) kontrol de klasik yöntemlerdendir. Klasik kontrolün araçlarını (Laplace dönüşümü, köklerin yer eğrisi gibi) benzer şekilde kullanan bu yöntem de sistem davranışının denetlenmesinde kullanılmaktadır.

Klasik kontrol yaklaşımları sadece doğrusal sistemlerin denetiminde kullanılabilirken modern kontrol yaklaşımı doğrusal olmayan sistemlerin denetimini de gerçekleştirebilir. Doğrusal olmayan dinamiklere ve matematiksel modellere sahip sistemlerin denetimi *doğrusal olmayan* kontrol olarak isimlendirilir. Bu yaklaşım, geleneksel doğrusal kontrol teorisinin sınırlarını aşarak daha karmaşık ve gerçek dünya sistemlerini modellemeye ve kontrol etmeye yönelik yöntemleri içerir. Birçok modern kontrol yönteminin de doğrusal olmayan kontrol yaklaşımı başlığı altında yer aldığı kabul edilebilir. Ancak bu kitap bölümünde, kendine özgü bir alan oluşturabilen yöntemler kendi içinde sınıflandırılarak farklı yaklaşımlar olarak tanımlanmıştır.

Otomatik kontrol amacıyla geliştirilmiş birçok yöntem mevcuttur. Bunların her birini diğerinden kesin sınırlarla ayırmak

bazen mümkün olmayabilir. Bir yöntem farklı yaklaşımları birlikte kullanabileceği gibi bir yaklaşım da diğer yaklaşımları içerebilir. Kontrol yaklaşımlarını ve yöntemlerini belirten bir şema Görsel 1’de verilmiştir. Burada örneğin zeki kontrol yaklaşımı uyarlanabilir kontrol başlığının bir alt dalı olarak da verilebilir. Diğer taraftan kayan kipli kontrol yöntemi gürbüz kontrol yaklaşımı altında veya doğrusal ikinci dereceden Gauss (linear–quadratic–Gaussian, LQG) kontrolcü optimal kontrol yaklaşımı altında verilebilir. Bu çalışmada yaklaşımlar sınıflandırılırken otomatik kontrol alan yazınında kendisine ait bir alan oluşturabilenler farklı başlıklarda sınıflandırılmıştır. Otomatik kontrol yöntemleri burada yapılan sınıflamanın aksine daha farklı başlıklar da içerebilir ve çok farklı kontrol yöntemleri de barındırabilir. Ancak burada her yaklaşım kapsamında sadece önemli görülen yöntemlere örnekler verilmiştir.

Görsel 1. Otomatik kontrol yöntemleri



FLC: Geri beslemeyle doğrusallaştırılarak (Feedback linearization) kontrol. BC: Geri adımlamalı (Backstepping) kontrol. SMC: Kayan kipli kontrol (Sliding mode control). H_{∞} : H-Sonsuz. HT: Hiyerarşik ağaç (Hierarchical tree). MRAC: Modele dayalı uyarlamalı kontrol (Model reference adaptive control). APPC: Uyarlamalı kutup yerleştirme (Adaptive pole placement). MPC: Model öngörülü kontrol (Model predictive control). LQR: İkinci dereceden doğrusal düzenleyici (linear quadratic regulator). LQG: Doğrusal ikinci dereceden Gauss (linear–quadratic–gaussian).

Doğrusal Olmayan Kontrol

Doğrusal olmayan kontrol, kontrol teorisi içinde doğrusal olmayan sistemlerin analizi ve yönetimiyle ilgilenen bir alandır. Doğrusal olmayan sistemler, giriş ve çıkışları arasında doğrusal ilişkiler kurulamayan sistemlerdir. Sistemlerin doğrusal olmayan etkiler içermesi, bu sistemlerin matematiksel olarak karmaşık olması klasik kontrol yöntemleriyle denetlenebilmelerine engel olmaktadır. Doğrusal olmayan kontrol, değişken koşullara ve sistemdeki değişikliklere daha esnek bir şekilde uyum sağlayabilir. Ancak, bu kontrol yöntemi aynı zamanda matematiksel ve hesaplama açısından daha karmaşıktır ve bazı durumlarda doğrusal kontrol yöntemlerine göre daha fazla hesaplama gücü gerektirebilir.

Doğrusal olmayan sistemlerin analizi, modellenmesi ve kontrol edilmesi için çeşitli yöntemler ve teknikler geliştirilmiştir. Modern kontrol yöntemlerinin birçoğu aslında doğrusal olmayan kontrol yöntemlerindendir. Ancak burada doğrusal olmayan yöntemler başlığı dışında sınıflandırılma nedeni, bunlarla yapılan çalışmaların alan yazınında önemli yer kaplamaları ve bu sayede alanda kendilerine özgü yer edinmiş olmalarıdır. Bununla birlikte doğrusal olmayan kontrol yaklaşımı başlığında önemli yöntemler olarak geri beslemeyle doğrusallaştırılarak kontrol (feedback linearization, FLC), geri adımlamalı kontrol (backstepping, BC), kayan kipli kontrol (sliding mode control, SMC) sayılabilir.

Kayan kipli kontrol yöntemi belirsizliklerle başa çıkabilme özelliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, değişken yapılı kontrol yöntemi özelliğine sahip modern kontrol yöntemlerinden biridir (Edwards ve Spurgeon 1998). Karar vermede kullanılmak üzere belirlenmiş kurallar ile geri besleme yapısını birlikte kullanır. Kontrol kuralı, daha önceden belirlenen kurallara göre kontrol işlemi esnasında sistemin durumuna bağlı olarak değişir. Böylece sistemin bir anahtarlama bölgesi oluşur. Durum geri besleme yapısı sayesinde belirsizliklerin etkisini yok

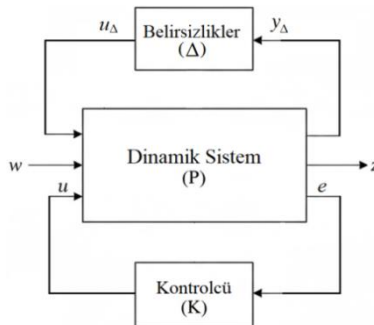
etmeyi amaçlayan ek bir anahtarlama ifadesi ile kullanılır (Utkin 1978). Kayan kipli kontrol yöntemi, kontrol edilen dinamik sistemi kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzeye yönlendirir ve bu yüzey üzerinde belirli aralıkta tutarak denge noktasına gelmeyi sağlayan bir kontrol gerçekleştirir (Mayetin 2013).

Gürbüz Kontrol

Kontrol algoritmasındaki hatalar ya da algılayıcılardaki parametre değerlerindeki belirsizlikleri de göz önüne alarak tasarlanmış ve performansın en kötü koşulda bile en iyi değerinden nispeten az miktarda düştüğü otomatik kontrol algoritmasıdır. *Dayanıklı* veya *sağlam* kontrol diye de isimlendirilir. Modern kontrol yöntemleri içinde önemli bir yeri olan gürbüz kontrol, birden çok giriş ve çıkış değişkenini içerebilme kabiliyeti, doğrusallık şartı olmaması ve hem zamandan bağımsız hem de zamana bağlı olabilmesi gibi niteliklerinden dolayı daha karmaşık sistemlere uygulanabilmekte ve daha doğru sonuçlar verebilmektedir.

Alan yazını gürbüz kontrol kuramına yönelik farklı metotlar içermekle birlikte bunlar arasında H_∞ kontrol yöntemi öne çıkmaktadır. H_∞ kontrolcüler, genellikle Lyapunov fonksiyonu kullanılarak tasarlanmaktadır. Temel H_∞ kontrolcü yapısı Görsel 2’de verilen öbek şeması ile ifade edilebilir.

Görsel 2. Temel H_∞ kontrolcü yapısı



Burada kontrol edilen sistemi P öbeği göstermektedir. Sisteme uygulanan harici girişi veya hedeflenen değeri w ve kontrol girişini u ifade etmektedir. Gerçekleşen veya ölçülen z çıkışı ile hedeflenen değer arasındaki hata e olarak isimlendirilir. K kontrolcüsü e hatasına göre sistem için u girişini üretir. Sistemdeki belirsizliklerin nedeni ise sistemi oluşturan alt sistemlerin modellenmiş yapısından kaynaklanabileceği gibi, modeli etkilediği halde etkisi kestirilemeyen bazı dinamiklerden de kaynaklanabilir. Bu sistemde belirsizlikler (Δ) giriş ve çıkış için ele alınmıştır. Kontrol sisteminin amacı istenen çıkışın elde edilmesini sağlayacak u girişinin ayarlanmasıdır.

Gülbüz kontrolcüler klasik kontrolcülere göre kontrol edilecek sistemi daha geniş bir aralıkta ve daha büyük genlikli bozucu girişlere maruz kalmaları durumunda dahi yüksek performansla kontrol edebilmektedir. Geliştirilen tasarım araçları sayesinde ise kontrolcü tasarımı yapmak sadece ağırlık fonksiyonlarının belirlenmesine kadar indirgenmiş ve hazır yazılımlar kullanılarak kontrolcü matrislerinin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir (Özkan 2009).

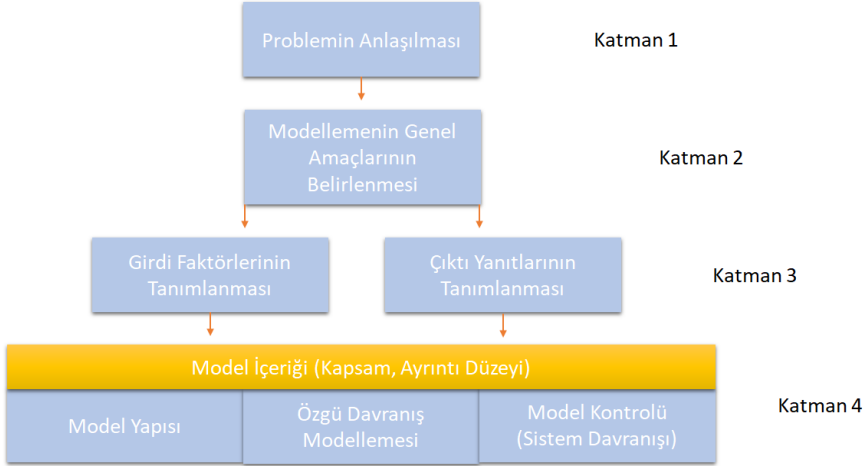
Hiyerarşik Kontrol

Hiyerarşik kontrol yaklaşımı, farklı alt sistem modelleri ile bunların kontrol algoritmalarının hiyerarşik bir *ağaç yapısında* düzenlenerek yönetildiği bir kontrol yaklaşımıdır. Hiyerarşik kontrol, kontrol görevlerini zaman, kapasite ve kapsam bakımından farklı seviyelere ayıran bir yapıdır. Bu yapı, özellikle çok giriş çok çıkışlı sistemlerin ve yüksek mertebeli sistemlerin denetlenmesini sağlar.

Hiyerarşik kontrol sistemleri, karmaşık bir sistemi yönetmek için kontrol görevlerini farklı katmanlara bölen bir mimaridir. Hiyerarşik kontrol yaklaşımını genel hatlarıyla sunan

örnek bir katman mimarisi ile her katmanda gerçekleştirilen faaliyetlerin ağaç yapısı Görsel 3’te sunulmuştur.

Görsel 3. Örnek bir hiyerarşik kontrol mimarisi



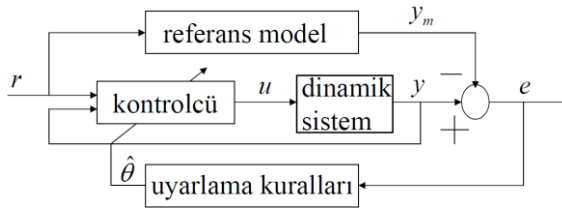
Tek bir kontrolcüden ziyade hiyerarşik kontrol yaklaşımında sistem bir emir komuta zinciriyle çalışır. Bu yaklaşımda alt katmanların kendine özgü görevleri, hedefleri ve ölçümleri bulunur. Bunların faaliyetleri, genellikle kararlarını geçersiz kılmayan üst katmanlar tarafından planlanır ve yönetilir. Farklı klasik ve modern kontrol yöntemleri de alt sistemlerde kullanılarak hiyerarşik kontrol yaklaşımını uygulayan sistemler oluşturulabilir. Bu yaklaşımla insansız bir hava aracı uçuş kontrolü için tasarlanan PID kontrolcü için (Oktay vd. 2017) kaynağı incelenebilir.

Uyarlanabilir Kontrol

Uyarlanabilir kontrol sistemi, kontrol ettiği süreçteki değişimlere göre kendi kontrol parametrelerini otomatik olarak uyarlayan sistem olarak tanımlanır (Gülyaz 1998). Bu uyarılama, sürecin çalışma koşullarının ya da çevre koşullarının değişmesine göre kontrol sistemindeki ayarların da sürekli olarak güncellenmesiyle gerçekleşir.

Uyarlanabilir kontrol yöntemi diğer yöntemlerden farklı olarak; ilk olarak, değişken çevresel koşullara, sistemdeki belirsizliklere veya parametre değişimlerine uyum sağlama yeteneğiyle öne çıkar (Lawrence vd. 2022). Bu yönleriyle sistem performansının istikrarını ve etkinliğini artırabilir. Ayrıca kontrol algoritmaları, hassasiyetlerini ve uyarlama hızlarını genellikle ayarlayabilir. Bu da istenen performans kriterlerine daha iyi uyumu sağlayabilir. Uyarlamalı kontrol yaklaşımının önemli bir yöntemi olan modele dayalı uyarlamalı kontrolün bir hava aracında uygulanmasına Durukan ve Çelik (2025) tarafından yapılan çalışmadan ulaşılabilir. Modele dayalı uyarlamalı kontrol yönteminin örnek bir öbek şeması Görsel 4 ile verilmiştir.

Görsel 4 Modele dayalı uyarlamalı kontrol öbek şeması



Doğrusal olmayan sistemlerin doğrusal modelleri ile yapılan çalışmalarda modelden kaynaklı hatalar nedeniyle sistem kontrolü de yüksek performansla yapılamayabilir. Uçuştaki hava durumu değişimleri gibi ortam koşullarındaki belirsizlikler hava uzay araçlarının uçuş kontrolünde uyarlanabilir kontrolün kullanılmasını gerektirir. Gerçek uçuş esnasında sistem parametreleri değişen çevreyle değişecektir. Model referanslı uyarlamalı kontrol, belirsiz parametrelerden kaynaklanan yönelim dengesizliğini optimize edebilir (Lavretsky 2008; Lavretsky ve Hovakimyan 2004). Uyarlanabilir kontrolün bir dalı olan MRAC yöntemi, önceden tanımlanmış bir referans modele dayanarak sistem parametrelerini ayarlayarak istenen performans hedeflerine verimli bir şekilde

ulaşmaya odaklanır ve bunu çoğu zaman hatayı hızlı bir şekilde dşşrerek başarır.

Optimal Kontrol

Optimal kontrol, bir sistemin belirli bir lşte göre en iyi performansı göstermesini sağlamak için matematiksel bir yaklaşımı ifade eder. Bu yaklaşım, genellikle bir sistemin davranışını en iyi şekilde kontrol etmek için en uygun stratejileri bulma sşrecini kapsar. Optimal kontrol, genellikle belirli bir hedefe ulaşmak veya belirli bir performans lştne göre optimize etmek amacıyla sistem davranışını kontrol etmek için kullanılır. Amaçlar ise enerji tasarrufu, minimum maliyet, maksimum verimlilik gibi çeşitli hedeflere yönelik olabilir.

Optimal kontrol problemlerini çözmek için çeşitli algoritmalar ve yöntemler bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanı, dinamik programlama ve durumlar arası geçiş için mümkün olan en iyi kontrolü bulmayı amaçlayan Pontryagin maksimum prensibi tekniklerdir. Dinamik programlama, optimal kontrol probleminin çözümünde kullanılan etkili bir algoritma türüdür (Liu vd. 2017). Bu algoritma, büyük problemleri daha küçük ve daha yönetilebilir parçalara bölerek çözüm üretir, her bölümün çözümünden toplam çözüme gidilir.

Pontryagin maksimum prensibi de belirli bir kontrol problemi için en iyi kontrol stratejisini bulmaya yönelik bir ereve sunar (Kopp 1962). Yani kontrol edilen sistemin hareket denklemlerini, belirli bir performans lşt altında optimize eden kontrol stratejilerini belirlemek için kullanılır. Bu algoritmaların uygulanması optimal kontrol probleminin yapısına, boyutuna ve karmaşıklığına bağlıdır. Bazı durumlarda, özellikle büyük ölçekli veya karmaşık sistemler için diğer sayısal çözümlerle birlikte kullanılmaları daha işlevsel olabilir.

Optimal kontrol yaklaşımının en yaygın kullanılan yöntemleri model öngörülü kontrol ve ikinci dereceden doğrusal düzenleyicidir. İkinci dereceden doğrusal düzenleyiciler (linear quadratic regölatör, LQR) çoklu giriş ve çoklu çıkışa sahip sistemlerde sunmuş oldukları kararlılık ve güröltölere karşı koyma yetenekleri ile öne çıkmaktadırlar (Atalay 2017). Bu yöntemde belirlenen bir maliyet fonksiyonunun değeri en düşük değerde tutan optimal bir kontrol tasarımının elde edilmesine çalışılır. Kontrol girişı, belirli bir matrisin yanı sıra pozitif olan R matrisi tarafından çözümlenirken, sistemin durumları hem negatif olmayan hem de belirli bir matris olan Q matrisi tarafından çözümlenir. Sistemin durum uzay gösterimi cebirsel Riccati denklemleri çözümlenerek optimal bir kontrol girişı elde edilir. Bir LQR'in optimizasyon sürecinde, iki önemli unsur Q ve R matrisleridir. R girdi ağırlık matrisi ve Q durum vektörü ağırlık matrisi, maliyet fonksiyonun parametreleridir. Sistem performansları, bu matrislerin elemanlarının nasıl oluşturulduğundan önemli ölçüde etkilenir.

Model öngörülü kontrol (model predictive control, MPC) ise belirtilen kısıtlamaları karşılarken gelecekteki çıktıları hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılan bir geribildirim algoritmasıdır. MPC hesaplamaları, yapılan ölçümlere ve çıktıların ilerideki değeriinin tahminlerine dayanmaktadır. Model öngörülü kontrol, hesaplanan kontrol girdisi üzerinde işlem yapar ve ardından geri bildirim ile optimize edilmiş tahminleri yeniden hesaplar. Yani MPC yapılan ölçümler için belirlenen ufuk dahilinde yinelemeli, model tabanlı, öngörülü, optimal ve geri bildirim temelli bir kontrol yöntemidir (Çelik, Oktay, ve Türkmen 2016). MPC bu yönleriyle LQR'dan temel farklılıklara sahiptir. MPC sistemi uzaklaşan bir zaman penceresinde (ufukta) optimize ederken LQR sabit bir zaman penceresinde optimize eder. MPC'de yeni bir çözüm önerisi için oldukça sık ve yenilemeli hesaplama yapılırken LQR da ise tek çözüm kullanılır.

Rassal Kontrol

Rassal (stokastik) kontrol yaklaşımı, belirli bir süreçteki belirsizlikleri ve rastlantısal değişkenleri analiz ederek bir sistemi veya süreci kontrol etmek için kullanılan bir yöntemdir. Özellikle, sürecin rasgele değişkenlerinin nasıl çalıştığını anlamak ve bu değişkenleri kontrol altında tutmak için rassal yöntemler kullanılır. Bu yöntem, sürecin rassal olarak izlenmesini, verilerin analiz edilmesini ve belirli kontrol stratejilerinin uygulanmasını içerir. Rassal kontrol, diğer kontrol yöntemlerinden bazı farklılıklar taşır. Rassal kontrol, belirsizliklerin olduğu ortamlarda etkili bir şekilde çalışabilir. Gerçek dünyadaki birçok durumda, gelecekle ilgili kesin bilgilere sahip olunamaz ve bu durumlarda rassal kontrol, belirsizlikleri modeller ve hesaba katarak daha gerçekçi kararlar alınmasına yardımcı olabilir.

Rassal kontrol yaklaşımının en önemli temsilcisi doğrusal ikinci dereceden Gauss (linear–quadratic–gaussian, LQG) yöntemidir. LQR çözümüne ilave olarak sistemi etkileyen gürültüyü de ele alır. Sistemin durumlarının doğrudan ölçülemediği ve gürültülü ölçümlerin yapıldığı durumlar için çözüme yakınsamayı sağlar (Lee vd. 2011). LQR kontrolü, ikinci dereceden durum ve kontrol maliyetleri kullanılarak doğrusal sistemlerin en uygun kontrolü için kullanılırken, LQG kontrolü, ikinci dereceden durum ve kontrol maliyetleri kullanılarak ek Gauss gürültüsüne sahip doğrusal sistemlerin en uygun kontrolü için kullanılır. LQR ve LQG kontrolü, ele aldıkları problemler nedeniyle farklı algoritmalardır. Bu bağlamda, LQG kontrolcülerini, gürültünün de hesaplara dahil edildiği gerçekçi sonuçlar sunmaktadır.

Zeki Kontrol

Mevcut kontrol yöntemlerinin büyük bir bölümü, kontrol edilecek sistemin modeline ihtiyaç duyar ve kontrolü modele dayanarak yapar. Bu durum da modelden kaynaklanan belirsizlik

veya hatalarla başa çıkılmasında zorluklara neden olur. Kontrol sistemlerinin modele bağımlı olmalarının aksiye canlılar herhangi bir modele dayanarak otomatik kontrol yapmamaktadırlar. Sahip oldukları biyolojik yapılar sayesinde kontrolü, deneme-yanılmaya dayanarak öğrenmektedirler. Biyolojik sinir sistemine benzetilerek makine öğrenmesi ve yapay zekâ geliştirilmiştir. Ancak yapay zeka; yapay sinir ağları, makine öğrenmesi, derin öğrenme, bulanık mantık, doğadan esinlenilerek geliştirilen optimizasyon algoritmaları gibi yöntemleri kapsayan oldukça geniş bir çalışma alanıdır. Bu alanda kontrol amacıyla kullanılabilecek yöntemler arasında ise bulanık mantık ve makine öğrenmesi yöntemleri bulunmaktadır. Derin öğrenmenin kullanıldığı bir yapay zekâ dalı olan makine öğrenmesi, diğer kontrol yöntemlerinin aksine dinamik modele ihtiyaç duymadan, biyolojik sinir sistemine benzer şekilde, kontrol yapabilmektedir.

Makine öğrenmesi alanı da oldukça geniş olmakla birlikte, yapılan çalışmalar diğer öğrenme yaklaşımlarına nispetle takviyeli öğrenmenin uçuş kontrolünde daha elverişli bir yöntem olduğunu ve yeterli performansı sağladığını göstermiştir (Clarke ve Hwang 2020; Gu vd. 2016). Takviyeli öğrenme algoritmalarından hava aracı dinamik modeline olan bağımlılığı ortadan kaldırarak modelden bağımsız kontrol gerçekleştirebilen algoritmalar olarak deep deterministic policy gradient (DDPG), trust region policy optimization (TRPO) ve proximal policy optimization (PPO) yöntemlerinin öne çıktığı görülmektedir.

Yapay zeka alanı içerisinde farklı biyolojik/doğa varlıklarının davranışı veya zekası örnek alınarak geliştirilmiş optimizasyon algoritmaları da yer edinmektedir. Oldukça geniş bir hacme ulaşan bu çalışmalar, yüzlerle ifade edilebilecek farklı optimizasyon algoritmalarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Ancak bu algoritmalar otomatik kontrolcülere çeşitli problemlerin

çözümünde oldukça yardımcı olabilirken kendi başlarına bir kontrolcü niteliğine kavuşmuş değillerdir.

Optimizasyon algoritmalarının aksine bulanık mantık ise otomatik kontrolü kendi başına ve destek almadan gerçekleştirebilir. Bu kontrol yöntemi, belirsizlik içeren sistemlerin yönetimi için kullanılır. Bulanık mantık ve bulanık kümeler kullanılarak çalışır. Bulanık mantık, bir bilgisayar sisteminin belirsizlikle akıl yürütmesini sağlayan bir hesaplama alanıdır (Castillo ve Melin 2012). Bulanık kümeler, üyelik derecesinin 0 ile 1 arasında herhangi bir değer olmasına izin vererek geleneksel küme kavramını genelleştirir. Temel olarak, bulanık mantık sistemi üç ana birimden oluşur. Bunlar bulanıklaştırma birimi, bulanık çıkarım birimi ve bulanıklık çözücüdür. Bulanıklaştırma birimi, kesin bir girdiyi bazı bulanık kümelere dönüştürür. Bulanık çıkarım birimi, bulanık çıktıyı elde etmek için kural tabanından bulanık Eğer-İse kurallarını kullanır. Bulanık terimlerle ifade edilen çıktı, bulanıklaştırma çözücü tarafından tekrar kesin bir değere dönüştürülür (Kurnaz, Cetin, ve Kaynak 2009). Bu birimlerin kullanılmasıyla bulanık kontrol sistemlerinin, belirsizlik ve doğrusal olmayan davranış dahil olmak üzere süreç karmaşıklığının yüksek olduğu ve kesin matematiksel modellerin olmadığı durumlarla başa çıkması sağlanır.

Sonuç

Bu kitap bölümünde hava ve uzay araçlarında uçuş kontrollü amacıyla kullanılabilecek modern kontrol yöntemlerinin genel bir çerçevesi sunulmuştur. Modern kontrol alanında yapılan çalışmalar, kullandıkları yaklaşımlara göre sınıflandırılmıştır. Her yaklaşımın önemli temsilcileri olarak sayılabilecek kontrol yöntemleri de bu sınıf başlıkları altında örneklendirilmiştir.

Modern kontrol gün geçtikçe gelişen ve çeşitlenen yaklaşımlara sahiptir. Bu yaklaşımları doğrusal olmayan, gürbüz,

hiyerarşik, uyarlanabilir, optimal, rassal ve zeki başlıkları ile sınıflandırmak mümkün olmuştur. Bu sınıflandırmanın alan yazını dikkate alınarak yapıldığı göz ardı edilmemelidir. Nitekim bu yaklaşımların farklı yönleriyle birbirini kapsamaması veya birbiriyle kesişmesi mümkün olduğundan kesin hatlarla birbirlerinden ayırt edilmeleri her yönüyle mümkün olmayabilir. Örneğin modern kontrol yaklaşımlarının birçoğu doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü amacıyla kullanıldığından *doğrusal olmayan kontrol* yaklaşımı sınıfı altında da sıralanabilirler. Ancak alan yazını derlendiğinde özgün bir alan oluşturabildiği görülen yaklaşımlara bir sınıf olarak yer verilmiştir.

Bu yaklaşımlardan *gürbüz* kontrolde dinamik sistemdeki belirsizliklere veya dışsal etkilere karşı dayanıklı bir kontrol stratejisi geliştirme amaçlanır. Bu yaklaşımda doğrudan belirsizliklerle ilgilenilir. *Hiyerarşik* kontrol yaklaşımı, karmaşık sistemlerin yönetilmesi için yapılandırılmış bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda kontrol sistemleri birden fazla seviyeye veya katmana bölünerek her katmanın belirli görevleri ve hedefleri üstlenmesi sağlanır. Yüksek katmanlar genel sistem gözetimini yaparken, düşük katmanlar daha ince detayları ve işlevleri gerçekleştirir.

Uyarlanabilir kontrol yaklaşımı; kontrolcünün değişen veya başlangıçta belirsiz olan dinamik sistem parametrelerine göre uyum sağlayabildiği otomatik kontrol yaklaşımıdır. Örneğin bir hava veya uzay aracının uçuşu esnasında yakıt tüketimi veya yük bırakma gibi nedenlerle değişen kütlesine göre kontrolün de uyarlanmasını sağlayabilir. Sürekli ve otomatik olarak dinamik sistemin karakteristikleri (transfer fonksiyonu veya durum denklemleri gibi) ölçülüp istenen dinamik karakteristiklerle kıyaslanarak aradaki farka göre kontrol parametreleri ayarlanır. Sistem dinamikleri veya çalışma koşulları değiştikçe kontrol parametreleri de otomatik olarak bunlara uyarlanır.

Optimal kontrol yaklaşımda bir amaç fonksiyonu belirlenerek bu fonksiyonun en büyük veya en küçük değerini elde etmek için en iyi kontrol stratejileri belirlenir. Kontrol problemi, durum ve kontrol değişkenlerini içeren bir amaç fonksiyonunu içerir. Bu şekilde sistemin kaynaklarını en verimli şekilde kullanmasına yardımcı olur. *Rassal* (stokastik) kontrol, belirsiz veya rastgele faktörlerin bulunduğu sistemlerle ilgilenen bir kontrol yaklaşımıdır. Olasılık hesaplarıyla sistem dinamiklerinin sahip oldukları veya sistemi etkileyen dış bozucuların neden olduğu belirsizlikler tahmin edilir.

Zeki kontrol yaklaşımı ise diğer geleneksel modern kontrol yöntemlerine göre daha karmaşık ve uyarlanabilir yaklaşımlar kullanarak sistemlerin yönetilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda çeşitli yapay zekâ teknikleri kullanılarak dinamik sistemlerin daha iyi performans göstermesi, enerji verimliliğinin artırılması ve çeşitli koşullara uyum sağlanması amaçlanır. Zeki kontrol, birçok farklı uygulama alanında kullanılır ve özellikle karmaşık veya değişken sistemler için faydalıdır.

Kaynakça

- Atalay, Yusuf. 2017. “Quadrotor insansız hava aracı için kontrol sistemi tasarımı”. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir.
- Castillo, Oscar, ve Patricia Melin. 2012. *Soft computing for control of non-linear dynamical systems*. C. 63. Physica.
- Clarke, Shanelle G., ve Inseok Hwang. 2020. “Deep Reinforcement Learning Control for Aerobatic Maneuvering of Agile Fixed-Wing Aircraft”. içinde *AIAA Scitech 2020 Forum*. Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Çelik, Harun, Tuğrul Oktay, ve İlke Türkmen. 2016. “İnsansız küçük bir hava aracının (ZANKA-I) farklı türbülans ortamlarında model öngörülü kontrolü ve gürbüzlük testi”. *Journal of Aeronautics & Space Technologies/Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi* 9(1).
- Durukan, İdil Sena, ve Harun Çelik. 2025. “Model Reference Adaptive Attitude Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle”. *Applied and Computational Engineering* 136(1):1-6. doi:10.54254/2755-2721/2025.20978.
- Edwards, Christopher, ve Sarah K. Spurgeon. 1998. *Sliding mode control: theory and applications*. CRC press.
- Gu, Shixiang, Timothy Lillicrap, Ilya Sutskever, ve Sergey Levine. 2016. “Continuous deep q-learning with model-based acceleration”. Ss. 2829-38 içinde *International conference on machine learning*. PMLR.
- Gülyaz, Erdoğan. 1998. “Uyarlamalı Model Kontrol”. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kopp, Richard E. 1962. "Pontryagin maximum principle". Ss. 255-79 içinde *Mathematics in Science and Engineering*. C. 5. Elsevier.
- Kurnaz, Sefer, Omer Cetin, ve Okay Kaynak. 2009. "Fuzzy logic based approach to design of flight control and navigation tasks for autonomous unmanned aerial vehicles". *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 54(1):229-44.
- Lavretsky, Eugene. 2008. "Adaptive control: Introduction, overview, and applications". içinde *Lecture notes from IEEE Robust and Adaptive Control Workshop*. C. 208.
- Lavretsky, Eugene, ve Naira Hovakimyan. 2004. "Positive/spl mu/-modification for stable adaptation in the presence of input constraints". Ss. 2545-50 içinde *Proceedings of the 2004 American Control Conference*. C. 3. IEEE.
- Lawrence, Nathan P., Michael G. Forbes, Philip D. Loewen, Daniel G. McClement, Johan U. Backström, ve R. Bhushan Gopaluni. 2022. "Deep reinforcement learning with shallow controllers: An experimental application to PID tuning". *Control Engineering Practice* 121:105046. doi:10.1016/j.conengprac.2021.105046.
- Lee, C. S., W. L. Chan, S. S. Jan, ve F. B. Hsiao. 2011. "A linear-quadratic-Gaussian approach for automatic flight control of fixed-wing unmanned air vehicles". *The Aeronautical Journal* 115(1163):29-41.
- Liu, Derong, Qinglai Wei, Ding Wang, Xiong Yang, ve Hongliang Li. 2017. *Adaptive Dynamic Programming with Applications in Optimal Control*. Advances in Industrial Control. Cham: Springer International Publishing.
- Mayetin, Umut. 2013. "İki serbestlik dereceli düzlemsel robotun farklı kontrolörlerle yörünge kontrolünün

gerçekleştirilmesi". Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Oktaý, Tuğrul, Metin Uzun, Harun Çelik, ve Mehmet Konar. 2017. "PID based hierarchical autonomous system performance maximization of a hybrid unmanned aerial vehicle (HUAV)". *Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering* 18(3):554-62. doi:10.18038/aubtda.322137.

Özkan, Bülent. 2009. "Mekatronik sistemlerde uygulanan belli başlı kontrol yöntemleri". *TÜBAV Bilim Dergisi* 2(3):302-16.

Utkin, Vadim Ivanovich. 1978. "Sliding modes and their applications in variable structure systems". *Mir, Moscow*.

BÖLÜM 5

Kısmi Yeniden Yapılandırmanın FPGA’de Tasarım Akışı

Bahadır ÖZKILBAÇ¹

Giriş

Alan programlanabilir kapı dizileri (Field Programmable Gate Arrays-FPGA) paralel çalışma, tekrar programlanabilme, hızlı tasarım süresi ve tasarım esnekliği gibi avantajlarından dolayı günümüz endüstrisinde dijital devre tasarım uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Negi vd., 2021; Boutros vd., 2025). Kısmi yeniden yapılandırma, çalışma esnasında donanımın güncellenmesine imkân tanıyarak FPGA’in esnek yapısının daha verimli şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Chekuri vd., 2025). FPGA’de tasarlanan donanım, kısmi yeniden yapılandırma sayesinde çalışma esnasında dinamik olarak değiştirilebilmektedir. Klasik yöntemde tasarım güncellenecekse tüm FPGA yeniden programlanır ve sistemin durması gerekmektedir. Kısmi yeniden yapılandırmada ise FPGA’i bölgelere ayırmaktadır. Yalnızca güncellenecek bölge yeniden yapılandırılırken diğer bölgeler ise çalışmaya devam etmektedir. Bu sayede sistem çalışırken donanım

¹* Arş. Gör. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1687-0700

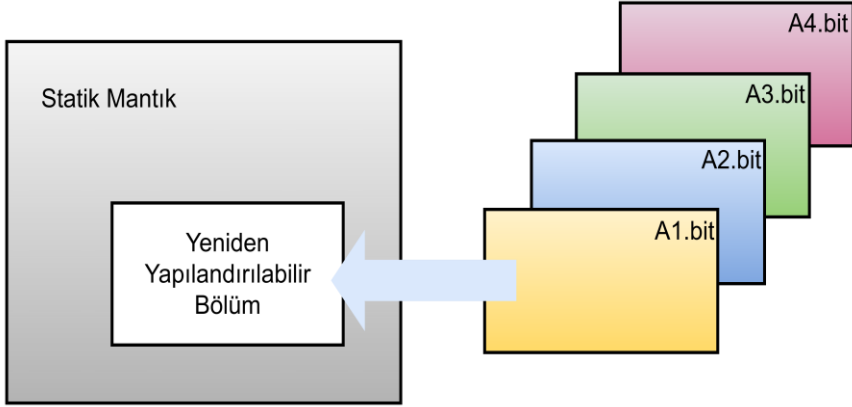
fonksiyonu değiştirilebilmektedir. Bu yüzden kısmi yeniden yapılandırma ile uygulama sürekliliği korunmaktadır.

Kısmi yeniden yapılandırma, FPGA tabanlı dijital devre tasarımında esneklik ve kaynak verimliliği açısından önemli avantajlara sahiptir (Kornaros vd., 2024). Aynı FPGA üzerinde farklı zamanlarda farklı donanım modülleri alıştırılabil-diği için her işlev için ayrı kaynak ve alan ayırmaya gerek kalmamaktadır. FPGA’ın kaynakları ve alanı daha etkin kullanıldığı için verimlilik artmaktadır. Gerekli durumlarda modüller değiştirildiğinden performans hedeflerine göre hızlıca uyarlama yapılabil-mektedir. Ayrıca sistemin tamamını yeniden başlatmadan güncelleme yapılabil-diği için bekleme süresi azalmaktadır. Kısmi yeniden yapılandırma ile bakım ve güncelleme süreçleri daha yönetilebilir hale gelmektedir. Böylece uzun vadede maliyet tasarrufu da sağlanmaktadır. Bu çalışmada kısmi yeniden yapılandırma yönteminin ne olduğu, neden önemli olduğu ve bu tekniğin FPGA tabanlı sistemlere sağladığı avantajlar ve kısmi yeniden yapılandırmanın FPGA’de tasarım akışı ele alınmaktadır.

1. FPGA’de Kısmi Yeniden Yapılandırma

Kısmi yeniden yapılandırma modern FPGA’lerin sahip olduğu bir özelliktir. Tasarımın yalnızca belirli bir bölümünün sistem çalışmaya devam ederken çalışma zamanında dinamik olarak değiştirilmesine olanak tanımaktadır (Kao, 2005). Yeniden yapılandırma sürecinde FPGA zerindeki tasarımın geri kalan kısmı, yani statik mantık herhangi bir kesintiye uğramadan normal işlevini sürdürmeye devam etmektedir. şekil 1’de kısmi yeniden yapılandırmaya örnek verilmiştir (Lie vd., 2009).

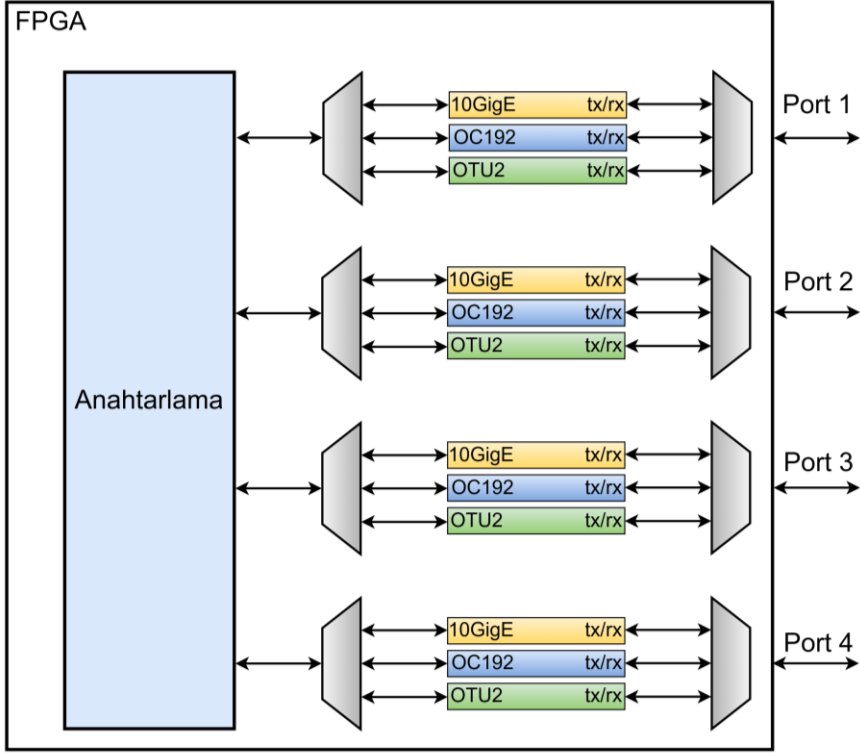
Şekil 1 Kısmi Yeniden Yapılandırma Örneği



Şekil 1’den görüldüğü üzere sistem statik mantık ve yeniden yapılandırılabilir bölüm olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Başlangıçta A1.bit dosyası ile yapılandırılmış olan yeniden yapılandırılabilir bölüm, sistem durdurulmadan A2.bit, A3.bit veya A4.bit dosyaları ile yeniden yapılandırılabilmektedir. Bu değişim sırasında statik mantık etkilenmeden çalışmasına devam etmektedir. A1.bit, A2.bit, A3.bit ve A4.bit olarak adlandırılan bu yapılandırma dosyaları, yalnızca yeniden yapılandırılabilir bölgeyi tanımladıkları için kısmi bit akışları (partial bitstreams) olarak adlandırılmaktadır.

Kısmi yeniden yapılandırma aynı anda çalışmayan işlevlere sahip sistemlerde alan tasarrufu sağlamaktadır. Bu tür sistemlerde belirli bir anda yalnızca tek bir işlevin aktif olması yeterlidir. Örneğin Şekil 2’deki tasarımda başlangıçta üç farklı işlev arasından seçim yapılmasını sağlayan çoklayıcılar (multiplexer) bulunmaktadır (Xilinx, 2018). ASIC tarzı bu yaklaşımda her ne kadar donanımda üç farklı işlev tanımlı olsa da aynı anda yalnızca bu işlevlerden biri aktif olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla tüm işlevler için donanımın sürekli olarak FPGA üzerinde yer kaplaması alanın verimsiz bir şekilde kullanımına yol açmaktadır.

Şekil 2 Kısmi Yeniden Yapılandırmanın Kullanılmadığı Ağ Anahtarı Devresi



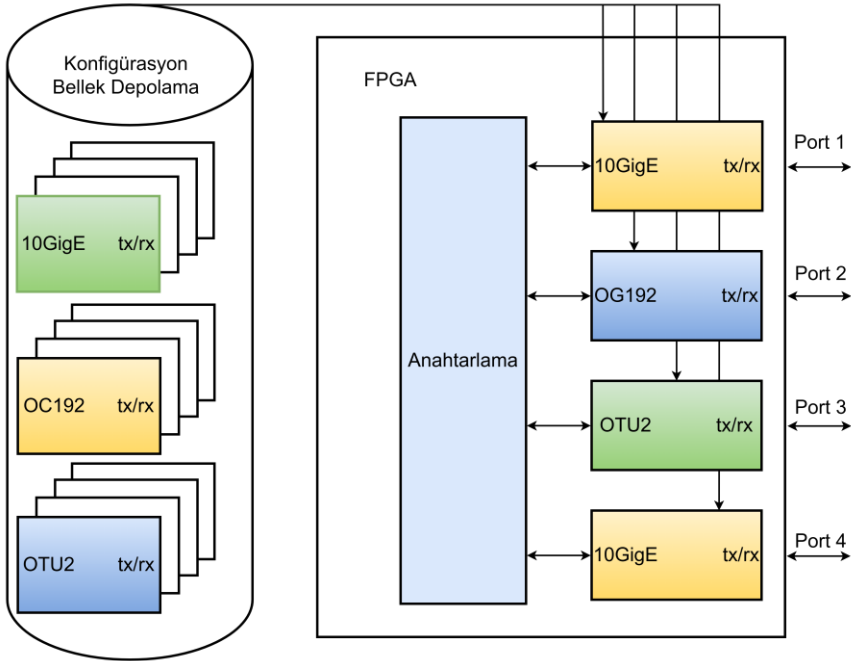
Şekil 2, kısmi yeniden yapılandırmanın kullanılmadığı geleneksel bir ağ anahtarı tasarımını göstermektedir. Kısmi yeniden yapılandırmanın kullanılmadığı bu devrede FPGA içerisindeki anahtarlama devresi ile her bir port için desteklenen haberleşme protokolleri donanımda eşzamanlı olarak yer almaktadır.

Şekilde görüldüğü üzere her port için 10 Gigabit Ethernet (10GigE), OC192 ve OTU2 protokollerine ait alıcı-verici (tx/rx) bloklarının tamamı FPGA içerisinde sürekli olarak bulunmaktadır. Ancak bu protokoller aynı anda birlikte çalışmamaktadır. Her bir port için belirli bir anda yalnızca tek bir protokol aktif hâle getirilmektedir. Protokol seçimi çoklayıcılar aracılığıyla

yapılmaktadır. Aktif olmayan modüller pasif durumda beklemektedir.

Bu devrede kısmi yeniden yapılandırma kullanılmadığı için aynı anda kullanılmayan donanım blokları FPGA üzerinde yer kaplamaktadır. Bu yüzden alan verimliliği düşmektedir. Ayrıca sürekli olarak ihtiyaç duyulmayan modüllerin donanımda bulunması güç tüketimini artırmakta, tasarımın ölçeklenebilirliğini sınırlayabilmektedir. Dolayısıyla kısmi yeniden yapılandırmanın kullanılmadığı bu devre esneklik ve kaynak kullanımı açısından dezavantaja sahiptir. Şekil 3’te ise kısmi yeniden yapılandırmanın kullanıldığı ağ anahtarı devresi verilmiştir.

Şekil 3 Kısmi Yeniden Yapılandırma Kullanılarak Tasarlanan Ağ Anahtarı Devresi



Şekil 3'ten görüldüğü üzere kısmi yeniden yapılandırma, ihtiyaç duyulan işlevleri dinamik olarak yeniden yapılandırarak Şekil 2'deki devrenin verimsizliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu yaklaşımın bir diğer önemli avantajı ise, örneğin Port 1 yeniden yapılandırılırken diğer portların (Port 2, Port 3 ve Port 4) bu süreçten etkilenmeden çalışmaya devam edebilmesidir. Böylece sistemin genel işleyişi kesintiye uğramamaktadır.

Bu ağ anahtarı devresi için kısmi yeniden yapılandırmanın gerekliliği ve sağladığı kazanımlar tartışılabilir. Port 1 yeniden yapılandırılırken diğer portların çalışmasının zorunlu olmadığı durumlarda FPGA'in tamamının yeniden yapılandırılması da teorik olarak mümkündür. FPGA'lerin yeniden programlanabilir yapısı, ASIC tabanlı çözümlere kıyasla zaten belirli bir esneklik ve alan avantajı sunmaktadır. Ancak kısmi yeniden yapılandırma, bu temel avantajların ötesine geçerek yalnızca ilgili donanım bölgesinin güncellenmesini sağlamaktadır. Böylece daha küçük boyutlu bit akışlarının yüklenmesi sayesinde yeniden yapılandırma süresi kısaltmakta, sistemin tepki süresi iyileştirilmektedir. Bu yönüyle kısmi yeniden yapılandırma, tüm çipin yeniden programlanmasına dayalı yaklaşımlara kıyasla zaman verimliliği açısından üstünlük sağlamaktadır. Kısmi yeniden yapılandırma fark tabanlı ve modül tabanlı olmak üzere iki çeşittir (Sasamal vd., 2011).

1.1.Fark Tabanlı Kısmi Yeniden Yapılandırma

Fark tabanlı kısmi yeniden yapılandırma, mantık yapısında yapılan değişikliklerin çok az olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Kshirsagar vd., 2011). Bu yöntemde FPGA'in tamamını kapsayan bit akışı yerine, yalnızca yapılan değişiklikleri içeren küçük bir bit akışı cihaza aktarılır. Tüm bit akışına kıyasla bu dosyanın boyutu oldukça küçük olduğundan aynı süre içerisinde daha fazla yeniden yapılandırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu durum

yapılan değişikliklerin sistem davranışı üzerinde her zaman büyük etkiler oluşturmayaabileceği anlamına da gelmektedir.

Fark tabanlı kısmi yeniden yapılandırma ile eş zamanlı olarak veri aktarımının devam etmesi gereken senaryolarda oldukça kullanışlıdır. Örneğin giriş/çıkış veri akışı sürerken, bit akışının bir kısmı bu veri ile paylaşıldığında büyük ölçekli değişiklikler yapmak mümkün olmayabilir. Bu yöntem kullanılarak yeniden yapılandırma dosyası ile veri akışı aynı anda sürdürülebilmekte ve sistem çalışması kesintiye uğramadan küçük güncellemeler gerçekleştirilebilmektedir.

1.2. Modül Tabanlı Kısmi Yeniden Yapılandırma

Modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırma FPGA çalışmaya devam ederken önceden tanımlanmış belirli bölgelerin yeniden yapılandırılmasını sağlamaktadır (Mermound, 2004). Bu yöntem yalnızca yapılacak değişikliklerin modüller hâlinde gruplanabilecek kadar büyük olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırmanın etkin biçimde kullanılabilmesi için aynı anda çalışmayan işlevlerin belirlenmesi ve bu işlevlerin ayrı modüller hâlinde gruplanması gerekmektedir. Ayrıca tasarımın açık bir biçimde statik ve dinamik bileşenlere ayrılması büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırma kullanan bir FPGA tasarımı, en başından itibaren bu yaklaşım dikkate alınarak planlanmalı ve yerleşimi buna göre yapılmalıdır. Aksi takdirde sistemin doğru çalışması zorlaşmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırma, fark tabanlı kısmi yeniden yapılandırmaya kıyasla çok daha fazla düşünce, planlama ve tasarım disiplini gerektirmektedir. Bununla birlikte modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırma kullanılacak tüm FPGA sistemlerinin, mümkün olduğunca bu yaklaşım göz önünde bulundurularak tasarlanması önerilmektedir. Modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırma, genel

olarak donanım hızlandırıcılar gibi tüm modüllerin yer değiştirmesinin gerektiği senaryolarda tercih edilmelidir.

2. FPGA’de Kısmi Yeniden Yapılandırmanın Avantajları

Kısmi yeniden yapılandırma, modern FPGA’lerin sahip olduğu bir özelliktir. Bu özellik sayesinde FPGA üzerindeki tasarımın yalnızca belirli bir bölümü çalışma sırasında değiştirilebilirken sistemin geri kalan kısmı kesintisiz biçimde çalışmaya devam etmektedir. Kısmi yeniden yapılandırma, geleneksel yöntemlere kıyasla FPGA’de sayısal devre tasarımında çeşitli avantajlara sahiptir. Bu başlıkta kısmi yeniden yapılandırmanın sağlamış olduğu her bir avantaj detaylı olarak açıklanmaktadır.

2.1. Sistem Tasarımında Artan Esneklik

Kısmi yeniden yapılandırma sayesinde tasarımcılar FPGA’in tamamını yeniden yapılandırmak zorunda kalmadan yalnızca ihtiyaç duyulan bölümleri güncelleyebilmektedir. Böylece sistem tasarımında esneklik sağlanmaktadır. Kısmi yeniden yapılandırmanın bu avantajı FPGA dijital devre uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Drahoňovský vd., 2014; Hager vd., 2015; Ma vd., 2019; Irmak vd., 2021, Park vd., 2022). Örneğin değişen gereksinimlere uyum sağlamak veya sonradan ortaya çıkan bir hatayı gidermek için sadece ilgili modül üzerinde düzenleme yapılabilmektedir. Böylece hem tasarım süresi kısalmaktadır hem de donanım kaynakları daha verimli kullanılarak alan tüketimi azaltılmaktadır.

2.2. Verimli Güç Yönetimi

Kısmi yeniden yapılandırma FPGA tabanlı sistemlerde güç yönetiminin iyileştirilmesine de katkı sağlamaktadır. Yüksek güç tüketen modüller ihtiyaç duyulduğunda yeniden yapılandırılabilir ya da devre dışı bırakılabilmektedir. Böylece güç tüketimi, mevcut iş

yüküne veya uygulama gereksinimlerine göre ayarlanabilmektedir. Kısmi yeniden yapılandırma ile taşınabilir ya da gömülü sistemlerde enerji verimliliği artırılarak pil ömrü uzatılmaktadır (Paulsson vd., 2007; Al-Haddad vd., 2011; Fons vd., 2013; Liu vd., 2013; Johnson vd., 2017).

2.3. Sistem Performansının İyileştirilmesi

FPGA tasarımının belirli bölümlerinin çalışma sırasında yeniden yapılandırılabilmesi, sistem performansının optimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Performans artırıcı iyileştirmeler veya hata düzeltmeleri sistemi durdurmadan uygulanabilmektedir. Farklı çalışma koşulları veya değişken iş yükleri altında sistemin en iyi performansı sunması sağlanmaktadır. Böylece FPGA tabanlı devreler daha güvenilir hale gelmektedir (Tan vd., 2006; El-Araby vd., 2009; Hassan vd., 2015).

2.4. Pazara Sunum Süresinin Kısaltılması

Kısmi yeniden yapılandırmanın bir diğer önemli avantajı ürünlerin pazara sunulma süresini kısaltmasıdır (Vipin vd., 2018). Tasarımın farklı bölümleri üzerinde eş zamanlı olarak çalışılabilmesi geliştirme sürecini hızlandırmaktadır. Belirli işlevler bağımsız olarak güncellenebildiği için tüm sistemin yeniden test edilmesine gerek kalmamaktadır. Bu avantaj prototipleme ve dağıtım süreçlerini kolaylaştırarak ürün geliştirme döngüsünün daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır.

Özetle kısmi yeniden yapılandırma FPGA tasarımında esneklik, enerji verimliliği ve yüksek performans gibi avantajlara sahip bir yöntemdir. Aynı zamanda tasarım geliştirme süresini kısaltarak yenilikçi ürünler daha hızlı şekilde hayata geçirilebilmektedir. Kısmi yeniden yapılandırmanın etkin biçimde kullanılması FPGA tabanlı sistemlerde yeni tasarım olanaklarının önünü açmakta ve gelecekteki donanım teknolojilerinin gelişimine önemli katkılar sunmaktadır.

3. Kısmi Yeniden Yapılandırma Tasarım Akışı

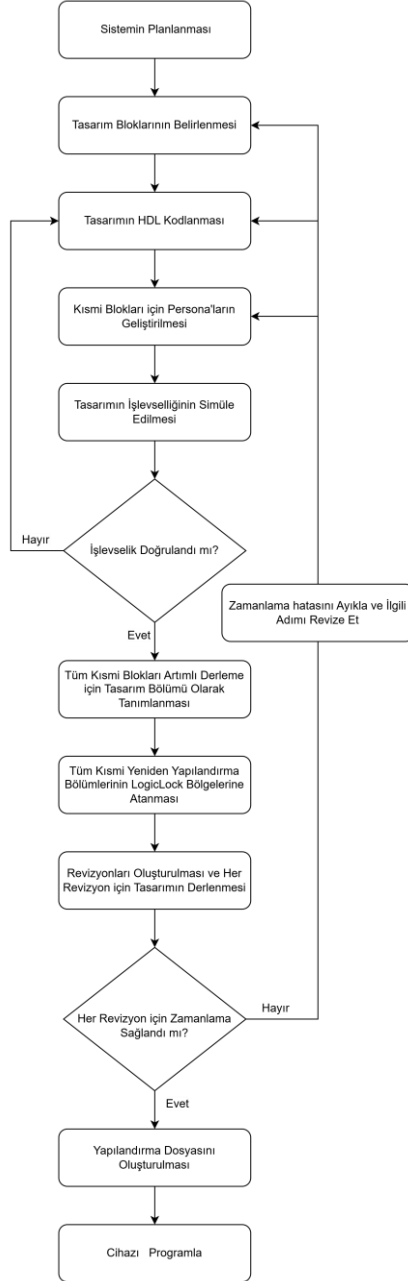
Bu bölümde Intel firmasına sahip FPGA'ler için kısmi yeniden yapılandırma tasarım akışı açıklanmaktadır (Intel, 2018). Kısmi yeniden yapılandırma Intel Quartus Prime yazılımında yer alan revizyon yapısı temel alınarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 4'te kısmi yeniden yapılandırmanın tasarım akış şeması verilmiştir.

Tasarım akışı öncelikle sistemin kısmi yeniden yapılandırmaya uygun olacak şekilde planlanmasıyla başlamaktadır. Bu aşamada FPGA'de oluşturulacak devrenin genel mimari yapısı belirlenmekte ve hangi donanım bloklarının statik kalacağı hangi blokların ise çalışma sırasında yeniden yapılandırılacağı kararlaştırılmaktadır. Bu aşama hem sistemin işlevsel gereksinimlerini hem de performans, alan ve güç tüketimi gibi tasarım kısıtlarını doğrudan etkilemektedir.

Planlama aşamasından sonra kısmi olarak yeniden yapılandırılacak tasarım blokları net bir şekilde tanımlanmaktadır. FPGA üzerindeki modüller incelenerek farklı zamanlarda farklı işlevleri yerine getirmesi beklenen ve aynı anda birlikte çalışmayan bloklar kısmi yeniden yapılandırma kapsamına alınmaktadır. Böylece yeniden yapılandırma sürecinde yalnızca gerekli donanım bölümlerinin değiştirilmesi mümkün hale gelmektedir.

Yapılan tanımlamaların ardından, tasarımın statik ve yeniden yapılandırılabilir bölgelerine ait donanım tanımları, Verilog ve VHDL gibi donanım tanımlama dilleri (HDL) kullanılarak kodlanmaktadır. Kodlama sürecinde, tasarım hiyerarşisinin doğru kurulması ve mantık bloklarının uygun şekilde gruplanması ilerleyen aşamalarda artımlı derleme ve zamanlama analizlerinin daha sağlıklı yapılmasını sağlamaktadır.

Şekil 4 Kısmi Yeniden Yapılandırma Tasarım Akışı Şeması



Kodlama aşamasından sonra, yeniden yapılandırılabilir bölgeler için farklı işlevleri temsil eden persona'lar geliştirilmektedir. Persona'lar, statik ve yeniden yapılandırılabilir bölgelerin özelliklerini tanımlayan, belirli bir işlevi gerçekleştiren parçalardır. Her persona, FPGA üzerindeki bir kısmi yeniden yapılandırma bölgesine yüklenecek özgün donanım mantığını içermektedir. Bu yapı sayesinde aynı donanım bölgesi farklı zamanlarda farklı donanıma dönüşebilmektedir.

Geliştirilen tasarım ve persona'lar, bir sonraki adımda simülasyon ortamında test edilerek işlevsellik açısından doğrulanmaktadır. Simülasyon süreci, tasarımın beklenen şekilde çalışıp çalışmadığını ortaya koymakta ve olası mantıksal hataların erken aşamada tespit edilmesini sağlamaktadır. Eğer tasarımın işlevselliği doğrulanamazsa kod ve persona yapıları gözden geçirilerek gerekli düzeltmeler yapılmaktadır. İşlevsellik doğrulaması başarıyla tamamlandığında ise tasarım akışı bir sonraki aşamaya ilerlemektedir.

İşlevsel olarak doğrulanan tasarımda tüm yeniden yapılandırılabilir bloklar artımlı derleme sürecine uygun olacak şekilde tasarım bölümleri olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümlerin her biri FPGA üzerinde belirli fiziksel alanlara karşılık gelecek biçimde düzenlenmektedir. Her yeniden yapılandırma bölümü için LogicLock atamaları yapılarak yeniden yapılandırılabilir bölgelerin fiziksel konumları FPGA üzerinde sabitlenmektedir. Bu sabitleme işlemi, statik ve yeniden yapılandırılabilir bölgeler arasında istenmeyen etkileşimleri önlemekte ve yeniden yapılandırma sürecinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Bölümlendirme ve yerleşim işlemlerinin ardından farklı persona'lara karşılık gelen revizyonlar oluşturulmakta ve her bir revizyon için tasarım derlenmektedir. Bu aşamada her revizyonun zamanlama gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığı ayrıntılı olarak analiz edilmektedir. Zamanlama koşulları sağlanamazsa ilgili

adımlara geri dönülerek zamanlama hataları giderilmekte ve tasarım revize edilmektedir. Zamanlama kapanışı sağlanan revizyonlar için ise süreç ilerletilmektedir.

Son aşamada, doğrulanan ve zamanlama gereksinimlerini karşılayan tasarımlar için gerekli yapılandırma dosyaları oluşturulmaktadır. Bu dosyalar FPGA'nın tamamını yapılandıran tam bit akışlarını ve yalnızca yeniden yapılandırılabilir bölgeleri güncelleyen kısmi bit akışlarını içermektedir. Elde edilen bit akışları FPGA'ye yüklenip cihaz programlanarak kısmi yeniden yapılandırma yeteneğine sahip sistem çalışır duruma getirilmektedir.

Bu tasarımı akışı ile kısmi yeniden yapılandırma planlı ve sistematik bir şekilde uygulanarak FPGA tabanlı sistemlerde esneklik, verimlilik ve yüksek performans elde edilmektedir.

Özetle kısmi yeniden yapılandırma, modern FPGA tabanlı sistemlerde donanım esnekliğini ve kaynak verimliliğini artıran bir programlama yöntemidir. Geleneksel FPGA yapılandırma yöntemlerinde tüm cihazın yeniden programlanması gerekirken kısmi yeniden yapılandırma ile yalnızca belirli donanım bölgeleri çalışma sırasında güncellenebilmektedir. Kısmi yeniden yapılandırma ile sistemin geri kalan bölümleri kesintisiz çalışmaya devam ederken donanım işlevlerinin dinamik olarak değiştirilebilmektedir. Böylece hem sistem sürekliliği korunmakta hem de yeniden yapılandırma süresi önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu yapılandırma yöntemi aynı anda çalışmayan donanım işlevlerinin tek bir fiziksel alanı paylaşabilmesini sağlamaktadır. Böylece FPGA üzerindeki mantık, bellek ve ara bağlantı kaynakları daha verimli şekilde kullanılmaktadır. Kullanılmayan modüllerin donanımda sürekli olarak yer kaplamasının önüne geçilerek gereksiz güç tüketimi de azaltılmaktadır. Özellikle çok işlevli ve yapılandırılabilir sistemlerde, kısmi yeniden yapılandırma FPGA'nın sunduğu tekrar programlanabilme avantajını daha ileri bir seviyeye taşımaktadır.

Fark tabanlı ve modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırma yöntemleri tasarım ihtiyacına göre tercih edilmektedir. Fark tabanlı yöntem ile mantık yapısında küçük değişikliklerin yapıldığı durumlarda düşük boyutlu bit akışları ile hızlı güncellemeler gerçekleştirilmektedir. Modül tabanlı yöntem ise daha büyük ve işlevsel olarak ayrıştırılabilen donanım bloklarının dinamik olarak değiştirilmesinde kullanılmaktadır. Ancak modül tabanlı kısmi yeniden yapılandırmanın etkin biçimde uygulanabilmesi için tasarımın en başından itibaren statik ve dinamik bileşenler göz önünde bulundurularak planlanması gerekmektedir.

Kısmi yeniden yapılandırmanın sunduğu en önemli kazanımlardan biri, sistem tasarımında sağlanan yüksek esnekliktir. Donanım işlevlerinin çalışma koşullarına veya uygulama gereksinimlerine göre değiştirilmesi mümkün hâle gelmektedir. Bunun yanı sıra güç yönetimi açısından da önemli avantajlar elde edilmektedir. Yüksek güç tüketen modüller yalnızca ihtiyaç duyulduğunda etkinleştirilebilmekte veya devre dışı bırakılabilmektedir. Özellikle gömülü ve taşınabilir sistemlerde ihtiyaç olmayan modülün FPGA’de yer almaması enerji verimliliğini artırarak pil tüketimini azaltmaktadır. Sonuç olarak kısmi yeniden yapılandırma, FPGA tabanlı sistemlerin esneklik, verimlilik ve sürdürülebilirlik gereksinimlerine karşı etkin bir çözüm sunmaktadır. Donanım kaynaklarının dinamik olarak yeniden kullanılabilirdiğinden daha uyarlanabilir, enerji verimli ve yüksek performanslı sistemler geliştirilebilmektedir. Kısmi yeniden yapılandırma güncel FPGA uygulamalarının ötesinde, gelecekteki yeniden yapılandırılabilir donanım mimarilerinin şekillenmesinde de önemli bir rol oynamaktadır.

Kaynakça

Al-Haddad, R., Oreifej, R., Ashraf, R. A., & DeMara, R. F. (2011). Sustainable modular adaptive redundancy technique emphasizing partial reconfiguration for reduced power consumption. *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2011(1), 430808.

Boutros, A., Arora, A., & Betz, V. (2025). Field-Programmable Gate Array Architecture for Deep Learning: Survey and Future Directions. *Proceedings of the IEEE*.

Chekuri, R. R., Likhitha, C., Anjana, K., Chinnaiyah, M. C., Bhavani, K., Yadav, G. A., & Chekuri, N. (2025) A case study focusing on partial reconfiguration FPGA. In *Recent Trends in VLSI and Semiconductor Packaging* (pp. 215-221). CRC Press.

Drahoňovský, T., Rozkovec, M., & Novák, O. (2014). A highly flexible reconfigurable system on a Xilinx FPGA. In *2014 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig14)* (pp. 1-6). IEEE.

El-Araby, E., Gonzalez, I., & El-Ghazawi, T. (2009). Exploiting partial runtime reconfiguration for high-performance reconfigurable computing. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETs)*, 1(4), 1-23.

Fons, F., Fons, M., Cantó, E., & López, M. (2013). Real-time embedded systems powered by FPGA dynamic partial self-reconfiguration: a case study oriented to biometric recognition applications. *Journal of real-time image processing*, 8(3), 229-251.

Hager, S., Bendyk, D., & Scheuermann, B. (2015). Partial reconfiguration and specialized circuitry for flexible FPGA-based packet processing. In *2015 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig)* (pp. 1-6). IEEE.

Hassan, A., Ahmed, R., Mostafa, H., Fahmy, H. A., & Hussien, A. (2015, December). Performance evaluation of dynamic partial reconfiguration techniques for software defined radio implementation on FPGA. In 2015 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS) (pp. 183-186). IEEE.

Intel. (2018). Partial Reconfiguration Design Flow (Intel® Quartus® Prime Standard Edition User Guide). <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683499/18-1/partial-reconfiguration-design-flow.html>

Irmak, H., Ziener, D., & Alachiotis, N. (2021). Increasing flexibility of FPGA-based CNN accelerators with dynamic partial reconfiguration. In 2021 31st International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL) (pp. 306-311). IEEE.

Johnson, A. P., Patranabis, S., Chakraborty, R. S., & Mukhopadhyay, D. (2017). Remote dynamic partial reconfiguration: A threat to Internet-of-Things and embedded security applications. *Microprocessors and Microsystems*, 52, 131-144.

Kao, C. (2005). Benefits of partial reconfiguration. *Xcell journal*, 55, 65-67.

Kornaros, G., Leivadaros, S., & Kolimbianakis, F. (2024). Flexible updating of Internet of Things computing functions through optimizing dynamic partial reconfiguration. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 23(2), 1-25.

Kshirsagar, R. V., & Sharma, S. (2011). Difference based partial reconfiguration. *International journal of advances in engineering & technology*, 1(2), 194.

Lie, W., & Feng-Yan, W. (2009, November). Dynamic partial reconfiguration in FPGAs. In 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application (Vol. 2, pp. 445-448). IEEE.

Liu, S., Pittman, R. N., Forin, A., & Gaudiot, J. L. (2013). Achieving energy efficiency through runtime partial reconfiguration on reconfigurable systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 12(3), 1-21.

Ma, L., Sham, C. W., Sun, J., & Tenorio, R. V. (2019). A real-time flexible telecommunication decoding architecture using FPGA partial reconfiguration. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(10), 2149-2153.

Mermoud, G. (2004). A module-based dynamic partial reconfiguration tutorial. *Logic Systems Laboratory, EPFL*.

Negi, A., Raj, S., Thapa, S., & Indu, S. (2021). Field programmable gate array (FPGA) based IoT for smart city applications. In *Data-Driven Mining, Learning and Analytics for Secured Smart Cities: Trends and Advances* (pp. 135-158). Cham: Springer International Publishing.

Park, D., Xiao, Y., & DeHon, A. (2022). Fast and flexible FPGA development using hierarchical partial reconfiguration. In *2022 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT)* (pp. 1-10). IEEE.

Paulsson, K., Hübner, M., Bayar, S., & Becker, J. (2007, June). Exploitation of Run-Time Partial Reconfiguration for Dynamic Power Management in Xilinx Spartan III-based Systems. In *ReCoSoC* (pp. 1-6).

Sasamal, T. N., & Prasad, R. (2011). Module based and difference based implementation of partial reconfiguration on FPGA: a review. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 1(4), 1898-1903.

Tan, H., DeMara, R. F., Thakkar, A. J., Ejnoui, A., & Sattler, J. (2006). Complexity and Performance Evaluation of Two Partial Reconfiguration Interfaces on FPGAs: A Case Study. In ERSA (Vol. 6, pp. 253-256).

Xilinx, (2018). UG909: Vivado Design Suite User Guide: PartialReconfiguration.https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2018_1/ug909-vivado-partial-reconfiguration.pdf.

Vipin, K., & Fahmy, S. A. (2018). FPGA dynamic and partial reconfiguration: A survey of architectures, methods, and applications. ACM Computing Surveys (CSUR), 51(4), 1-39.

BÖLÜM 6

SABİT GENİŞBANT ERİŞİM TEKNOLOJİLERİNDE GELİŞİM VE DOĞRUDAN EVE FİBER (FTTH) UYGULAMALARININ ANALİZİ

1. Bekir Sami TEZEKİCİ¹

2. Turgay KARACAN²

Giriş

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişim, telekomünikasyon altyapılarının sürekli evrimini zorunlu kılmaktadır. Telekomünikasyonun temelini oluşturan altyapılar, başlangıçta analog ses iletimi için tasarlanan bakır telefon şebekeleri iken, internetin keşfi ve dijitalleşmenin etkisiyle köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Artan veri trafiği ve bant genişliği ihtiyacı, özellikle uzak mesafelere hatasız ve yüksek hızda veri aktarımını mümkün kılan optik fiber teknolojilerinin önemini ön plana çıkarmıştır. Artan bant genişliğine bağlı olarak uzak mesafelere verinin hatasız olarak taşınabilmesi optik ağlar ile sağlanabilmektedir (Kayhan E., 2015).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Orcid: 0000-0003-0941-1829

² Mühendis, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Orcid: 0000-0002-7973-2305

Telekomünikasyon operatörleri, artan kullanıcı beklentilerini karşılayabilmek ve rekabetçi kalabilmek için altyapılarını sürekli olarak güncellemek durumundadır. İçerik sağlayıcılar tarafından sunulan yüksek çözünürlüklü video, gerçek zamanlı çevrimiçi oyunlar ve bulut tabanlı uygulamalar, bakır tabanlı şebekelerin fiziksel limitlerini zorlamakta ve fiber optik çözümlere geçişi kaçınılmaz hale getirmektedir. Fiber optik teknolojisi, son kullanıcılara geniş bant servis taleplerini karşılamada yüksek hız, düşük gecikme, yüksek güvenlik ve elektromanyetik parazite karşı bağışıklık gibi benzersiz avantajlar sunmaktadır.

"Neden FTTH?" sorusunun yanıtı, günümüzün dijital dönüşüm süreci içinde şekillenen iki temel dinamikte saklıdır: Son kullanıcıların sürekli artan bant genişliği talepleri ve içerik sağlayıcıların yüksek çözünürlüklü veri, akış hizmetleri, bulut oyunları gibi yoğun bantlı uygulamaları yaygınlaştırması. Geleneksel bakır şebekeler, bu ivmelenen kapasite ihtiyacını karşılamakta fiziksel limitlerine ulaşmış durumdadır. Fiber optik teknoloji ise, dar bant ile geniş bant arasındaki sınırları ortadan kaldırarak; hem daha yüksek hız ve düşük gecikme, hem de güvenli ve stabil bir iletişim ortamı sunmakta, böylece dijital yaşamın temel omurgasını oluşturmaktadır.

FTTH'nin tarihsel gelişimi, teknolojik bir vizyonun erken dönemlerde hayata geçirilişinin önemli bir kanıtıdır. İlk pilot uygulama, 1977 yılında Japonya'nın Higashi-Ikoma kentinde, 168 aboneyi kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu öncü proje; eğitim, toplumsal fayda, etkileşimli video, isteğe bağlı programlama, güvenlik ve telekomünikasyon hizmetlerini entegre etmeyi amaçlamıştır. 1980'li yıllar boyunca bu teknolojik atılım, Avrupa ve Kuzey Amerika'da da benzer denemelerle yayılmıştır. İngiltere'de 1982 yılında, Almanya ve Kanada'da 1983 yılında, Fransa'da ise 1984 yılında yapılan öncü projeler, FTTH'nin teknik fizibilitesini kanıtlamıştır.

Tüm bu teknik başarılar sonucunda 1980'lerin sonuna gelindiğinde önde gelen telefon şirketleri FTTH' i kendi şebekelerine eklemeye başlamak için ağ evrim planları hazırdı. Ancak şirketlerin kafasında yüksek maliyetler, elektrik gücü ve bilinmeyen servis talepleri gibi problemlerden dolayı soru işaretleri vardı. Öncelikle eski bakır ağ ile ne yapmaları gerekiyordu? (Shumate P.W., 2008).

Yüksek maliyetler ve teknik zorluklar karşısında telekomünikasyon operatörleri, tam ölçekli bir FTTH yayılımını kademeli bir stratejiyle hayata geçirmiştir. Bu süreç, fiberi önce mahalle, sokak ve bina gibi ağın kritik noktalarına kadar götürmeyi hedefleyen ara çözümlerin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir. Böylece, FTTx (Fiber to the x) şemsiyesi altında toplanan ve fiberin sonlandığı noktaya göre tanımlanan bir dizi mimari ortaya çıkmıştır: Fiberi dağıtım noktasına (FTTN- Fiber to the Node), kaldırırma (FTTC- Fiber to the Curb), binaya (FTTC- Fiber to the Building) ve nihai hedef olan konuta (FTTH- Fiber to the Home) kadar ulaştıran bu modeller, geçiş döneminin temel yapı taşlarını oluşturmuştur.

Türkiye'de fiber altyapı yatırımlarına 2000'li yılların başında başlanmış, ancak asıl ivme 2008 yılında Türk Telekom'un GPON ve Active Ethernet mimarilerini temel alan FTTH projelerini devreye almaya başlamasıyla kazanılmıştır. İlk ticari GPON abonelerine 2011 yılı başında İstanbul'da hizmet verilmeye başlanmış, akabinde benzer altyapı çalışmaları Ankara, İzmir ve Diyarbakır gibi büyükşehirlerde de yaygınlaştırılmıştır (Onursal Z., 2012). 2010'lu yıllar boyunca FTTH uygulamaları sınırlı ölçekte gözlemlenirken, 2020'li yıllara gelindiğinde özellikle pandemi döneminde yaşanan dijitalleşme hızı ve internet trafiğindeki patlama, fiber altyapının hem kapsamının genişlemesinde hem de stratejik öneminin artmasında belirleyici bir rol oynamıştır.

İletim Ortamı Sınıflandırılması

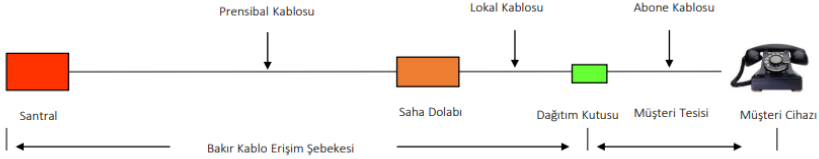
Günümüz sabit geniş bant erişim ağları, veri iletimi için farklı fiziksel özelliklere ve performans kapasitelerine sahip çeşitli iletim ortamlarından yararlanmaktadır. Bu kablolu ortamlar, bakır ve fiber optik olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir.

1. Bakır erişim
2. Fiber erişim

Bakır Erişim

Bakır Erişim, santralden başlayarak son kullanıcının konutuna kadar olan bağlantının; çıplak bakır tel, koaksiyel kablo üzerinden sağlandığı geleneksel bir iletişim tekniğidir.

Şekil 1 Bakır kablo erişim yapısı.



Prensipal (Feeder) Kablo: Santral binası ile sahada bulunan dağıtım noktalarındaki (saha dolabı) ana terminasyon arasında iletişimi sağlayan yüksek kapasiteli bakır kablodur.

Lokal (Distribution) Kablo: Saha dolabı ile, sokak veya mahalle seviyesindeki daha küçük dağıtım kutuları arasında çekilen kablodur.

Saha Dolabı (Cabinet): Prensipal kablo ile lokal kablonun bağlandığı, sinyal dağıtımının ve yönlendirmesinin yapıldığı korumalı dış mekân terminasyon ünitesidir.

Dağıtım Kutusu (Distribution Point): Lokal şebeke ile bireysel abone hatlarının birleştirildiği son dağıtım noktasıdır.

Abone (Drop) Kablosu: Dağıtım kutusundan, abonenin binasındaki iç tesisat giriş noktasına (ankastre) uzanan son bağlantı kablosudur.

Ankastre (Building Entry Point): Binanın dışından gelen abone kablosu ile bina içi tesisatın bağlandığı terminasyon ve dağıtım noktasıdır.

İç Tesisat Kablosu (Inside Wiring): Ankastreden, konut veya iş yerinin içindeki son kullanıcı cihazına kadar olan bağlantıyı sağlayan kablodur.

Müşteri Cihazı (Customer Premises Equipment- CPE): Son kullanıcının hizmeti aldığı telefon, modem, faks cihazı veya yönlendirici gibi terminal ekipmanlarıdır.

Bakır şebekede;

Geleneksel bakır şebeke mimarisinde, santral binası kendisine bağlı olan coğrafi bölgedeki (genellikle 4-5 km yarıçaplı bir alan, "santral sahası") her bir aboneye fiziksel olarak bir çift bakır kablo ile bağlanır. Kullanılan bakır kablonun iletken çapı (kalınlığı), mesafeye bağlı olarak değişiklik gösterir ve 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm ve 0.9 mm gibi standart ölçülerde üretilir. Genel bir prensip olarak, daha kalın iletkenler daha düşük direnç ve daha az sinyal zayıflaması sağladığından, uzak mesafelerdeki abonelere hizmet götürmek için tercih edilir.

Bağlantı, hiyerarşik bir yapı izler: Santraldeki ana dağıtım çatısından (Repertitör veya MDF- Ana Dağıtım Çerçevesi) çıkan kablolar, önce dış ortamdaki Saha Dolaplarına, oradan Dağıtım Kutularına, son olarak da abonenin binasındaki Ankastreye ulaşır. Ankastreden sonra ise bina içi kablolama ile son kullanıcının konutundaki priz noktasına bağlantı tamamlanır.

Bakır iletiminin temel fiziksel kısıtlarından biri, elektromanyetik girişim (EMI) ve çapraz konuşma (crosstalk) sorunudur. Bir bakır kablodan geçen elektrik sinyali, etrafında bir elektromanyetik alan oluşturur. Bu alan, yakındaki paralel bir başka kablonun iletkenleri üzerinde istenmeyen bir elektrik akımı indükleyebilir. İndüklenen bu kaçak sinyalin şiddeti, kaynak sinyalin gücüne, kablolar arası mesafeye ve kablo yalıtımının kalitesine bağlıdır.

Parazit sorunlarının bir sebebi de kablo ekleridir. Eklerde meydana gelebilecek korozyonlar ve hatalı yapılmış ekler zayıflamaya sebebiyet vermektedir. Daha önceki sistemlerde kullanılan çıplak telli havai hat analog sinyalin taşınmasında kullanılması, yatırım maliyetinin çok yüksek olması çok fazla parazite sebebiyet vermesi nedeniyle yeni teknolojide kullanılmamaya başlanılmıştır (Megep, 2008).

Çift Bükümlü Kablo

Bükümlü çift kablo (Twisted Pair), telefon ve veri şebekelerinde en yaygın kullanılan bakır kablo türüdür. Bu kablolarda, her biri plastik gibi bir yalıtkanla kaplanmış iki bakır iletken, birbirinin etrafında spiral şeklinde bükülerek bir çift oluşturur. Her bir büküm, iletkenler tarafından yayılan elektromanyetik alanların birbirini kısmen sönümlemesini sağlayarak hem kablodan dışarıya yayılan paraziti hem de dışarıdan kablo üzerine gelen girişimi minimize eder.

Performansı daha da artırmak için, bükümlü çiftlerin etrafına bir metal örgü veya folyo eklenerek Korumalı Bükümlü Çift kablolar üretilir. Bu ek koruma katmanı, kablonun dış elektromanyetik gürültüye karşı direncini önemli ölçüde artırır ve daha uzun mesafelerde veya elektriksel gürültünün yoğun olduğu ortamlarda daha kararlı bir iletim sağlar. (Megep, 2008).

Şekil 2 Çift bükümlü kablo.



Şekil 2’de korumasız çift bükümlü kablo örneği gösterilmiştir. Standart bir Korumasız Bükümlü Çift (UTP) kablosu, her biri kendi rengine sahip iki iletkeniden oluşan toplam dört çift (8 tel) bakır damar içerir. İletkenlerin ikişerli ve spiral şekilde bükülmesi, çiftler arasındaki elektromanyetik etkileşimi azaltmanın temel yöntemidir.

UTP kablolar, ince ve esnek yapıları sayesinde kablo kanallarında az yer kaplar ve büyük ölçekli ağ kurulumlarında tesisat kolaylığı sağlar. Başlıca dezavantajı, dış elektromanyetik gürültüye karşı ek bir korumasının olmamasıdır; bu nedenle yüksek gerilim hatları veya güçlü manyetik alanların yakınında performansı düşebilir.

Teknolojik ilerlemelerle birlikte, Cat5e, Cat6 gibi yüksek kategorili UTP kablolar, 100 metrelik bir mesafede 1 Gbps (1000 Mbit/s) seviyesinde veri iletimini mümkün kılmaktadır. Kablo içindeki her bir çift, renk kodlaması ile tanımlanır (örneğin: mavi/mavi-beyaz, turuncu/turuncu-beyaz, yeşil/yeşil-beyaz, kahverengi/kahverengi-beyaz).

UTP kablolar, belirli bir mesafe için üzerinden geçirebilecekleri veri miktarına göre kategorilere ayrılırlar. Bu kategoriler Şekil 3’te gösterilmiş olup özellikleri şu şekildedir; CAT 1: Telefon hatlarında kullanılır.

- CAT 2: 4 Mbps hızında veri transferi sağlar.
- CAT 3: 10 Mbps hızında veri transferi sağlar.
- CAT 4: 16 Mbps hızında veri transferi sağlar.
- CAT5 ve CAT5e: LAN (Yerel Alan Ağ) bağlantıları için kullanılır. Günümüzde neredeyse tüm LAN bağlantıları Kategori 5 UTP kablolarıyla yapılmaktadır. 100 metrelik mesafe aşılmadığında 100 Mbps'lik veri aktarım kapasitesine sahiptir.
- CAT 6: Kategori 5 kablosuna göre daha üstün bir üretim tekniği kullanılarak üretilmiş olması nedeniyle, 1000 Mbps hızında veri iletimine imkân tanır (Megep, 2008).

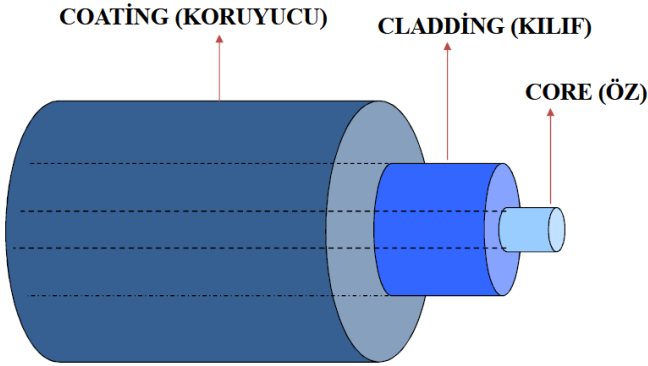
Şekil 3 Bakır network kablo çeşitleri.



Fiber Erişim

Optik fiber aracılığıyla bilgi taşıyan iletişim sistemlerine optik fiberli sistemler denilmektedir. Bir optik fiber, çekirdek (öz) denilen iç bölge, kılıf ve koruyucu tabaka bölgelerinden oluşur. Şekil 4'te optik fiber kablo yapısı gösterilmiştir. Çekirdek bölgesi, içinde ışığın kırılarak yolculuk ettiği, iletimin sağlandığı silindirik kısımdır. Kılıf ise özün içindeki ışığın tam yansıma prensibi ile kırılabilmesi için gerekli olan silindirik örtü tabakadır. En üstte bulunan kaplama tabaka ise koruyucu görevi yapar (Işık Y. ve Kahvecioğlu A.,2003).

Şekil 4 Fiber optik elyaf yapısı



Fiber optik iletimin temel prensibi, ışığın tam yansıma fenomeninden yararlanmaktır. Bu olgunun gerçekleşebilmesi için, fiberin merkezindeki çekirdek (core) bölgesinin kırılma indisinin, onu saran kılıf (cladding) katmanının kırılma indisinden kesinlikle daha büyük olması gerekir.

Çekirdek, ışık sinyalinin taşındığı ve bilginin iletildiği ince, silindirik kanaldır. Genellikle saf camdan (silika) üretilir ve fiberin tipine (tek modlu/çok modlu) bağlı olarak çapı 8 ila 100 mikrometre (μm) arasında değişir.

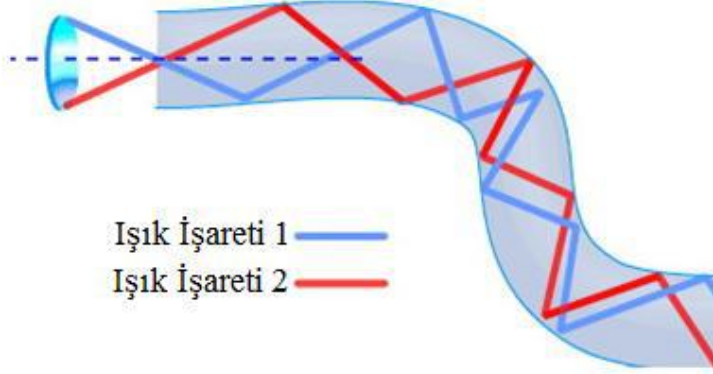
Kılıf ise tipik olarak 125 μm çapa sahiptir ve çekirdeği tamamen sarar. Aynı şekilde camdan yapılmış olmasına rağmen, kırılma indisi çekirdeğe göre yaklaşık %1 oranında daha düşük olacak şekilde tasarlanır.

Çekirdek ve kılıfı çevreleyen kaplama (coating) katmanı, genellikle bir polimer veya plastikten oluşur ve optik bir işlevi yoktur. Birincil görevi, narin cam yapıyı fiziksel darbelerden, nemden ve mikro-eğrilik kayıplarından korumaktır. Kaplama, bir veya daha fazla katmandan oluşabilir. Optik fiberler genellikle cam (silika) veya plastik (polimer) malzemeden üretilir.

Plastik fiberler daha esnek ve düşük maliyetlidir, ancak yüksek zayıflamaları nedeniyle kısa mesafe bağlantılarıyla sınırlıdır. Cam fiberler ise son derece düşük kayıplar sunar ve uzun mesafeli, yüksek kapasiteli telekomünikasyon uygulamalarında tercih edilir.

Şekil 5'te sembolize edildiği gibi, bir lazer kaynağından gönderilen ve '1' ve '2' ile gösterilen ışın demetleri, fiber düz bir hat üzerindeyken merkezi bir yol izleyebilir. Ancak kablo büküldüğü noktalarda, bu ışınlar çekirdek-kılıf sınırına daha dik açılarla çarparak yansır. Bu süreçte, her yansıma az miktarda enerji kaybına ve yol uzunluğunda artışa neden olabilir. Bu nedenle, fiber kabloların kurulumu sırasında aşırı bükülme veya dar yarıçaplı dönüşlerden kaçınılması, sinyal bütünlüğünü korumak ve ek kayıpları önlemek açısından son derece önemlidir.

Şekil 5 Fiber optik kabloda ışığın iletimi.



Zayıflama, ışığın fiber boyunca ilerlerken enerji kaybetmesidir ve birimi desibel/kilometre (dB/km) olarak ifade edilir. Başlıca üç nedeni vardır:

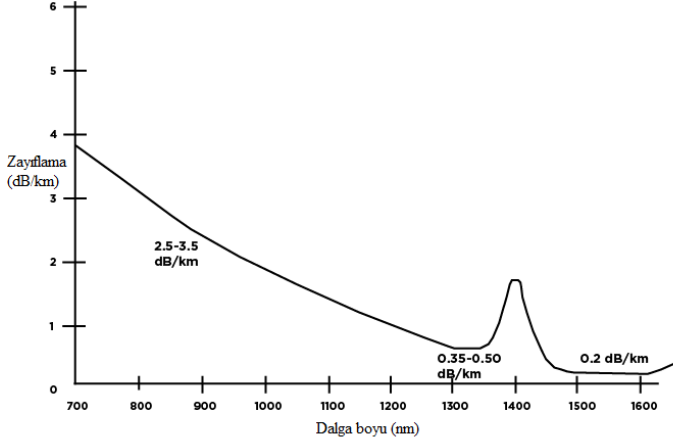
Saçılma (Scattering): Fiber malzemesinin kırılma indisindeki mikroskobik düzensizliklerden (Rayleigh saçılması) kaynaklanır. Bu saçılma, dalga boyunun dördüncü kuvvetiyle ters orantılıdır; yani kısa dalga boylarında (örneğin 850 nm) çok daha şiddetli, uzun dalga boylarında (1310/1550 nm) ise çok daha zayıftır.

Soğurma (Absorption): Fiberdeki safsızlık iyonları (örneğin hidroksil iyonları OH^- , veya metal iyonları) veya temel cam yapısının kendisi tarafından ışık enerjisinin emilerek ısıya dönüşmesidir.

Bozulma (Dispersion) ise, bir optik palsın zaman içinde yayılarak genişlemesi ve komşu palslarla örtüşmesidir.

Bu kayıpların dalga boyuna bağlı değişimi, Şekil 8'deki zayıflama spektrumunda net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 8 Dalga boyuna bağlı optik fiber zayıflama grafiği.



İletimde kullanılan ışık insan gözünün göremeyeceği dalga boyları olan 850 nm, 1310 nm ve 1550 nm seviyelerindedir. Bu dalga boylarında kayıpların minimum seviyelerde seyretmeleri optik iletimi mümkün kılar. Tablo 1’de dalga boylarına göre ortalama zayıflama değerleri verilmiştir.

Tablo 1 Dalga boylarına göre zayıflamalar.

Dalga boyu (nm)	Zayıflama (dB/km)
850	3.2
1310	0.36
1550	0.20
1625	0.25

Fiber Optik Kablo Avantajları

Fiber optik teknolojinin bakıra kıyasla teknik üstünlüğü, birkaç temel avantajda somutlaşmaktadır:

Yüksek Kapasite ve Uzun Mesafe: Işığın taşıyıcı frekansının çok yüksek olması, teorik olarak çok yüksek bant genişliklerine

(Tbps seviyelerine) olarak tanır. Mevcut teknolojiyle, özellikle 1550 nm veya 1625 nm dalga boylarında, tekrarlayıcı kullanılmadan 80-100 km'ye varan mesafelerde yüksek hızlı iletişim mümkündür. Ayrıca, tek bir fiber üzerinde Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama (WDM) gibi teknolojilerle yüzlerce bağımsız kanal oluşturulabilir.

Güvenlik: Fiberden fiziksel olarak veri sızdırmak son derece zordur. Bunun için kablonun kesilerek özel ekipmanlarla izlenmesi gerekir. Ancak böyle bir müdahale, iletişimde ani bir kesintiye ve ek noktasında ölçülebilir bir sinyal kaybına neden olacağından, tespit edilmesi kolaydır.

Elektromanyetik Bağışıklık: Fiberler elektrik iletmediği için manyetik alanlardan, yıldırım düşmelerinden veya yüksek gerilim hatlarından (enerji nakil hatlarıyla aynı güzergahta döşenebilirler) etkilenmezler. Ayrıca, elektromanyetik girişim (EMI) yaymazlar, bu da çapraz konuşma (crosstalk) sorununu ortadan kaldırır.

Sinyal Yalıtımı: Dışarıdan herhangi bir ışık kaynağının fibere girmesi mümkün olmadığından, yan yana döşenen yüzlerce fiberde bile sinyaller birbirine karışmaz, mükemmel bir yalıtım sağlanır.

Güvenlik ve Dayanıklılık: Cam fiberler yalıtkan malzemeden yapıldığı için kısa devre riski taşımaz ve kırıldığında kıvılcım çıkarmaz. Ayrıca yüksek ısıya (yaklaşık +500°C'ye kadar) dayanıklıdır. Bu özellikler, petrol rafinerileri, kimya tesisleri veya patlayıcı depoları gibi tehlikeli ortamlarda güvenli bir iletişim çözümü sunar.

Hafiflik ve İnce Yapı: Aynı iletişim kapasitesine sahip bir bakır kabloya kıyasla fiber kablolar çok daha hafif ve incedir. Bu, taşıma, depolama ve kurulum maliyetlerini önemli ölçüde azaltır.

Tablo 2 Fiber ve bakır kablo ağırlıkları.

Fiber Damar	Bakır İletken
30-50 gr/km	(0.6 mm ² Ø) 3 kg/km

Eve Kadar Fiber (FTTH) Kavramı

FTTH altyapısının işleyiş prensibini anlamak için, temelini oluşturan Pasif Optik Ağ (PON- Passive Optical Network) mimarisini incelemek gerekir. PON'un temel özelliği, herhangi bir aktif elektronik bileşen (güç gerektiren) kullanmadan, yalnızca pasif optik bölücüler (splitter) ile tek bir noktadan çok noktaya (Point-to-Multipoint) veri dağıtımı yapmasıdır.

Bu mimarinin güncel ve verimli bir FTTH uygulaması şu şekilde çalışır:

OLT (Optik Hat Sonlandırıcı): Sistemin merkezinde, servis sağlayıcının santral binasında bulunan aktif bir cihazdır. OLT, geniş bant internet, ses ve video servislerini omurga ağından alır ve optik sinyallere dönüştürerek PON portlarından dışarı iletir. Bir OLT cihazı, üzerindeki kart tiplerine bağlı olarak yüzlerce PON portu barındırabilir.

OFSD (Optik Fiber Saha Dolabı): FTTH şebekesinin işletilebilirliğini ve esnekliğini artıran kritik dağıtım noktalarıdır. Bunlar, santral içindeki yoğun fiber dağıtım yapısını sokağa taşıyan, hafif ve düşük maliyetli dış mekân kabinleridir. Santralden gelen ana fiber kablolar burada sonlandırılır. Daha sonra, patch kablolar (atlama kabloları) kullanılarak, hizmet götürülecek her bir binaya ait fiber kablolarla bağlantı yapılır ve sinyal yolu devam ettirilir. Bina Sonlandırma Noktası: OFSD'den gelen fiber kablo, hedef binanın zayıf akım/telekomünikasyon panosunun bulunduğu teknik alana (genellikle elektrik odası) kadar çekilir ve burada bir terminasyon panosunda sonlandırılır.

Optik Bölücüler (Splitter): Bina içindeki veya bazen OFSD içindeki bu pasif bileşenler, gelen tek bir fiber sinyalini çoğullayarak, binadaki her bir bağımsız daireye ayrı fiber kablolarla dağıtılmasını sağlar. Böylece "eve kadar fiber" bağlantı fiziksel olarak tamamlanmış olur.

Bina terminasyon noktasından sonra devreye giren optik bölücü (splitter), gelen tek bir fiber sinyalinin, tipik olarak 2, 4, 8, 16, 32 veya 64 eşit çıkışa böler. Bu çıkışlardan her biri, bir patch kablo aracılığıyla ilgili dairenin içine kadar çekilerek ONT (Optik Ağ Terminali) cihazına bağlanır. Böylece, "eve kadar fiber" fiziksel olarak tesis edilmiş olur. Bölücüler pasif bileşenler olduğu için, gelen optik gücü çıkışları arasında paylaştırırken kaçınılmaz olarak bir ekleme kaybı oluşturur. Bu kayıp, bölme oranı ile doğru orantılıdır. Kayıp değeri, bölücünün çıkış sayısının 2'nin kuvveti (2^n) şeklinde ifade edilmesi ve n değerinin 3 ile çarpılmasıyla teorik olarak hesaplanabilir. Örneğin, 1:16 bölme oranına sahip bir bölücü için $16 = 2^4$ olduğundan, teorik kayıp $4 \times 3 = 12$ dB'dir. Pratikte üretim toleransları nedeniyle bu değerden küçük sapmalar olabilir.

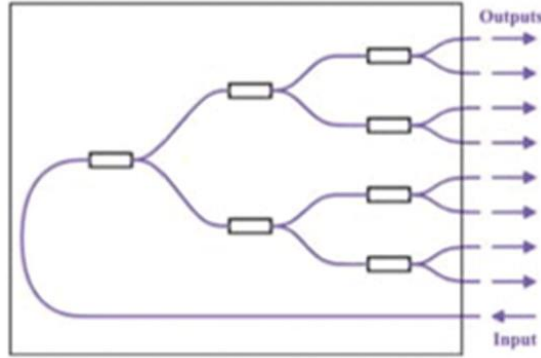
Tablo 3 Optik bölücülerdeki zayıflama değerleri.

Bölme Oranı	Bölücü Kaybı (dB)
1:2	3.0
1:4	6.0
1:8	9.0
1:16	12.0
1:32	15.0
1:64	18.0

Ağ tasarımında esneklik sağlamak amacıyla, optik bölücüler yalnızca binalarda değil, aynı zamanda OFSD'lerin içinde de konumlandırılabilir. Bu yaklaşım, özellikle bir cadde veya mahalledeki daire yoğunluğu yüksekse ve birçok binaya aynı OFSD'den hizmet götürülüyorsa tercih edilir.

GPON standardına göre, bir OLT'nin tek bir PON portu teorik olarak maksimum 128 adet ONU/ONT'ye hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, OFSD içine yerleştirilecek bölücülerin toplam çıkış bu 128 abone sınırını aşmayacak şekilde planlanması gerekir.

Şekil 11 Optik bölücü.



Bulgular

PON sistemlerinde başarılı bir ağ tasarımının en kritik adımı, optik bütçenin doğru hesaplanmasıdır. Amaç, santraldeki OLT'den çıkan sinyalin, yol boyunca uğradığı tüm kayıplardan sonra, son kullanıcıdaki ONT cihazına kabul edilebilir bir güç seviyesinde ulaşmasını sağlamaktır. ONT'ler, üretici spesifikasyonlarına göre belirli bir hassasiyet aralığında (genellikle -8 dBm ile -27 dBm arası) çalışmak üzere tasarlanmıştır. Bu aralığın altına düşen sinyaller, düşük hız, kararsız bağlantı veya tamamen iletişim kopması gibi sorunlara yol açar.

Optik bütçe hesabında dikkate alınması gereken başlıca kayıplar şunlardır:

Bölücü Kaybı (Splitter Loss): En yüksek kayba neden olan bileşendir. Seçilen bölme oranına (1:32, 1:64 vb.) göre değişir ve tasarımın en önemli belirleyicisidir.

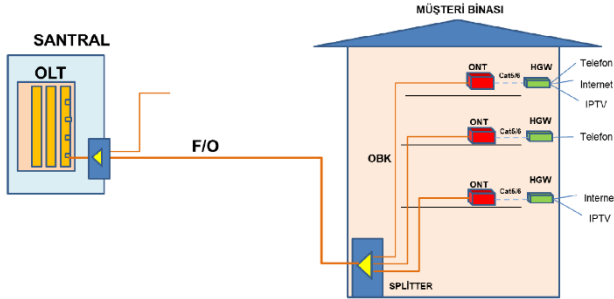
Fiber Zayıflaması (Fiber Attenuation): Sinyalin fiber kablo üzerinde kilometre başına uğradığı kayıptır. Standart tek modlu fiber için bu değer, 1310 nm dalga boyunda yaklaşık 0.35 dB/km, 1550 nm'de ise yaklaşık 0.20 dB/km olarak alınır.

Konnektör ve Ek Kayıpları (Connector & Splice Loss): Her bir fiber bağlantı noktası (konnektör) veya ek noktası, küçük de olsa bir kayıp oluşturur (tipik olarak 0.2 dB/konnektör, 0.05 dB/ek).

GPON standardı genellikle OLT ile ONT arasında maksimum 20 km mesafeyi ve 28 dB'lik toplam optik kaybı destekler. Pratik bir tasarım için, OLT çıkış gücünün +3 ila +5 dBm, ONT alım eşiğinin ise -25 ila -28 dBm aralığında olduğu varsayılır. Bu parametreler, toplam izin verilen kaybı (bütçeyi) tanımlar: Toplam İzin Verilen Kayıp = OLT Çıkış Gücü- ONT Hassasiyeti. Tüm ara kayıpların toplamı bu değeri aşmamalıdır.

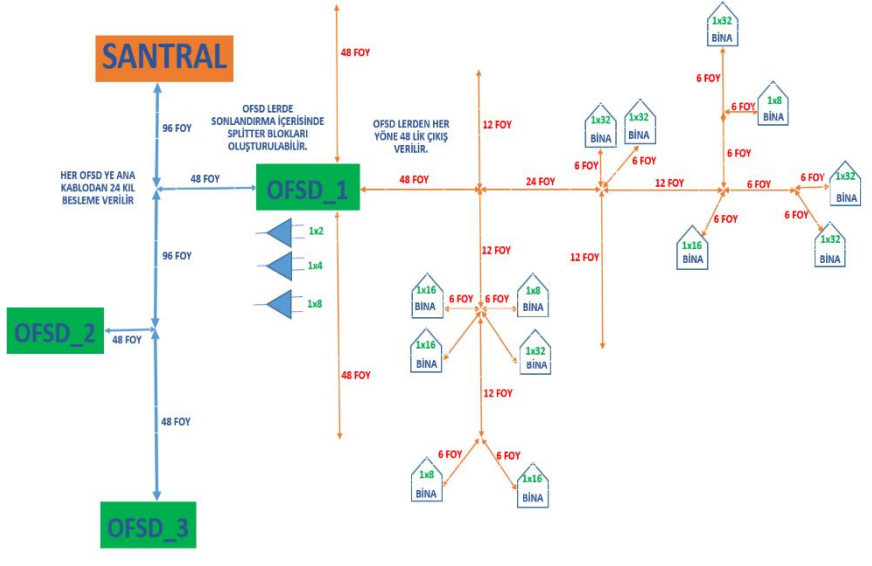
Bu teknik parametreler ve sınırlamalar, Türk Telekom altyapısı üzerinde yürütülen GPON projelerinden edinilen saha deneyimleri ve üretici spesifikasyonları doğrultusunda belirlenmiştir ve kararlı bir FTTH hizmeti sunmanın temelini oluşturur.

Şekil 12 Fiber internet kullanıcısının santrale göre konumlandırılması.



Kaynak: Uzar İ. ve Ünverdi Ö., (2014)

Şekil 13 Niğde ilinde tasarlanmış PON portu üzerinden FttH ağ tasarımı. (FOY, Fiber Optik Yeraltı)



Kaynak: Karacan, T. ve Tezekici, BS (2024).

Şekil 13'te sunulan Niğde ili FTTH ağ topolojisinde, santralden çıkan yüksek kapasiteli fiber kablolar, ilk dağıtım noktaları olan OFSD'lere bağlanmıştır. Tasarım stratejisi olarak, her bir OFSD'ye 24 fiber damarı tahsis edilmiş ve bir sonraki OFSD'ye ise kapasiteyi artırmak için 48 damarlı bir kablo ile devam edilmiştir. OFSD'lerde bulunan optik bölücülere bağlanan bu damarlar, mahalle ve sokak seviyesindeki dağıtım fiberleri üzerinden nihai hedef olan binalara yönlendirilmiştir. Binalara bireysel fiber çekimi yapılırken, çok sayıda daireyi barındıran site projeleri dışında, genellikle düşük damar sayılı ince ve esnek kablolar tercih edilmiştir. Bu tercihin nedeni, tipik bir müstakil veya az katlı binanın mevcut ve gelecekteki ihtiyaçları için 1 veya 2 fiber damarının yeterli olmasıdır. Kabloda bulunan ek damarlar ise, olası bir arıza durumunda hızlı müdahale için yedek olarak planlanmıştır.

Mevcut yaygın GPON teknolojisi, son kullanıcıya simetrik veya asimetrik olarak 1 Gbps'e kadar hız sunabilmektedir. Ancak, teknolojik evrim durmamakta; XG-PON (10 Gbps), XGS-PON (10 Gbps simetrik) ve gelecekte 50G-PON gibi yeni nesil standartlar, farklı dalga boylarını ve gelişmiş modülasyon tekniklerini kullanarak kapasiteyi katlamaktadır. Bu teknolojiler test ve erken dağıtım aşamasında olup, yakın gelecekte ticari kullanıma girmesi beklenmektedir.

Bu artan kapasite, servis sağlayıcıları omurga ağlarını, OLT donanımlarını ve bazen son kullanıcı terminallerini yükseltmek gibi yeni yatırımlara zorlamaktadır. Bu noktada ortaya çıkan temel soru, "Son kullanıcının gerçekten bu seviyelerde bant genişliğine ihtiyacı var mı?" sorusudur. Mevcut 1 Gbps hız, çoğu ev kullanıcısı için 4K/8K video akışı, çevrimiçi oyun ve bulut yedekleme gibi uygulamaları rahatlıkla karşılamaktadır.

İngiltere'de yapılan bir çalışmaya göre, noktadan noktaya FTTH kurulum maliyeti, popüler bir PON mimarisi olan GPON'un kurulum maliyetinden ortalama olarak %15 daha fazla olmaktadır. Aynı şekilde FTTH mimarileri bakır erişim şebekelerine nazaran işletme maliyetlerinin %70 oranlarda düşmesini sağlamaktadır (Uzar İ. ve Ünverdi Ö., 2014).

Yukarıda açıklanan FTTH mimarisi ve tasarım prensipleri, santrale yakın ve yoğun nüfuslu kentsel alanlar için idealdir. Ancak, santralden 20 km'den daha uzaktaki kırsal veya banliyö yerleşimlerinde doğrudan uygulanması teknik ve ekonomik zorluklar barındırır.

GPON standardının optik bütçesi, tipik olarak OLT ile ONT arasında maksimum 20 km mesafeyi ve belirli bir kayıp sınırını destekler. Bu mesafe aşıldığında, sinyal zayıflaması ve bozulması (dispersion) hizmet kalitesini kabul edilemez seviyelere düşürür. Bu gibi durumlarda, uzak yerleşimlere hizmet götürmenin geleneksel

yolu bir transmisyon (backhaul/backbone) altyapısı kullanmaktır. Eğer bölgede daha önceden bakır tabanlı (ADSL/VDSL) internet hizmeti varsa, zaten bu transmisyon bağlantısı mevcuttur, çünkü bakır 20 km'yi aşan mesafelerde çalışamaz.

Yeni bir kırsal yerleşime fiber götürölmek isteniyorsa, önce bölgeye optik transmisyon hattı çekilmesi ve yerel bir OLT noktası (örneğin küçük bir santral veya kabin) kurulması gerekecektir. Bu, ek bir altyapı yatırım maliyeti anlamına gelir. Ayrıca, kırsal alanlardaki yatay/yayılı (horizontal) yerleşim düzeni, FTTH ekonomisini olumsuz etkiler.

Kentsel alanlarda dikey bir binada yüzlerce haneye tek bir fiber girişıyle ulaşılabilirken, kırsalda müstakil evlere ulaşmak için çok daha uzun fiber hatları çekmek gerekir. Bu da hane başına düşen fiber maliyetini önemli ölçüde artırır. Bu zorluklar, kırsal alanlar için optimize edilmiş noktadan noktaya (PtP) fiber, sabit kablosuz erişim (FWA) veya uydu interneti gibi alternatif veya hibrit çözümlerin değerlendirilmesini gerekli kılar.

Sonuçlar

Bu çalışmada, dijital dönüşümle birlikte internetin hayati bir altyapı haline gelmesi ve kullanım senaryolarının çeşitlenmesi sonucunda, telekomünikasyon sektöründeki kullanıcı taleplerinin sürekli artış gösterdiği ortaya konmuştur. Bu artan talebi karşılamak üzere geliştirilen teknolojiler arasında, bakır tabanlı ve fiber optik tabanlı erişim çözümleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve fiber optiğin sunduğu teknik üstünlükler (yüksek bant genişliği, düşük gecikme, elektromanyetik bağışıklık, güvenlik vb.) detaylandırılmıştır.

Çalışmanın odağını oluşturan Fiber Eve (FTTH) erişim modeli, özellikle Pasif Optik Ağ (PON) mimarisi temelinde analiz edilmiştir. Yapılan incelemeler, noktadan çok noktaya (Point-to-Multipoint) topolojinin, noktadan noktaya (Point-to-Point) fiber sistemlere ve geleneksel bakır şebekelere kıyasla hem kurulum (CAPEX) hem de işletme (OPEX) maliyetleri açısından belirgin bir verimlilik sağladığını göstermiştir. FTTH dağıtım mimarisinde kullanılan OLT, OFSD, optik bölücü ve ONT gibi teknik ekipmanların işlevleri ve sistem içindeki rolleri açıklanmıştır.

GPON teknolojisi, küresel ölçekte fiber tabanlı erişim projeleri için bir standart haline gelmiş ve bir dönüm noktası oluşturmuştur. Polonya gibi gelişmekte olan ve kapsamlı bir bakır altyapı mirasına sahip olmayan ülkeler, doğrudan "yeşil alan (greenfield)" yaklaşımıyla geleceğin ağlarını fiber üzerine inşa etme fırsatını değerlendirmişlerdir. Öte yandan, Almanya ve Türkiye gibi halihazırda tam bir konvansiyonel telekomünikasyon altyapısına sahip olan bazı gelişmiş ülkeler, mevcut altyapıyı fibere dönüştürmeye başlamıştır. Bu teknoloji, FTTH ağları için artan abone taleplerine göre gelecekteki uygulamalar için kolayca uyarlanabilir (Onursal, 2012).

Ekonomik analizler, özellikle yüksek nüfus ve abone yoğunluğuna sahip kentsel merkezlerde, FTTH'nin uzun vadede hem işletme maliyetleri hem de toplam sahip olma maliyeti açısından bakıra kıyasla belirgin bir avantaj sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bakır şebekenin kademeli olarak devre dışı bırakılması sonucu ortaya çıkacak bakır geri dönüşüm değeri de dikkate alındığında, FTTH yatırımlarının geri dönüş süresi kısaltmakta ve projeler daha cazip hale gelmektedir. Bu nedenle, FTTH sistemleri, il ve ilçe merkezleri gibi yoğun yerleşim bölgeleri için teknik ve ekonomik açıdan en uygun ve geleceğe dönük altyapı çözümü olarak öne çıkmaktadır.

Kaynakça

Işık, Y. and Kahvecioğlu, A. (2003). *Veri iletim yöntemleri ve optik veri iletiminin aviyonik sistemlerdeki kullanımı*. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 1(2), pp. 91-97.

Karacan, T. ve Tezekici, BS (2024). *Bir FTTH'nin, OFSD kurgusu ile tasarlanması*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13 (4), 1161-1167.

Kayhan, E. (2015). *Dalgaboyu bölmeli çoğullama yöntemini kullanan bir Gigabit Pasif Optik Ağ sisteminin modellenmesi ve performans analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.

MEGEP (2008). *Bilişim teknolojileri, Bakır Kablolar*. Ankara: T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi. Süreli yayın

Onursal, Z. (2012). *Gigabit passive optical networks (GPON) and the network analysis in the fiber to the home (FTTH) project applications in Ankara*. Master Thesis. Çankaya University, Faculty of Electronic and Telecommunication Engineering, Ankara.

Shumate, P. W. (2008). *Fiber-to-the-Home: 1977–2007*. Journal of Lightwave Technology, 26(9), pp. 1093-1103.

Uzar, İ. and Ünverdi, Ö. (2014). *Optik haberleşme sistemlerinde kullanılan FTTX teknolojisi ve uygulamaları*. Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

BÖLÜM 7

GÖMÜLÜ GÜVENLİK

MUSTAFA ENGİN¹

Giriş

Gömülü sistem, belirli bir görevi veya özel bir işlevi yerine getirmek için tasarlanmış elektronik bir bilgisayar sistemidir. Büyük bir mekanik veya elektrik sisteminin parçasıdır. Gömülü sistemler, ulaşım, enerji sektörü, yeşil binalar, tıbbi ekipmanlar ve endüstriyel makineler gibi birçok cihaz ve ekipman türünde işlev, kontrol veya üretim sistemleri için kullanılır. Hayati fonksiyonları kontrol etme eğiliminde olduğu ve ağlara her zamankinden daha fazla bağlı olduğu için koruyucu önlemlere ihtiyaç duyar, bu nedenle korsanlığa karşı savunmasız hale gelir. Gömülü sistemlerdeki güvenlik ihlalleri, maddi kayıplar, gizlilik ihlalleri ve hatta fiziksel zararlar gibi ciddi sonuçlara yol açabilir. Gömülü sistemlerin güvenliğini sağlamak, bireyleri, kuruluşları ve toplumu bir bütün olarak korumak için çok önemlidir. Gömülü sistem güvenliği, gömülü sistemleri yetkisiz erişim, değişiklik veya tahribattan korumak için alınan önlemleri ifade eder. Gömülü sistemlerle ilişkili güvenlik riskleri arasında kötü amaçlı yazılımlar, bilgisayar korsanlığı, fiziksel saldırılar ve yazılım güvenlik açıkları bulunur. Gömülü sistemler, şifreleme ve kimlik

¹ Doçent Dr., Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Orcid:0000-0001-7247-4545

doğrulama önlemleri uygulanarak, kritik işlemlere erişim sınırlandırılarak, güvenli önyükleme süreçleri uygulanarak ve yazılımlar düzenli olarak güncellenip yamalanarak güvenli hale getirilebilir.

Gömülü sistemler, IoT cihazları ve akıllı uçların kullanım alanları ve yeni kullanım örnekleri arttıkça, saldırı düzeyi ve güvenlik ihlallerinin potansiyeli de artmaktadır. Küçük IoT ev termostatlarından en fabrikadaki makinaların bakım gereksinimini izleyen ve verileri buluta aktaran gömülü sistemlere kadar, bağlı her cihaz, siber saldırılar tarafından istismar edilebilecek bir veya daha fazla potansiyel giriş noktasına sahiptir (Akyaz & Engin, 2024). Halihazırda milyarlarca cihaz bağlı durumda ve on milyarlarca cihaz daha eklenecekken, cihazların güvenliğini sağlamak ve ürettikleri verileri korumak zorunludur. Gömülü sistem güvenliği, üretilen cihazların ve bu cihazların ürettiği verilerin tehditlere maruz kalma riskini sınırlamak için benimsedikleri bir tasarım yöntemi, uygulama ve taahhüttür. Gömülü cihazların güvenliği, tüm yaşam döngüsü boyunca sorumluluk gerektirir. İlk kod satırı yazılmadan çok önce başlar, cihazın saldırganların eline geçmesi durumunda koruma sağlar ve cihaz hizmet dışı kalana kadar devam eder. Güvenlik politikası, tasarım, test, teslimat, bakım ve kullanım ömrü sonunda hizmetten çıkarılma dahil olmak üzere ürünün ve verilerinin tüm yaşam döngüsü boyunca güvenlik ihtiyaçlarını ele almak için yazılı ve üzerinde anlaşmaya varılmış bir strateji ve plandır.

Bilişim teknolojisi sistemlerine benzer şekilde, gömülü güvenlik politikası da politika geliştirme modeli olarak gizlilik, bütünlük ve kullanılabilirlik (CIA) üçlüsünü kullanır. CIA üçlüsü, bir cihazı yetkisiz erişim, kullanım, ifşa, bozulma, değiştirme veya imha işlemlerinden korumak için gerekli ilkeleri tanımlar. Uluslararası standartlarla güvenlik modelinin sınırları tanımlanmış ve ISO/IEC 15408-1 numarası ile “Information security, cybersecurity and privacy protection - Evaluation criteria for IT security” başlığında

2022 yılında yayınlanmıştır (ISO/IEC 15408-1, 2022b). Bu model, geliştirme ekiplerinin projelerinin güvenlikle ilgili farklı yönlerini düşünmelerine yardımcı olur.

Avrupa birliği (AB) siber güvenlik yasası 2024 yılında yürürlüğe girmiştir. 2027 yılında ilk yaptırımlar uygulanacaktır. CRA (Cyber Resilience Act) dijital unsurlar içeren yazılım veya donanım ürünleri satın alan tüketicileri ve işletmeleri korumayı amaçlamaktadır. CRA, birçok üründe yetersiz siber güvenlik düzeyini ve zamanında güvenlik güncellemelerinin yapılmamasını ele almaktadır. Ayrıca, tüketicilerin ve işletmelerin hangi ürünlerin siber güvenlik açısından güvenli olduğunu belirlemeye ve bunları güvenli bir şekilde kurmaya çalışırken karşılaştıkları zorlukları da ele almakta ve uygun siber güvenlik özelliklerine sahip donanım ve yazılımları tanımlamayı kolaylaştırmaktadır. CRA, üreticiler için bu tür ürünlerin planlanması, tasarımı, geliştirilmesi ve bakımını kapsayan zorunlu siber güvenlik gereklilikleri getirir. Bu yükümlülükler, değer zincirinin her aşamasında yerine getirilmelidir. CRA ayrıca, üreticilerin ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca güvenlik açıklarını ele almasını gerektirir. Siber güvenlikle özellikle ilgili bazı ürünlerin, AB pazarında satılmadan önce bir onaylanmış kuruluş tarafından üçüncü taraf değerlendirmesi yapılmasına gerek olabilir. Ürünler, CRA gerekliliklerine uygun olduklarını belirtmek için CE işaretini taşıyacak ve ulusal piyasa gözetim otoriteleri kuralların uygulanmasını sağlayacaktır (Cyber Resilience Act (EU), 2024).

Gömülü Sistemlerin Özellikleri

Gömülü sistemler, diğer makinelerin ve cihazların içinde bulunan küçük, özel bilgisayarlar gibidir. Her türlü işi yapabilen normal bilgisayarlar gibi değildirler. Bunun yerine, tek bir işi veya birkaç özel görevi vardır. Onları özel kılan özellikler şöyle sıralayabiliriz.

- Gömülü sistemler kullandıkları fiziksel sistemin gereksinimine göre bir işlemci birimi, bellek, sensörler ve yapmaları gereken işe göre hareket eden veya ayarlanan parçalar gibi özel donanıma sahiptirler.
- Gömülü sistemler yüksek oranda gerçek zaman kısıtlamasına sahiptirler. Bilgileri hızlı bir şekilde alıp işledikten sonra öngörülen süre içerisinde mantıksal olarak doru yanıt verebilmelidirler, bu da otomobillerdeki hava yastıkları gibi şeyler için çok önemlidir.
- Kullanılan işlemci birimi özel ve kısıtlı bellek alanına sahip olduğu için çoğunlukla düşük seviyeli dil olan assembler dilinde program yazılır. Eğer boyut orta ve üzeri ise gömülü c veya gömülü C++ programlama dilleri kullanılabilir.
- Gömülü sistemler bilgi paylaşmak veya güncellemeleri almak için internete veya diğer cihazlara bağlanabilirler.
- Kaynaklar genellikle kısıtlıdır, fiziksel boyut, tüketilen enerji ve maliyet kısıtları genellikle baş edilmesi gereken en önemli zorluklardır.

Bu sistemleri kalp monitörleri, arabalar, robotlar ve hatta buzdolabınız gibi her türlü cihazda bulabilirsiniz. Gerçek dünyada çalışırlar ve arka planda sessizce önemli işler yaparlar. Gömülü sistemler diğer bilişim sistemlerinden farklı kendilerine özgü bir dizi özelliğe sahiptirler. Bu özellikler, güvenliğini sağlamak için kullanılacak yöntemleri kısıtlar. Bu özellikleri kısaca açıklayacak olursak;

- Kısıtlı kaynağa sahip olmaları: Güç ve bellekleri sınırlıdır, bu nedenle herhangi bir güvenlik önlemi onları yavaşlatmamalı veya çok fazla yer kaplamamalıdır.

- Gömülü sistemlerin büyük çoğunluğu aynı zamanda gerçek zamanlı sistemlerdir: gerçek zamanlı sistemler görevlerini önceden öngörülen sürede mantıksal olarak doğru bir şekilde tamamlamak zorundadırlar. Güvenliği sağlayacak kod eklemek genellikle kod işleme süresini uzataca ı için öngörülen sürede görevi tamamlaması güç olacaktır. Görevin zamanında tamamlanması çoğunlukla yaşamsal kritik uygulamalarda ölümcül sonuçlar doğuracaktır.
- Kullanım sürelerinin uzun olması: Uzun süre dayanacak şekilde üretildikleri için, yıllar boyunca güvenliğini sağlamak zor bir i tir. Yeni ortaya çıkan siber saldırıları önceden öngörmek zor olduğundan önlem almak mümkün değildir. Servis süresi a ıldığında genellikle üreticiler güncelleme desteğini sonlandırmaktadırlar.
- Fiziksel süreçlerle etkileşimli  alı maları: Bir sorun olduğunda, gerçek zararlar meydana gelebilir, bu nedenle güvenlik çok önemlidir. Güvenlik kodu eklemek veya güncellemek için gerekli standartları sağladıklarını belgelemeleri gerekir. Bu işlem genellikle uzun süreç gerektirdiğinden birçok üretici bu işlemlerle maliyet veya zaman gibi nedenlerden dolayı yeterli çabayı göstermezler.
- Zorlu  alı ma ortamları: Aşırı sıcaklıklar veya tozlu ortamlar gibi zorlu koşullarda bile çalışmaya devam etmeleri gerekir.

Bu cihazların güvenliği akıllı ve verimli olmalı, dar alanlara sı malı, çok hızlı çalışmalı ve cihazlar kadar uzun ömürlü olmalıdır.

Gömülü Güvenlik

Gömülü sistem güvenliği, yazılım ve donanım bileşenlerini yetkisiz erişim ve kötü niyetli saldırılardan korumayı içerir. Gömülü sistemler, enerji santralleri, yerel kamu hizmetleri ve güvenlik sistemleri dahil olmak üzere günlük hayatımızın kritik yönlerini giderek daha fazla kontrol ettikçe, sağlam gömülü güvenlik önlemlerine olan ihtiyaç da önemli ölçüde artmıştır. Bu geçiş, fiziksel donanım güvenliği, güvenli önyükleme süreçleri, şifreleme ve güvenli iletişim protokollerini kapsayan kapsamlı bir güvenlik yaklaşımını gerektirmektedir.

Gömülü sistemler için güvenlik gereksinimleri, operasyonel işlevsellik ve risk toleransına göre farklılık gösterir. Bir cihaz, görev veya güvenlik açısından kritik bir işlev yerine getiriyorsa, güvenlik gereksinimleri daha kapsamlı olacaktır. Bir cihaz insanları tehlikeye atmasa bile, veri veya manipülasyon amacıyla hacklenebilir. Her gömülü proje için bir güvenlik değerlendirmesi ve planı olmalıdır. Ürünün tasarımından dağıtımına ve hizmetten çıkarılmasına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca bir güvenlik planı uygulanmalıdır. Güvenlik planı, şirketin risk toleransı ve cihazın operasyonel hedeflerine dayalı olmalıdır. Planlar, ortaya çıkan güvenlik sorunlarını ele almak için sürekli izleme ve güncelleme sürecini içermelidir.

Her gömülü bir proje onaylanıp başlatılmadan önce bir güvenlik politikası oluşturulmalıdır. Güvenlik politikası, tasarım, test, teslimat, bakım ve kullanım ömrü sonunda hizmetten çıkarılma dahil olmak üzere ürünün ve verilerinin tüm yaşam döngüsü boyunca güvenlik ihtiyaçlarını ele almak için yazılı ve üzerinde anlaşmaya varılmış bir strateji ve plandır. Proje ekipleri, ürünlerini etkileyen bir güvenlik ihlaliyle ilişkili riskleri tam olarak anlamalıdır. Ayrıca, tek tek cihazlar, cihazlar arası iletişim, ağ ve veriler için güvenlik gereksinimleri üzerinde anlaşmaya varılmalıdır.

Siber Güvenlik ve Gömülü Güvenlik

Siber güvenlik, bilişim sistemlerini, ağları ve programları dijital saldırılardan korumak amacıyla geliştirilen uygulamalardır. Bu siber saldırılar genellikle hassas bilgilere erişmek, bunları değiştirmek veya yok etmek, fidye yazılımı yoluyla kullanıcılardan para sızdırmak veya normal iş süreçlerini kesintiye uğratmak amacıyla gerçekleştirilir. Günümüzde etkili siber güvenlik önlemleri uygulamak özellikle zordur, çünkü insanlardan daha fazla cihaz vardır ve saldırganlar giderek daha yenilikçi hale gelmektedir. Başarılı bir siber güvenlik yaklaşımı, güvende tutulması istenen bilgisayarlar, ağlar, programlar veya veriler üzerinde yayılmış çok katmanlı bir koruma sağlar. Bir kuruluşta, birleşik tehdit yönetimi ağ geçidi sistemi, ürünler arasında entegrasyonları otomatikleştirebilir ve temel güvenlik operasyonları işlevlerini (tespit, soruşturma ve düzeltme) hızlandırabilir. Siber saldırılara karşı etkili bir savunma oluşturmak için insanlar, süreçler ve teknoloji birbirini tamamlamalıdır.

Siber güvenlik uygulaması bilişim teknolojilerini korumak için geliştirilmiş uzman uygulamalardır. Tehditlerin şekli, büyüklüğü, hedefi ve kaynakları sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu tehditlerle başa çıkabilmek için siber güvenlik uygulamaları sürekli güncellenmelidir. Siber güvenlik uygulamaları genellikle bilişim teknolojisi cihazlarda geniş bir yer kaplarlar ve bazen tehditler ile başa çıkabilmek için işlemci gücünün büyük bir kısmını kullanmak zorunda kalırlar. Kısıtlı kaynaklara ve işlemci gücüne sahip gömülü sistemlerde düzenleme yapmadan siber güvenliği sağlamak zordur. Gömülü sistemin kendine özgü bazı özellikler içermesi gömülü güvenlik uygulamasının bazı açılardan siber güvenlik uygulamalarından farlılık göstermesine neden olur. Tablo-1'de gömülü güvenlik ile siber güvenlik uygulamalarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo-1. Gömülü güvenlik ve siber güvenliğin karşılaştırılması.

	Gömülü Güvenlik	Siber Güvenlik
Odak Noktası	Belirli görevlere adanmış gömülü sistemleri korumak.	Bilgisayar sistemlerini, ağları ve verileri dijital saldırılardan korumak.
Sistem �zellikleri	Kaynakları sınırlı, sınırlı hesaplama gücü ve depolama alanına sahip.	Daha fazla kaynağa sahip, ölçeklenebilir, çeşitli ihtiyaçlara uyarlanabilir.
Tehdit Ortamı	Cihazlara doğrudan erişim nedeniyle hem fiziksel hem de yazılım tehditleriyle karşı karşıya.	AĞ üzerinden çoğunlukla yazılım tehditleri ve saldırıları.
Güvenlik �nlemleri	Performans için optimize edilmiştir, genellikle donanım tabanlı ����mler gerektirir.	Güvenlik duvarları ve antivirüs programları gibi yazılım tabanlı ����mlerin yaygın kullanımı.
Zorluklar	Performansı etkilemeden sınırlı kaynaklarla güvenliği dengelemek.	Geniş ve sürekli gelişen siber tehdit ortamında yolunu bulmak.
Uygulama	Başlangıçtan itibaren donanım ve yazılıma entegre edilmiştir.	Güvenlik �nlemleri kolaylıkla eklenebilir, güncellenebilir veya deĐiŐtirilebilir.
Örnekler	Güvenli �ny�kleme, donanım tabanlı şifreleme ve fiziksel kurcalama algılama.	AĞ güvenlik protokolleri, şifreleme algoritmaları ve siber güvenlik �er�evesleri.

Gömülü Sistemlerin Karşılaştıkları En Yaygın Tehditler

Elektronik posta ile veya web sayfalarından indirilen veri veya program parçalarına eklenerek gelen kötü amaçlı yazılım gömülü yazılımının açık bir noktasını gözetleyerek denetimi ele geçirir ve saldırı hedefine bağlı olarak kimlik bilgilerinin  alınması, kritik verilerin  alınması veya sistemin ana işlevini kendi istediği yönde değiştirilmesi gibi sonuçları ortaya çıkar.

İkinci en yaygın ortaya çıkan tehdit, yazılım korsanlarının gömülü sistemden ağ üzerinden sistemin kaldıramayacağı yoğunlukta hizmet istemi bulunarak başkalarının sistemi kullanmasını engellemek şeklinde olacaktır. Bu istekler genellikle birden fazla sanal kaynaktan gönderilerek kaynağın belirlenmesini ve önlem alınmasını geciktirmeye çalışılır. Basit bir işlem gibi görünse de sistemi kullanan ve işletenlere büyük zararlar verebilir.

Bilinen güvenlik açıklarının istismar edilerek saldırı düzenlenmesi, yeni belirlenen güvenlik açıklarını üreticilerin hızlı bir şekilde kapatamamaları durumunda korsanlar daha hızlı davranarak istedikleri bilgileri çalabilir veya sistemi kullanıma kapatabilirler. Gömülü sistemlerde cihazlar arası veri aktarımında veriler korunmuyor ise genellikle haberleşmenin daha hızlı olması ve paketlerin boyutlarının daha küçük olması için şifreleme kullanmak istenmeyebilir. Bu durumu fark eden korsanlar verileri çalabilir veya zararlı veriler ile değiştirebilir. Tersine mühendislik: Bazen korsanlar, özel kodlar veya anahtarlar gibi sırları bulmak için cihazları fiziksel olarak parçalara ayırır. Bu sırları güvende tutmak için gömülü sistemlerin fiziksel olarak da güvenli bir yerde tutulması veya kod koruması eklenmesi gerekir.

Gömülü Sistemlere Özgü Güvenlik Açıkları

Gömülü sistemlerin yapısından kaynaklanan bazı zayıf noktaları vardır.

- Zayıf varsayılan kimlik bilgileri: Birçok cihaz, tahmin edilmesi kolay şifrelerle gelir. Bu şifreleri değiştirmek zorunludur.
- Güvenli olmayan veri depolama: Cihazlarda depolanan önemli bilgiler, birisi girmeye çalışırsa güvende kalması için şifreleme ile kilitlenmelidir.

- Şifreleme eksikliği: Depolanan verilerin veya gönderilen verilerin korunmaması, bunları bilgisayar korsanlarına açık hale getirir. Güçlü şifreleme kullanmak çok önemlidir.
- Güvenlik açığı olan kod: Cihazın yazılımındaki hatalar veya kusurlar gibi sorunlar, bilgisayar korsanlarının girmesine neden olabilir. Bu sorunlara dikkat etmek önemlidir.
- Güvenli olmayan arayüzler: Cihazlarda bırakılan bazı geliştirme araçları, bilgisayar korsanlarına derin erişim sağlayabilir. Bunları kapatmak, cihazın güvenliğini sağlamaya yardımcı olabilir.
- Yama uygulanmamış yazılım: Cihazı güncellemenin bir yolu yoksa, cihaz sonsuza kadar saldırılara açık kalabilir. Güncellemeleri nasıl göndereceğinizi planlamak önemlidir.

Bu riskleri bilerek, geliştiriciler cihazlarına baştan itibaren daha güçlü bir güvenlik sistemi kurabilirler. Dikkatli olmak ve iyi güvenlik uygulamalarını takip etmek, yazılım korsanlarının bir adım önünde olmak için çok önemlidir. Gömülü güvenlik, cihazın bileşenlerini ve yazılımını korumak için tasarlanmıştır. Donanımı, işletim sistemini, uygulamayı ve verileri korumak için özellikler içerir. Siber güvenlik, bir cihazı ağ kaynaklı saldırılardan koruyan ek güvenlik özelliklerini ifade eder. Her iki güvenlik türü de gömülü sistemler, IoT ürünleri ve akıllı uç cihazlar için gereklidir.

Güvenli Gömülü Sistem Tasarım İlkeleri

Gömülü sistemlere sahip cihazlar üretirken, başlangıçtan itibaren güvenliği düşünmek çok önemlidir. Bunu doğru şekilde yapmanın yolları şunlardır:

- Gömülü sistemin donanım ve yazılım yapısını görevini tam anlamıyla getirebilecek şekilde basit tasarlayın. Gereksiz ayrıntılardan kaçının. Cihazınız ne kadar az karma ıksa, yazılım korsanlarının sızma  ansı o kadar az olur. Gerekli olanlara sadık kalın ve geri kalanını çıkarın.
- Sistemi yaptıkları görevleri gözeterek parçalara bölün ve her bölümü ayrı koruyun. Böylece bir parça saldırıya u radı ında geri kalanı güvende kalabilir. Bu, tek bir kapı yerine birden fazla kilitli kapıya sahip olmak gibidir.
- Sistemi tasarlarken arıza olu tu unda sisteminiz kendisini kilitlesin ve böylece dış saldırılardan korumu  olursunuz. Saldırıya açık olmaktansa kapatmak daha iyidir.
- Sistemin her parçasını ayrı ayrı erişim sınırı getirin. Sisteminizin her bir parçasının sadece kendi i ini yapmasına izin verin, daha fazlasını değil. Bu şekilde, bir şey tehlikeye girse bile, hasar sınırlı kalır.
- Kimlerin konu tu unu kontrol edin. Sisteminizin bir parçası diğer bir parçayla iletişim kurdu unda, bunların gerçekten kim olduklarını söyledikleri kişiler olduğundan her zaman emin olun. Bu, dış saldırıları başlangıçta durdurur.
- Sisteminizin aldığı tüm bilgilerin tam olarak olması gerektiği gibi olduğundan emin olun. Bu, kötü amaçlı unsurların arka kapıdan girmesini engellemeye yardımcı olur.

Cihazınız için doğru parçaları seçmek, güvenliğini sağlamak açısından çok önemlidir:

- Donanım seçiminde güvenlik yazılımını kolaylaştıracak özelliklere sahip olanlarını tercih edin. Temel unsurlara

sadık kalın. Her ekstra parça, yazılım korsanları için bir fırsat daha demektir.

- Dışarıdan gelen sürücü yazılımlarını kullanmadan önce dikkatlice inceleyin ve test edin. Başkaları tarafından üretilen yazılımları kullanmak riskli olabilir. Bu yolu seçerseniz, güvenli olduğundan emin olmak için yazılımı ayrıntılı olarak inceleyin veya güvenliği kanıtlanmış yazılımları kullanın.
- Güvenli bir işletim sistemi seçin. Bazı işletim sistemleri daha güvenli olacak şekilde tasarlanmıştır. Özellikle sizin cihazınız gibi cihazlar için tasarlanmış olanları arayın.
- Sisteme güvenliği artırıcı özel güvenlik tümdevreleri ekleyin. Bu tümdevreler, cihazınızı güvenli bir şekilde başlatmanıza, cihazın gerçekten sizin cihazınız olduğunu kanıtlamanıza ve verilerinizi gizli tutmanıza yardımcı olur.
- Güvenilir platform modülleri kullanın. Bunlar, cihazınızın en önemli sırlarını kurcalanmaya karşı koruyan kasalar gibidir.

Bu adımları izleyerek ve parçalarınızı dikkatlice seçerek, yazılım korsanlarının kırması zor bir cihaz oluşturabilirsiniz.

Gömülü İletişim Güvenliği

Gömülü cihazların dış dünya ve birbirleriyle iletişim kurma şeklinin güvenli olmasını sağlamak çok önemlidir. Bu, erişim hakkı olmayan kişilerin sisteme girmesini veya sistemle oynamasını engeller.

USB, Ethernet, WiFi ve hücresel bağlantılar gibi harici arayüzler, gömülü sistemlerin diğer ağlar ve cihazlarla iletişim

kurmasını sağlar. Saldırganları uzak tutmak için bu bağlantıları güvenli hale getirmek çok önemlidir.

İhtiyacınız olmayan bağlantıları kapatın. Kullanmıyorsanız bile, bunlar yine de risk oluşturabilir. Bu bağlantılarda yalnızca güvenilir trafiğin geçmesine izin vermek için güvenlik duvarları kullanın. Diğer her şeyi engelleyin. Bu bağlantılar üzerinden gönderilen tüm verilerin şifreli olduğundan emin olun, böylece kimse bu verileri gizlice göremez veya değiştiremez. Sertifikalar veya özel anahtarlar gibi araçları kullanarak bağlantının her iki ucunun da kimliklerinin doğru olduğunu kontrol edin. Birinin sisteme girmeye çalıştığını gösterebilecek garip trafik hareketlerini takip edin.

Gömülü bir sistemde, farklı parçalar dahili kanallar aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurar. Bunların da korunması gerekir. Tüm dahili sohbetleri gizli tutmak için şifreleme kullanılmalıdır. Kimlik doğrulama kullanarak mesajların gerçekten güvenilir parçalardan geldiğinden emin olun. Saldırganların erişimini sınırlamak için en önemli parçaları ayrı kanallarda tutun. Yetkisiz erişim belirtileri için dahili trafiği yakından izleyin.

Tablo-2. Dahili haberleşme protokolleri.

Protokol	Kimlik Doğrulama	Şifreleme	Dayanıklılık
CANbus	✗	✗	Düşük
ZigBee	✓	✗	Orta
Bluetooth LE	✓	✓	Yüksek
LoRaWAN	✓	✓	Yüksek

Güvenli Önyükleme

Güvenli önyükleme, cihazınız başlatıldığında yalnızca kurcalanmamış yazılımları kullandığından emin olmanın bir yoludur. Bunu, kapıda kimlik kontrolü yapan bir güvenlik görevlisi gibi düşünün. Cihaz, yerleşik ve değiştirilemeyen özel bir anahtar

veya sertifika ile başlar. Bu, yazılımı kontrol etmek için kullanılır. Yazılım oluşturulduğunda, üreticiden onay mührü gibi bir tür dijital imza alır. Cihazı açtığınızda, yazılımın imzasını kontrol ederek özel anahtarla eşleştirdiğinden emin olur. Her şey uygunsa, cihaz başlatılır. Aksi takdirde çalışmaz. Bu şekilde, yalnızca kontrolü geçen yazılımlar cihazınızda çalışabilir.

Güvenli OTA Firmware Güncellemeleri

OTA güncellemeleri, yazılım güncellemelerini internet üzerinden doğrudan cihazlara göndermenizi sağlar. Bu güncellemelerin güvenliğini sağlamak önemlidir. Tüm güncellemeler, güvenilir üreticiden alınan dijital imzaya ihtiyaç duyar. Bu, güncellemenin meşru olduğunu kanıtlar. Güncelleme işlemi şifrelenmeli ve veriler meraklı gözlerden korunmalıdır. İndirdikten sonra, cihaz güncellemeyi yüklemeyi önce imzayı kontrol eder ve güncellemenin tahrif edilmediğinden emin olur. Geri alınamayan bir sayaç kullanmak, kimsenin cihaza eski, daha az güvenli yazılım sürümlerini yüklemesini engeller. Bu adımları izleyerek, yazılım güncellemelerini güvenli ve güvenilir tutabilirsiniz.

Davranış İzleme ve Analizi

Gömülü sistemler çalışmaya başladıktan sonra bile tehditlerle karşı karşıya kalmaya devam ederler. Kötü davranışları yakalamak için sürekli izlenmeleri gerekir. Anormallik algılama izlemesi yapılmalıdır. Bu, sistemde neyin normal olduğunu bilmek ve garip bir şey olduğunda bunu tespit etmekle ilgilidir. Bunu, tanıdığınız birinin düzenli bir toplantıya aniden katıldığını fark etmek gibi düşünün. Makineler neyin normal olduğunu öğrenebilir ve bir sorun olduğunda sizi uyarabilir. İmza tabanlı algılama kullanılmalıdır. Bu yöntem, bilinen saldırı modelleri ve kötü yazılım davranışlarını bir kontrol listesi olarak kullanır. Bu, bilinen sorun çıkaranların bir listesini tutmak ve herkesi bu listeye karşılaştırmak

gibidir. Ancak, listenin yeni sorun çıkaranlarla güncel tutulması gerektiğini unutulmamalıdır. Sezgisel analiz, birinin güvenliği atlatmaya çalışması gibi şüpheli görünebilecek davranışları inceler. Bu, onların ne yapacağını tam olarak bilmekle ilgili değil, kötü bir şey yapmaya çalıştıklarını fark etmekle ilgilidir. Bu yöntemleri birlikte kullanmak, gözden kaçabilecek sorunları yakalamaya yardımcı olur. Garip bir şey fark edilirse, bu hemen durdurulabilir veya birisi bunu kontrol etmesi için uyarılabilir.

Yazılım Geliştirmede Güvenlik

Kodların geliştirildiği, test edildiği ve derlendiği yazılım geliştirme altyapısı, iç veya dış kötü niyetli aktörlerin fırsat bulmaması için ekstra güvenlik önlemleri gerektirir. Birçok gömülü yazılım geliştiricisi, yazılım geliştirme araçlarını ve birden fazla kaynaktan gelen sürücü dosyalarını kullanır. Bu araçlar ve sürücü dosyaları yalnızca güvenilir kaynaklardan gelmeli ve bir yazılım malzeme listesi içermelidir. Geliştirme ortamının bileşenleri, sistemin güvenlik politikasını ihlal eden yaygın Güvenlik Açıkları ve maruz kalma durumları ve olaylar açısından aktif olarak izlenmelidir. Ayrıca, geliştirme altyapısı, yalnızca yetkili kişilere sıkı kimlik yönetimi ve erişim koruması sağlamalıdır. Sistem içindeki ayrıcalıklı eylemler, birden fazla tarafın onayı ve performansını gerektirmelidir.

Donanımda Güvenlik

Gömülü cihazlar için kullanılan yazılım ve donanım, yerleşik güvenlik işlevleri içerebilir. En yaygın olarak etkinleştirilen donanım güvenlik özelliklerinden bazıları arasında güvenli önyükleme, doğrulama, şifreleme işleme, rastgele sayı üretimi, güvenli anahtar depolama, fiziksel kurcalama izleme ve JTAG koruması bulunur. Donanım özelliklerinden tam olarak yararlanmak için, işletim sistemi yazılımının altta yatan işlemcinin mimarisine özgü aygıt

sürücülerine ihtiyacı vardır. İşletim sistemi yazılımı da yerleşik güvenlik işlevleriyle birlikte gelebilir.

Arm Platform Security Architecture (PSA) Sertifikası, tatmin edici bir düzeyde uygulandığında resmi olarak güvenli olduğu varsayılan önerilen güvenlik gereksinimlerini sunar (ARM, 2025). Bağımsız bir güvenlik değerlendirmesi ile sertifikalandırılan üç güvenlik düzeyi vardır. Önemli bir unsur, TrustZone kullanan Armv8-M tabanlı MCU'lar için mümkün olan, ancak çok çekirdekli Armv7-M tabanlı sistemler için de mümkün olan ek işlem yalıtımı gereksinimidir. PSA Sertifikalı Çerçeve güvenlik tasarımını ve uygulamasını basit dört adımlı bir sürece ayırır. PSA Tehdit Modelleri ve Güvenlik Analizi (TMSA), Değerlendirme Hedefi (TOE) için bir dizi Güvenlik İşlevsel Gereksinimi (SFR) belirleyen Koruma Profili'nin Ortak Kriterler yaklaşımına dayanır.

Gömülü sistemlerde tüm işletim sistemi hizmetlerini içeren büyük bir güvenilir bilgi işlem tabanı (Trusted Computing Block, TCB) kullanıcı alanına yerleştirilir. Büyük TCB yaklaşımı, görünüşte doğru olsa da arka kapı kodlarına karşı hiçbir koruma sağlamaz, başkaları tarafından üretilen çekirdek kodunun kullanımını zorlaştırır ve güvenlik denetimlerini karmaşıklarlaştırır. Kullanıcı alanındaki işletim sistemi hizmetleri, kullanılabilirlik ve verimlilik açısından bir maliyet getirir. Çekirdek kodu için iki güven katmanı sağlayan bir modelin modern gömülü yazılım uygulamalarına daha uygun olduğunu araştırmalarla ortaya konmuştur (Ayers et al., 2022).

SAM (Security Abstraction Model) başlangıçta otomotiv sektörü için güvenlik unsurlarını yazılım mühendisliği süreçlerine entegre etmek amacıyla geliştirilmiş olsa da, Fischer ve arkadaşlarının yaptığı araştırma bulguları SAM'ın diğer alanlarda da uygulanabilir olduğunu göstermiştir. SAM, otomotiv güvenliğinin özel gereksinimlerine yaklaşımını uyumlu hale getirirken, ISO/SAE 21434 ve IEC 62443-3-2 gibi uluslararası standartlarla uyumluluğu

da sağlayarak, risk değerlendirme ve azaltma için sağlam bir teknik olduğunu kanıtlamıştır. SAM varlıklarının entegrasyonu, çeşitli standartlara uyumu sağlar, güvenlik mühendisliği sürecini iyileştirir ve genel sistem istikrarını artırır. Bir sonraki adım, SAM uygulamasının kapsamlı araç desteğini sağlamak, yeni bütünleştirilen puanların otomatik olarak hesaplanmasını sağlamak ve modellenen verilere dayalı raporlamayı basitleştirmektir. Bu geliştirme, uygulama sürecini basitleştirmekle kalmayacak, aynı zamanda güvenlik değerlendirmelerinin verimliliğini ve doğruluğunu artıracak ve otomotiv sistemlerinin ve endüstriyel sektörlerdeki diğer gömülü sistemlerin siber güvenliğini artıracaktır. (Fischer & Kolagari, 2024)

Dragusin ve arkadaşları gömülü sistemlerin kendi özel ortamlarında maruz kaldıkları tehditlerin karmaşıklığını ve çeşitliliğini incelemişlerdir. İletişim kanallarının analizi yoluyla, gömülü sistemlere özgü güvenlik açıklarını ve saldırganlar tarafından istismar edilebilecek zayıflıkları ortaya koymuşlardır. İletişim kanallarını hedef alan çeşitli saldırı teknikleri verilmiştir; bunlar arasında iletişimin kesilmesi, MitM saldırıları, kimlik doğrulamanın kaldırılması, SIM kart klonlama bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, gömülü sistemlerin maruz kaldığı tehditlerin karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Bu saldırı tekniklerinin gömülü sistemlerin güvenliği üzerinde yaratabileceği önemli etkiyi ve veri gizliliği, bütünlüğü ve kullanılabilirliği üzerinde olası olumsuz sonuçları hakkında bilgi paylaşmışlardır. Bu saldırılara karşı alınabilecek önlemler arasında iletişimin şifrelenmesi, sağlam kimlik doğrulama, sürekli izleme yer almaktadır. Yazarlar araştırmadan elde ettikleri bulgular eşliğinde, saldırıları tespit etmek için daha gelişmiş yöntemlerin belirlenmesi, yeni teknolojilerin birleştirilmesi ve güvenlik çözümleri geliştirmek için akademik ile endüstri arasındaki iş birliğinin geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. (Dragusin et al., 2024).

Nesnelerin İnternet'inin (IoT) yaygınlaşması birbirine bağlı gömülü sistemlerin sayısında artışa neden olmuştur. Bu sistemlerin sınırlı kaynakları ve sınırlı güvenlik mekanizmaları nedeniyle doğası gereği savunmasızdır. Barredo ve arkadaşları, gömülü sistemlerdeki güvenlik açıklarını yüksek doğrulukla tespit etmek için Side-Channel Analysis (SCA) temelli güç tüketimi analizinden yararlanan yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemi farklı boyutlarda donanım üzerinde test etmişler ve sonuçlarını paylaşmışlardır (Barredo et al., 2025).

Hao ve arkadaşları gömülü sisteme iletişim kanalları üzerinden yapılan saldırıları belirlemek için koşullu dallanma komutlarının dallanma değerleri ve önceden kaydedilen dallanma adreslerini her 80 saat periyodunda karşılaştırarak hatalı değer bulduğunda sistemi kilitleyerek saldırılara karşı korumayı önermişlerdir. Önerdikleri yöntemi FPGA ile tasarladıkları gömülü sistemde test etmişler ve bulgulara göre başarılı bir şekilde saldırılar durdurulmuştur (Hao et al., 2024).

Mobil kenar bilişim (MEC) sistemlerinde temel mekanizma olan görev aktarma stratejisi, MEC sistemleri tarafından sağlanan bilişim hizmetlerinin kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. İş akışı uygulamalarıyla uğraşırken, görevler arasındaki öncelik ilişkileri görev aktarma stratejilerinin geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu makale, MEC ortamında iş akışı uygulamaları için güvenlik açısından kritik görev aktarma sorununu incelemektedir. İş akışı görevlerindeki öncelik kısıtlamalarını ve güvenlik hizmetlerinin ek yükünü dikkate alarak, toplam tamamlanma süresini ve enerji tüketimini ortaklaşa optimize etmek amacıyla güvenlik açısından kritik iş akışı yük devretme modelini formüle ediyoruz. Optimizasyon modeline uygulanabilir bir çözüm sunmak için görev dizisini kullanarak, iş akışı görevleri üzerindeki öncelik kısıtlamaları altında güvenlik açısından kritik iş akışı yük devretme sorununu çözmek için bir dizi sezgisel yöntem sunuyoruz.

Yük devretme çözümünün iş akışı görevleri arasındaki öncelik ilişkilerini karşılayıp karşılamadığına bağlı olarak, görev dizileri iki kategoriye ayrılabilir: öncelik farkında ve öncelik farkında olmayan yük devretme çözümleri. Öncelik kısıtlamalarının karşılanmasıyla, öncelik farkında bir strateji ve öncelik farkında olmayan bir strateji kullanarak bir dizi sezgisel yöntem, güvenlik açısından kritik iş akışı görevlerini yükten kurtarmak için tasarlanmıştır. Bir yükten kurtarma dizisi ve MEC sunucularının çalışma koşulları verildiğinde, sezgisel algoritmalar iş akışı görevlerini yükten kurtarmak için o anda en iyi MEC sunucusunu seçer. Deney sonuçları, öncelik kısıtlamaları altında güvenlik açısından kritik iş akışı yükten kurtarma problemini çözmede önerilen algoritmaların performansını doğrulamaktadır (Wang et al., 2023).

Otonom sürüş gibi hesaplama yoğun uygulamaların yaygınlaşması, mobil cihazların harici hesaplama kaynaklarını kullanarak yerel hesaplama yükünü hafifletmelerini gerektirmiştir. Umut vaat eden bir çözüm olarak, Çoklu Erişim uç hesaplama (edge computing), hesaplama görevlerini mobil cihazlardan uç sunuculara aktararak bu sorunu çözmektedir. Ancak, mevcut yük aktarma şemaları iki temel sınırlamaya sahiptir. İlk olarak, öngörülen sürenin sonunda görevin başarılı tamamlanması sağlamak için yerleşik önlemler içermemektedir. Otonom sürüş gibi güvenlik açısından kritik uygulamalarda, öngörülen sürenin aşılması felaketle sonuçlanabilir. İkincisi, mevcut şemalar genellikle yük aktarma politikalarını periyodik olarak günceller. Yani, mevcut sistem durumuna dayalı bir politika, birden fazla zaman diliminden oluşan bir zaman aralığı için oluşturulur. Sistem durumları bir zaman diliminden diğerine değişebileceğinden, oluşturulan politika tüm zaman aralığı boyunca iyi çalışmayabilir. HuangHui ve arkadaşları, güvenlik açısından kritik uygulamalar için yeni bir içerik aktarma şeması önermişlerdir. Kısıtlı pekiştirme öğrenme tabanlı içerik aktarma (CRLO). CRLO ile, öğrenme görev dağıtıcıya (scheduler)

bir güvenlik katmanı eklenir ve bu da öngörülen sürenin aşılmasına etkili bir şekilde ortadan kaldırır. Ayrıca, uzun süreli tahmin modeli Informer, zamana bağlı sistem durumlarını tahmin etmek için kullanılır ve bu da uygun içerik aktarma politikalarının oluşturulmasına yardımcı olur. Deneysel çalışmaların sonuçları, CRLO'nun son tarihlerin karşılanması ve görev tamamlama süresi açısından mevcut şemalardan daha iyi performans sergilediğini göstermektedir (HuangHui et al., 2025).

Gömülü Uygulamalarda Güvenlik

Gömülü uygulamalar, gömülü bir sistemin işlevini veya belirli bir görevini yerine getirmek için tasarlanmış yazılımlardır. Gömülü uygulamalar, gömülü işletim sistemi üzerinde çalışır. Altta yatan işletim sistemi güvenli olsa bile, uygulamalar güvenlik testleri, güvenliği artırmak için kod tarama araçlarının kullanımı ve güvenlik sorunlarının sürekli izlenmesi ve hızlı bir şekilde giderilmesi gibi ek güvenlik özellikleri gerektirebilir. Konteyner tabanlı uygulamalar, gömülü sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamalar sürekli olarak verileri işler, günlük dosyaları oluşturur ve dosyaları önbelleğe alır. Uygulama etkinliklerinin kötü niyetli olmadığından emin olmak için kritik güvenlik kontrolleri uygulanır.

Veri Güvenliği

Gömülü sistemler, IoT cihazları ve akıllı uç sistemlerin tümü verileri işler, depolar ve taşır. Görev açısından kritik ve güvenlik açısından kritik uygulamalar, amaçlanan işlevleri yerine getirmek için verilerin bütünlüğüne dayanır, bu nedenle gömülü sistemin veri sızıntısını önlemek için doğru güvenlik işlevine sahip olması çok önemlidir. Bu, hareket halinde, bekleme durumunda veya kullanımda olan verilerin tamamen şifrelenip korunması anlamına gelir.

Güvenlik Hizmetleri

Güvenlik, gömülü sistemler için sürekli bir çabadır. Tasarımdan hizmetten çıkarılmaya kadar tüm yaşam döngüsü boyunca süren bir faaliyettir. Birçok şirket için, bir cihazın tüm ömrü boyunca güvenlik durumunu izlemek ve sürdürmek, üçüncü taraf bir kuruluşun hizmetlerinden yararlanarak en iyi şekilde sağlanabilir. Yönetilen güvenlik hizmetleri ve hizmet olarak güvenlik, kaynakları kısıtlı ekipler için tehditleri tespit etmek ve bunlara yanıt vermek, dağıtım işlemlerini sürekli olarak izlemek ve analiz etmek ve saldırıları önlemek için veriye dayalı kararlar almak için ihtiyaç duydukları yardımı almak için hızla geçerli seçenekler haline gelmektedir.

ISO/IEC 15408-1'in Temel Özellikleri

ISO/IEC 15408-1, BT bileşenlerinin güvenlik özelliklerini belirlemek ve değerlendirmek için resmi bir yapı sağlar. Güvenlik gereksinimlerinin tanımlanmasını ve bu gereksinimlerin objektif ve tekrarlanabilir bir şekilde karşılandığının doğrulanmasını destekler. Ortak kıstaslar, bilgi teknolojisi güvenlik değerlendirmesi için ortak kıstaslar olarak da adlandırılır. Bilgisayar veya gömülü sistemler için uluslararası bir standarttır (ISO/IEC 15408). Ortak kıstaslar değerlendirmesi teknolojiye özeldir ve 14 farklı kategoriyi içerir. Değerlendirme süreci, değerlendirme hedefine yönelik hem işlevsel güvenlik gereksinimlerini hem de güvence güvenlik gereksinimlerini doğrular (ISO/IEC 15408-1, 2022a).

Ortak Kriterler standardının bir parçası olarak, ISO/IEC 15408-1 aşağıdaki gibi temel kavramları tanımlar:

- Değerlendirme Hedefi (Target of Evaluation , TOE): Değerlendirilen belirli BT sistemi veya ürünü.
- Güvenlik İşlevsel Gereksinimleri (security functional requirements, SFR): TOE'nin uygulaması gereken güvenlik özellikleri.

- Güvenlik Güvence Gereksinimleri (SAR): TOE'nin güvenlik özelliklerinin doğru ve etkili bir şekilde uygulandığını göstermek için gerekli kanıtlar.
- Koruma Profilleri (Protection Profiles, PP): Belirli bir kullanım durumu veya ortam için güvenlik gereksinimleri kümelerini tanımlayan şablonlar.
- Güvenlik Hedefleri (Security Targets, ST): TOE geliştiricilerinin uygulanan güvenlik özellikleri ve bunların PP'yi nasıl karşıladığına ilişkin iddialarını sunan şartname belgeleri.
- Odak Alanları: ISO/IEC 15408-1'in ele aldığı temel odak alanları; İşlevsel doğruluk ve güvenlik özelliklerinin sağlam bir şekilde uygulanması yoluyla bilgi güvenliği, BT sistemlerine yönelik tehditlere karşı siber güvenlik dayanıklılığı, sistem gizliliği, bütünlüğü ve kullanılabilirliğini sağlama, Gizlilik koruması, GDPR gibi gizlilik ve veri koruma yasalarına uygun olarak kişisel verilerin yönetimi için gereklilikler sağlar.
- Uygulanabilirlik ve Birlikte Çalışabilirlik: ISO/IEC 15408-1, çeşitli BT güvenlik standartlarına uyumu sağlamak için küresel olarak tanınır ve sıklıkla benimsenir. Örneğin, savunma, sağlık, finans ve telekomünikasyon gibi sektörlerde güvenlik değerlendirmelerinin ortak anlaşılmasını ve birlikte çalışabilirliğini kolaylaştırır.

ISO/IEC 15408'de tanımlanan Ortak Kriterler çerçevesi, üç ana süreci kapsamaktadır: BT güvenlik geliştirme (Değerlendirme Hedefi veya TOE için ST'yi tanımlama), TOE geliştirme (iddia edilen Değerlendirme Güvence Seviyesi veya EAL'de güvenlik işlevlerini uygulama) ve bağımsız güvenlik değerlendirme ve sertifikasyon. Yedi EAL (EAL1–EAL7) seviyesi vardır ve her biri

artan güvence ve değerlendirme derinliği seviyelerini temsil eder. EAL ne kadar yüksekse, değerlendirme süreci o kadar kapsamlı ve resmi hale gelir. EAL'ler kümülatiftir, her bir üst seviye, alt seviyelerin gerekliliklerini içerir ve daha katı kriterler ekler.

Tablo 3 Ortak Kriterler Değerlendirme Güvence Seviyeleri

EAL Seviyesi	Açıklama	Temel Özellikler/ Gereksinimler	Tipik Kullanım Örnekleri
EAL1	İşlevsel Olarak Test Edildi	Temel testler ve dokümantasyon	Düşük riskli tüketici ürünleri
EAL2	Yapısal Olarak Test Edilmiştir	Yapısal analiz, bağımsız testler	Ticari ürünler, orta düzeyde risk
EAL3	Metodik olarak Test Edilmiş ve Kontrol Edilmiş	Metodik tasarım, test ve inceleme	Ticari ürünler, daha yüksek güvence
EAL4	Metodik olarak Tasarlanmış, Test Edilmiş ve İncelenmiş	Titiz tasarım, test ve inceleme	Ticari işletim sistemleri ve uygulamalar için yaygın olarak kullanılır.
EAL5	Yarı resmi olarak tasarlanmış ve test edilmiştir	Yarı resmi tasarım, güvenlik açığı analizi	Yüksek güvenilirlikli, özel sistemler
EAL6	Yarı resmi olarak doğrulanmış tasarım ve test edilmiş	Gelişmiş formal yöntemler, kapsamlı analiz	Kritik altyapı, askeriye
EAL7	Resmi Olarak Doğrulanmış Tasarım ve Test Edilmiş	Resmi şartname ve doğrulama	Çok gizli, en yüksek güvenlik

ISO/IEC 15408-1, güvenlik sertifikasyonu için önemli avantajlar sağlasa da bazı zorluklar da ortaya çıkmaktadır:

- Karmaşıklık: Ortak Kriterlerin titiz metodolojisini izleyerek BT sistemlerini değerlendirmek zaman alıcı ve kaynak yoğun bir işlem olabilir.

- Genellik: Koruma Profilleri ve Güvenlik Hedefleri geliştirmedeki esneklik, standardın uygulanmasına ilişkin çalışmalarda da vurgulandığı gibi, farklı kullanım durumları ve sertifikasyon kuruluşları arasında değerlendirmelerde tutarsızlıklara yol açabilir.
- Gelişen Teknolojilere Uyum: Yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve merkezi olmayan sistemler (ör. blok zinciri) gibi gelişen alanlar, ISO/IEC 15408-1'in ilk tasarımıının sınırlarını zorlamaktadır. Bazı araştırmacılar, bu teknolojileri kapsayacak yeni uzantıların gerekli olabileceğini savunmaktadır.

ISO/IEC 15408-1, BT güvenlik özelliklerinin tutarlı ve uluslararası kabul görmüş değerlendirmelerini teşvik etmede hayati bir standart olmaya devam etmektedir. Standartta belirlenen kapsamlı ve yapılandırılmış değerlendirme metodolojisi, son derece karmaşık ve birbirine bağlı dijital ekosistemde güven ve birlikte çalışabilirlik sağlamak için değerli bir araçtır. Ancak, modern siber güvenlik ve gizlilik koruma ortamlarında standardın geçerliliğini korumak için sürekli güncellemeler ve genişletmeler çok önemli olacaktır.

Gizlilik uygulamaları, gömülü sistemlerdeki verilerin gizliliğini korumak için kullanılır. Bu, hareket halindeki verileri, cihazda depolanan veya saklanan verileri, cihaz tarafından işlenen verileri ve cihaza gelen ve cihazdan giden verileri içerir.

Bütünlük uygulamaları, gömülü cihaz verilerinin bir saldırgan tarafından değiştirilmediğini veya silinmediğini garanti eder. Bu, gömülü cihaz tarafından üretilen veya tüketilen verilerin yanı sıra programlama verilerini (işletim sistemi, uygulamalar, yapılandırma verileri vb.) de içerir.

Kullanılabilirlik uygulamaları, gömülü bir cihazın amaçlanan işlevini yerine getirmesini sağlar. Bu, bir saldırganın

cihazın amaçlanan işlevsel amacını değiştiremeyeceği anlamına gelir. Bu, yaşam veya görev açısından kritik görevleri yerine getiren cihazlar için son derece önemlidir.

Endüstri Dalına Göre Gömülü Sistemlerde Güvenlik Standartları

Genel siber güvenlik standartlarının dışında üretici firmalar gömülü sistemin kullanıldığı endüstri dalına göre farklı standartları karşılaması zorunlu hale gelmiştir.

Akıllı Binalarda Gömülü Sistem Güvenliği

Yeşil veya akıllı bina olarak adlandırılan konutlarda gömülü sistem kullanımı son 10 yılda hızlı bir artış göstermiştir. Birçok endüstri dalına göre yeni gelişen alan olması ve doğrudan ve her gün insan yaşamını etkilemesi nedeniyle yeşil binalarda kullanılan gömülü sistemlerde güvenlik standartlarının tanımlanması zorunlu hale gelmiştir. ISO/IEC 27001 ilk olarak 2014 yılında tanımlanmıştır, 2015 yılında ve 2017 yılında yenilenerek tekrar yayınlanmıştır. 2022 yılında ise son halini almış ve eski sürümleri geri çekilmiştir. Yeşil binalarda gömülü sistem güvenliğini değerlendirmek, siber güvenlik çerçeveleri, IoT tabanlı güvenlik protokolleri, bina otomasyon sistemi dayanıklılığı ve endüstriyel standartlara uyumu bir araya getiren, son derece çok disiplinli bir görevdir (Ma et al., 2023). Yeşil binalar, izleme ve optimizasyon için IoT cihazlarını ve gömülü sistemleri entegre eden, birbirine bağlı sensörlere, kontrol sistemlerine ve enerji verimli iletişim teknolojilerine dayanır. Bu sistemlerin güvenliğini sağlamak, bina operasyonlarını aksatabilecek veya çevre ve bina sakinlerinin güvenliğini tehlikeye atabilecek potansiyel siber tehditleri önlemek için çok önemlidir. ISO/IEC 27001 standardı, yeşil bina sistemlerindeki bilgi güvenliği risklerinin sistematik olarak yönetilmesini sağlar (ISO/IEC 27001, 2022).

Yeşil binalarda gömülü sistem güvenliğinin değerlendirilmesi, güvenli donanım, dayanıklı yazılım ve sağlam

iletişim protokolleri üçlüsüne odaklanmalıdır. Tanınmış standartlara uyum, gelişmiş şifreleme tekniklerinin kullanılması ve rutin sistem izleme, enerji verimliliğini korurken siber güvenliği sağlamak için gerekli adımlardır. Ayrıca, fiziksel kopyalanamaz işlevler (physical unclonable functions, PUF) ve yapay zekâ tabanlı sistemler gibi en son teknolojilerin entegrasyonu, yeşil bina ortamlarına uyarlanmış, uyarlanabilir ve ölçeklenebilir çözümler sağlayabilir.

Endüstriyel Otomasyonda Gömülü Sistem Güvenliği

IEC 62443, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri (IACS) için özel olarak tasarlanmış kapsamlı bir siber güvenlik standardıdır. Gelişen siber tehditlere karşı IACS'yi korumak için kılavuzlar ve en iyi uygulamalar sağlar (IEC 62443, 2022). Bu sistemlerde birbirine bağlı cihazlara ve akıllı işlevlere olan bağımlılığın artması nedeniyle, bina otomasyon ortamlarındaki gömülü sistemlere de uygulanabilir. IEC 62443 başlangıçta endüstriyel proses sektörü için geliştirilmiştir, ancak IACS, güç ve enerji tedariki ve dağıtımı ile ulaşım gibi giderek genişleyen bir dizi alanda ve endüstride kullanılmaktadır. IACS teknolojileri, kritik altyapının merkezinde yer almaktadır. Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin ana elemanı olan PLC'lerde siber güvenlik ve işlevsel güvenlik karşılanması gereken bir zorunluluktur (Engin, 2023). BT standartları, IACS ve diğer OT (operasyonel teknoloji) ortamları için uygun değildir. Örneğin, farklı performans ve kullanılabilirlik gereksinimleri ve ekipman ömürleri vardır. Ayrıca, BT sistemlerine yönelik siber saldırılar esasen ekonomik sonuçlar doğururken, kritik altyapıya yönelik siber saldırılar çevreye ciddi zararlar verebilir ve hatta halk sağlığını ve hayatları tehdit edebilir. Uluslararası standartlar, sektördeki en iyi uygulamalara dayanır ve konsensüsle belirlenir. IEC 62443 standardının uygulanması, siber saldırıların etkilerini azaltabilir ve çoğu zaman başarılı bir şekilde siber saldırıları önleyebilir. Standart, yaşam döngüsü boyunca güvenliği artırabilir ve maliyetleri azaltabilir. IEC 62443, kontrol

sistemini oluşturan teknolojiyi değil, aynı zamanda iş süreçlerini, önlemleri ve çalışanları da ele alır. Standart, bütünsel bir yaklaşım benimsemektedir, çünkü tüm riskler teknolojiye dayalı değildir. IACS'den sorumlu personel, güvenliği sağlamak için gerekli eğitim, bilgi ve becerilere sahip olmalıdır. IEC 62443, siber güvenliğe risk temelli bir yaklaşım benimsemektedir. Bu yaklaşım, tüm varlıkları eēit ölçüde korumaya çalışmanın ne verimli ne de sürdürülebilir olduğu kavramına dayanmaktadır. Bunun yerine, kullanıcılar en değerli ve en fazla korumaya ihtiyaç duyan unsurları belirlemeli ve güvenlik açıklarını tespit etmelidir.

IoT ve Network Uygulamalarında Gömülü Sistem Güvenliği

FIPS 140-2 (Federal Information Processing Standard Publication 140-2) eēitli uygulamalarda, özellikle sistem denetleyicileri ve IoT cihazlarında kullanılan şifreleme modüllerinin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için kritik bir ereve görevi görür (FIPS 140-2, 2022). Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından yayınlanan bu standart, hassas bilgileri korumak için şifreleme sistemlerinin uygulanmasına yönelik katı güvenlik gereksinimlerini özetler. Federal Bilgi İşleme Standardı (140-2), kriptografik modülün karşılaması gereken güvenlik gereksinimlerini belirtir ve çok eēitli potansiyel uygulamaları ve ortamları kapsayacak şekilde dört artan niteliksel seviye sunar. Kriptografik modülün güvenli tasarımı ve uygulamasıyla ilgili kapsanan alanlar arasında spesifikasyon, bağlantı noktaları ve arayüzler, roller, hizmetler ve kimlik doğrulama, sonlu durum modeli, fiziksel güvenlik, çalışma ortamı, kriptografik anahtar yönetimi, elektromanyetik girişim/elektromanyetik uyumluluk (EMI/EMC), kendi kendine testler, tasarım güvencesi ve diğer saldırıların azaltılması yer almaktadır (Evans et al., 2002). Mevcut sürüm FIPS 140-3'tür. Bir şirket kriptografik modülünü şirket içinde geliştirirse veya kod değiştirilirse, FIPS 140-3 standardı tam modül sertifikasyonu başlatmak için kullanılır. Kriptografik modül

değiştirilmeden kullanılırsa, FIPS 140-3 doğrulama süreci yalnızca yeni işletim ortamının modülün güvenlik politikasına uymasını gerektirir.

Sonuç

Gömülü sistemler, IoT cihazları ve akıllı uçların (Edge AI) kullanım alanları ve yeni kullanım örnekleri arttıkça, saldırı yüzeyi ve güvenlik ihlallerinin potansiyeli de artmaktadır. Küçük IoT ev termostatlarından en karmaşık sistemlere kadar, bağlı her cihaz, siber saldırılar tarafından istismar edilebilecek bir veya daha fazla potansiyel giriş noktasına sahiptir. Halihazırda milyarlarca cihaz bağlı durumda ve on milyarlarca cihaz daha eklenecekken, cihazların güvenliğini sağlamak ve ürettikleri verileri korumak zorunludur. Gömülü endüstride, şirketlerin güvenlik gereksinimleri ve işlevsellik için en güncel standartlara bağlı kaldığına ve bunları uyguladığına dair yüksek bir güven vardır. Görev açısından kritik ve güvenlik açısından kritik uygulamalara sahip gömülü sistemler için, kapsamlı ve tam bir yaşam döngüsü güvenlik mimarisi gereklidir. Güvenlik öncelikli bir politika olmadan, hiçbir cihaz gerçekten güvenli olamaz ve dağıtıldığı süre boyunca güvenli kalamaz.

Gömülü bir cihazda güvenliği sağlamak sürekli bir süreçtir. Geliştirme sırasında yukarıda belirtilen adımları özenle izlemiş olsanız bile, ürününüz yine de güvenlik risklerine maruz kalabilir. Tehdit ortamı sürekli değişmektedir ve cihazınız, geliştirme sırasında tanımlanmamış veya mevcut olmayan yeni tehditlere maruz kalacaktır. Sahada ortaya çıkan güvenlik sorunlarını ele almaya hazır olun ve bu sorunlar ortaya çıktıkça bunları gidermeye hazır olun. Böylece, cihazınıza saldırmaya çalışan bilgisayar korsanlarından bir adım önde olabilirsiniz.

ISA/IEC 62443, IoT Security Foundation ve PSA gibi kılavuzlar, siber güvenlik konusunda iyi tavsiyeler verir. Kaliforniya ve AB gibi yerlerdeki yasalar ve tıbbi cihazlar için gerekli güvenlik önlemleri

size hangi güvenlik önlemlerine ihtiyacınız olduğunu söyler. UL 2900-1 veya IECCE CB Scheme gibi bağımsız kontrollerden onay almak, ürününüzün güvenli olduğunu gösterir.

Gelecekte, AI destekli tehdit algılama, gömülü güvenlik çözümlerinde standart hale gelecektir. Kuantum dirençli şifreleme hazırlığı, uzun vadeli güvenlik için çok önemli olacaktır. Kenar bilişim güvenliği, dağıtılmış sistem koruması için yeni yaklaşımlar gerektirecektir. Yasal uyumluluk, tüm sektörlerde daha katı hale gelecektir.

Kaynakça

Akyaz, T., & Engin, D. (2024). Machine Learning-Based Predictive Maintenance System for Artificial Yarn Machines. *IEEE Access*, 12, 125446–125461. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454548>

Ayers, H., Dutta, P., Levis, P., Levy, A., Pannuto, P., Van Why, J., & Watson, J. L. (2022). Tiered Trust for Useful Embedded Systems Security. *EuroSec 2022 - Proceedings of the 15th European Workshop on Systems Security*, 15–21. <https://doi.org/10.1145/3517208.3523752>;CSUBTYPE:STRING:CONFERENCE

Barredo, J., Eceiza, M., Flores, J. L., & Iturbe, M. (2025). CARNYX: A framework for vulnerability detection via power consumption analysis in embedded systems. *International Journal of Information Security* 2025 24:4, 24(4), 172-. <https://doi.org/10.1007/S10207-025-01092-2>

Cyber Resilience Act (EU). (2024, September 1). *Cyber Resilience Act (EU): a disruptive regulation for the EU market*. <https://www.cyberresilienceact.eu/>

- Dragusin, S. A., Bizon, N., & Bostinaru, R. N. (2024). Comprehensive Analysis of Cyber-Attack Techniques and Vulnerabilities in Communication Channels of Embedded Systems. *Proceedings of the 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2024*. <https://doi.org/10.1109/ECAI61503.2024.10607432>
- Engin, D. (2023). Functional Safety in Programable Logic Controllers. In B. Kılıç (Ed.), *Academic Research and Reviews in Engineering Sciences* (1st ed., Vol. 1, pp. 537-550.). Platanus Publishing.
- Evans, D. L., Bond, P. J., & Bement, A. L. (2002). *Security Requirements for Cryptographic Modules*. <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.140-2>
- FIPS 140-2. (2022). *FIPS 140-2, Security Requirements for Cryptographic Modules* | CSRC. <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/140-2/upd2/final>
- Fischer, A., & Kolagari, R. T. (2024). Harmonization of Security Standards for Embedded Systems in a Comprehensive Metamodel: The Security Abstraction Model. *Proceedings - 2024 IEEE 24th International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion, QRS-C 2024*, 1314–1315. <https://doi.org/10.1109/QRS-C63300.2024.00171>
- Hao, Q., Xu, D., Qin, Y., Li, R., Zhang, Z., You, Y., & Wang, X. (2024). A Hardware Security Protection Method for Conditional Branches of Embedded Systems. *Micromachines* 2024, Vol. 15, Page 760, 15(6), 760. <https://doi.org/10.3390/MI15060760>
- HuangHui, YeQiang, & ZhouYitong. (2025). Safety-Critical Offloading with Constrained Reinforcement Learning for

- Multi-access Edge Computing. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 21(2), 1–37. <https://doi.org/10.1145/3715695>
- IEC 62443. (2022, June 1). *Understanding IEC 62443*. <https://www.iec.ch/blog/understanding-iec-62443>
- ISO/IEC 15408-1. (2022a). *ISO/IEC 15408-1:2022 - Information security, cybersecurity and privacy protection — Evaluation criteria for IT security — Part 1: Introduction and general model*. <https://www.iso.org/standard/72891.html>
- ISO/IEC 15408-1. (2022b, January 1). *ISO/IEC 15408-1:2022 - Information security, cybersecurity and privacy protection - Evaluation criteria for IT security - Part 1: Introduction and general model*. https://webstore.ansi.org/standards/iso/isoiec154082022-2475923?ad_acct=0000&gad_source=1&gad_campaignid=1042558233&gbraid=0AAAAAD_gXFVcx5iFao0lE5zUBJ07ElDbk&gclid=Cj0KCQjAosrJBhD0ARIsAHebCNobwVWORLDwy5a-bBu2TRpYys2BYxI2y0dLVv5f2d5HgRoYBPewVjtwAaKlfEALw_wcB
- ISO/IEC 27001. (2022, January 1). *ISO/IEC 27001:2022(en), Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:27001:ed-3:v1:en>
- Ma, L., Yao, Z., Tai, I., & Li, Z. (2023). Reliability Study of Embedded Security Systems Integrated in Green Buildings. *Civil Engineering Research Journal*, 13(5), 1–9. <https://doi.org/10.19080/CERJ.2023.13.555875>
- ARM. (2025). *PSA Certified: IoT Security Framework and Certification*. <https://www.psacertified.org/>

Wang, Y., Sun, T., Yang, G., Yang, K., Song, X., & Zheng, C. (2023).
Safety-Critical Task Offloading Heuristics for Workflow
Applications in Mobile Edge Computing.
<https://doi.org/10.1142/S0218126623501864>, 32(11).
<https://doi.org/10.1142/S0218126623501864>

BÖLÜM 8

V2G ARAÇTAN ŞEBEKEYE TEKNOLOJİSİNİN GÜÇ SİSTEM KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

1. SEDRETTİN SÜLE¹

2. ASIM KAYGUSUZ²

Giriş

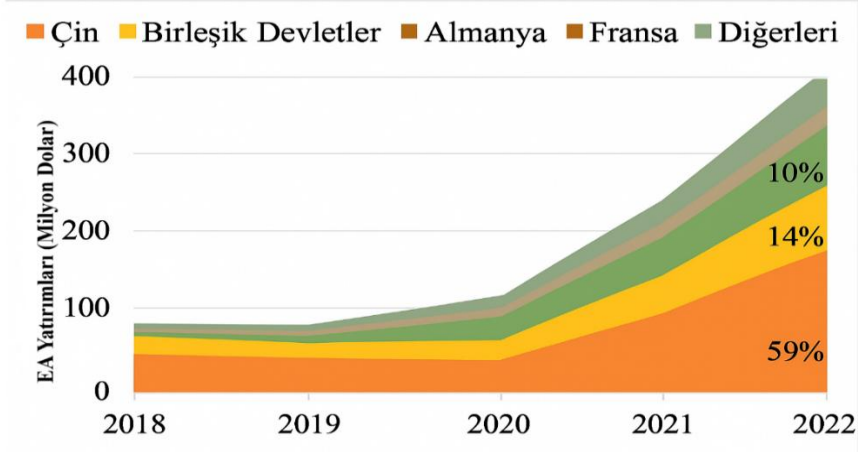
Son yıllarda Elektrikli Araçlara (EA) ve şarj altyapısına yapılan küresel yatırımlar hızla artmaktadır. Çin, son beş yılda EA'lara yapılan yatırımlarda liderlik konumunda bulunmakta ve 2022'de toplamda 234 milyar ABD Doları ile global yatırımın yaklaşık %59'unu oluşturmaktadır. ABD ise 2022'de yaklaşık 57 milyar ABD Doları yatırım yaparak ikinci en büyük yatırımcı konumundadır ve global payı %14'tür. Almanya, Fransa ve İngiltere'de de EV yatırımlarında hızlı bir büyüme gözlemlenmektedir. Elektrikli Araçların düşük emisyon, yüksek verimlilik ve özellikle enerji piyasasındaki artan rolü göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyonu ile teknik, ekonomik ve çevresel etkilerinin incelenmesi önemli

¹ Yük. Lis. Öğr., Elektrik Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0009-0006-5664-3496

² Profesör, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-2905-1816

bulunmaktadır (Liu vd. 2023). Ülkelerin elektrikli araç ve şarj istasyonları yatırımları oranları Şekil 1’de görülmektedir.

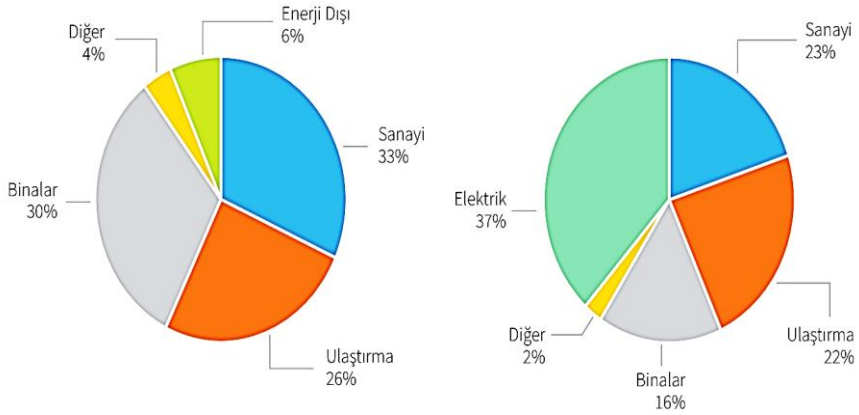
Şekil 1: Ülkelerin Elektrikli Araç ve Şarj İstasyonları Yatırımları Oranları



Kaynak: (Liu vd. 2023).

Türkiye’de de artan nüfus ve hızlı kentleşme ile birlikte elektrikli araçlarla ilgili enerji talebinde önemli bir artış meydana gelmektedir. Ulaştırma sektörünün enerji talebi toplam nihai enerji talebinin %26’sına denk gelmektedir (Şekil 2). Bu durum, mevcut enerji sistemlerinin sürdürülebilir ve verimli bir şekilde yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Fosil yakıt temelli enerji üretimi, sınırlı doğal kaynakların hızla tükenmesine ve küresel ısınma, iklim değişikliği ile hava kirliliği gibi çevresel sorunların artmasına neden olmaktadır. Ulaşım sektörü, dünya petrol tüketiminin yaklaşık %40’ını ve küresel CO₂ emisyonlarının %20–23’ünü oluşturmaktadır. Bu nedenle ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılması, enerji ve çevre politikalarının öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır.

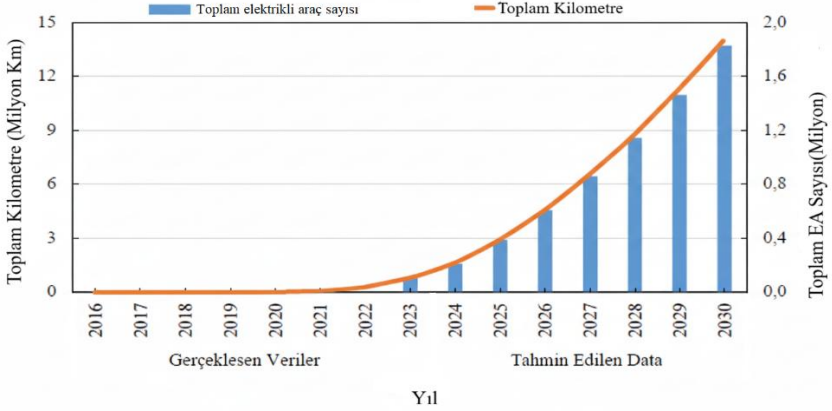
Şekil 2: Toplam nihai enerji tüketimi ile enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının dağılımı



Kaynak: (Saygın vd. 2019).

Elektrikli araçlar, fosil yakıt kullanan araçlara kıyasla çevresel yükü azaltan alternatif bir ulaşım çözümü olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki büyüme ve güç elektroniği teknolojilerindeki ilerlemeler, elektrikli araçların sadece ulaşım aracı olmanın ötesinde, enerji sisteminin etkin bir bileşeni olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Közkurt vd. 2020). Uluslararası Enerji Ajansı verileri, dünya genelinde 2024 yılı itibarıyla elektrikli araç sayısının 17 milyonu geçtiğini ve mevcut politika eğilimlerinin devam etmesi durumunda 2030 yılı itibarıyla bu sayının 230 milyona ulaşmasının öngörüldüğünü göstermektedir. Türkiye’de de elektrikli araç satışları son yıllarda sürekli bir artış göstermektedir. Öte yandan, yüksek batarya maliyetleri, uzun şarj süreleri, yetersiz şarj altyapısı ve bataryaların enerji yoğunluğu ile ilgili teknik gereksinimler, bu teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlayan başlıca faktörler arasında yer almaktadır.

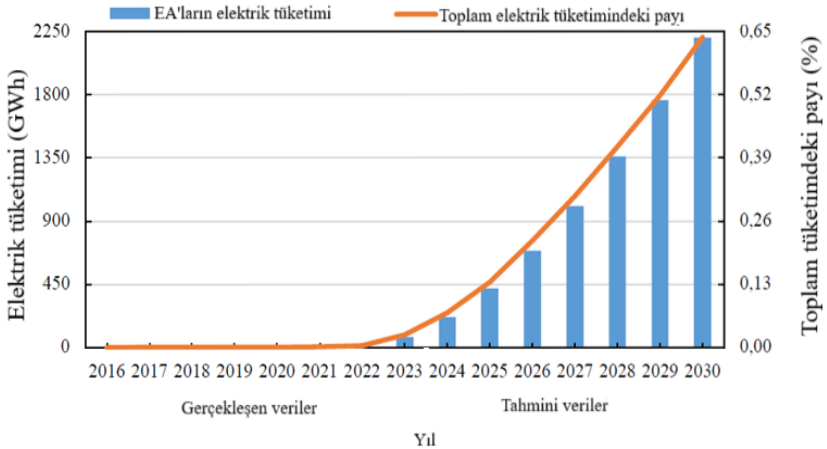
Şekil 3: 2030 yılına kadar ülkedeki toplam tahmini elektrikli araç sayısına ait gerçekleşmiş ve tahmini veriler



Kaynak: (Şahin 2025).

Türkiye’de elektrikli araç sayıları ve tüketim değerleri (şekil 3 ve 4) hakkında yapılan başka bir çalışmada ise 2023 yılına oranla 2030 yılında elektrikli araçların yıllık satışlarının yaklaşık 8 katına ulaşacağı, elektrikli araçların toplam tüketimdeki payının 20 kat yükseleceği tahmin edilmektedir (Şahin 2025).

Şekil 4: Türkiye’de 2030 yılına kadar mevcut ve tahmini elektrikli araç satış miktarları ve elektrik tüketimindeki payı



Kaynak: (Şahin 2025).

Elektrikli araçların enerji sistemleriyle ilişkisi yalnızca tüketim boyutuyla sınırlı değildir. Akıllı şebekelerle entegrasyonu, bu araçların üretken tüketici olarak enerji arzına katkıda bulunabilmesini mümkün kılmaktadır. Şebekeden araca enerji transferi ve araçtan şebekeye enerji geri beslemesi uygulamaları, elektrikli araçların taşınabilir enerji depolama ünitesi hâline gelmesini sağlamaktadır. Bu durum, araçların enerji arz-talep dengesinin korunmasında kritik bir rol üstlenmesine imkân tanımakta ve onları yalnızca yük değil, aynı zamanda dağıtık bir enerji kaynağı olarak değerlendirmeye olanak vermektedir (Kempton ve Tomić 2005).

Bu bölümde, elektrikli araçların V2G teknolojisi ile akıllı şebekelere entegrasyonunun enerji yönetimi, şebeke kararlılığı, güç kararlılığı ve sistem güvenilirliği üzerindeki etkileri incelenmektedir. Ayrıca, entegrasyon sürecinin sunduğu fırsatlar ile ortaya çıkardığı teknik, ekonomik ve yapısal riskler değerlendirilmiş ve güç dengesine olan etkileri incelenmiştir. Elektrikli araçların frekans kararlılığı, güç sistemleri kararlılığı ve araçtan şebekeye (V2G) teknolojisi ile güç sistemleri üzerindeki avantaj ve dezavantajları konularında ilgili literatür taraması yapılmış ve araştırma neticesinde bulunan kaynaklar, aşağıdaki araştırma sorularına cevap olacak şekilde sırayla değerlendirilmiştir: V2G uygulamasının frekans kararlılığına ve gerilim kararlılığına etkileri, V2G teknolojisinin zorlukları ve avantajları, V2G teknolojisi için gelecekteki araştırma konuları.

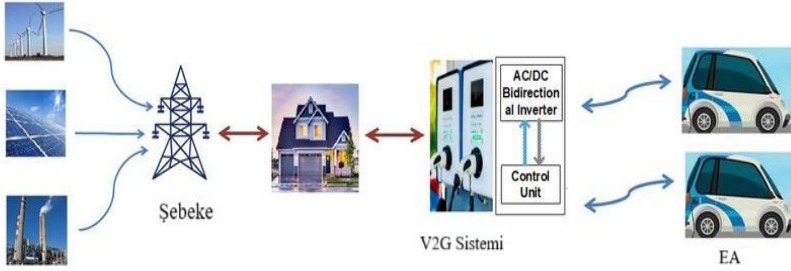
V2G Uygulamasının Frekans Kararlılığına Etkileri

Elektrikli araçların kullanımının artmasıyla birlikte, güç sistemlerinin dağıtımı da artmakta ve bu durum özellikle frekans kararlılığı açısından önemli bir endişe oluşturmaktadır. Elektrikli araçlar güç sistemlerine büyük, değişken ve kontrolsüz aktif yükler ekler. Güç talebinde meydana gelen büyük değişiklikler, frekans

farklılıklarına neden olur. Bu yük dengesizliği, çok sayıda elektrikli aracın yoğun talep saatlerinde şarj olmasıyla ortaya çıkar ve bu durum sistem frekansında sapmalara yol açarak şebekenin kararlılığı ve güvenilirliği için risk oluşturmaktadır. Bu problemlerin yanı sıra, EA'ların V2G gibi teknolojilerle birlikte kullanımı frekans kararlılığını iyileştirme potansiyeli de taşır. V2G, ters güç akışına olanak tanıyarak elektrikli aracın dağıtılmış bir enerji depolama kaynağı olarak kullanılmasını sağlar. Bu sayede, frekans sapması dönemlerinde EA'lar şebekeye geri güç vererek şebekeyi destekleyen araçlar haline getirir (Dewi, Adrianti, ve Nasir 2025a).

Elektrikli araçların toplu ve eş zamanlı şarj edilmesi, dağıtım şebekelerinde gerilim düşüşleri, güç dalgalanmaları, harmonik bozulmalar ve yüksek talep dönemlerinde artan yük gibi teknik zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Bu etkilerin şiddeti, şehirlerin nüfus yoğunluğu, sürücü alışkanlıkları, araç sahipliği oranları ve mevcut enerji altyapısının kapasitesi gibi faktörlere bağlı olarak bölgesel farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, geleceğe yönelik şarj talebi tahminlerinin yapılması, bölgesel enerji gereksinimlerinin planlanması kritik öneme sahiptir (Tayri ve Ma 2025). Yenilenebilir enerji kaynaklarının meteorolojik faktörlerden hızlı etkilenmesi akıllı şebekelerde yük dalgalanmasına ve enerji yönetiminde zorlukları beraberinde getirmektedir. Dağıtık Enerji depolama sistemleri olarak V2G uygulamaları, bu bağlamda akıllı şebekelerin esnekliğini artıran, arz-talep dengesizliklerini dengeleyen ve yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğinden kaynaklanan belirsizlikleri azaltan kritik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır(Areola, Adebisi, ve Moloi 2025). Şekil 5'te V2G teknolojisine ait temel bileşenler yer almaktadır.

Şekil 5: Araç-Şebeke V2G teknolojisi



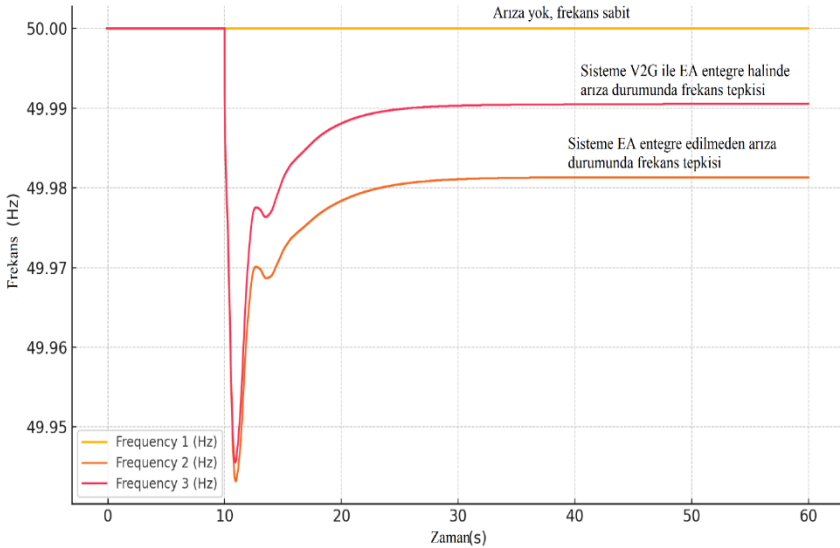
Kaynak: (Dewi, Adrianti, ve Nasir 2025b)

Çift yönlü enerji akışının sağlanması ile elektrikli araçların yalnızca enerji tüketen değil, aynı zamanda enerji sistemine katkı sağlayabilen bileşenler olarak işlev görebileceğini ortaya çıkaran bir çalışmada, Araçtan Şebekeye (V2G), Araçtan Binaya (V2B) ve Araçtan Eve (V2H) gibi gelişmiş şarj ve deşarj yöntemleri ile kontrollü enerji yönetimi sağlanabilir. Bu yöntemlerin, şebeke istikrarını artırmak, pik talep yüklerini azaltmak ve enerji arz güvenliğini desteklemek açısından önemli avantajlar sunduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Nour vd. 2020). Yine başka bir çalışma ile elektrikli araç şarjının şebeke üzerindeki etkilerini modellemiş ve 22 kW ile 40 kW kapasiteli şarj cihazlarının hem V2G hem de Şebekeden Araca (G2V) uygulaması ile harmonik etkilerini simülasyon ortamında incelemişlerdir. Analizler, şarj cihazlarının kapasitesi ve çalışma modunun şebeke üzerindeki harmonik bozulmalar ve güç kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Baraniak ve Starzyński 2020).

Şarj esnasında meydana gelen güç kalitesi sorunlarının izlenmesi ve azaltılması üzerine odaklanan bir çalışmada güç faktöründe azalma ve harmonik oluşumlarının şebekeye zarar verdiği belirlenmiş, önerilen modelde kontrollü şarj yöntemlerinin frekans kararlılığı için önemli bir mekanizma olduğu vurgulanmaktadır (Nair, Vineeth, ve Nair 2023). Yine elektrikli

araçların şebeke frekansını düzenleyici etkisinin olabileceği literatürde verilmiştir, ayrıca başka bir çalışmada da güç sisteminin verimliliğini artırmak için V2G sistemi ile EA'ların batarya depolama kapasitelerinden yararlanarak ihtiyaç duyulduğunda güç çekmesini ve bu gücü şebekeye geri vermesini sağlayacak şekilde çalıştırılmasıdır. Çalışmada çıkan sonuçlara göre bu iki yönlü elektriksel akış, şebeke kararlılığına yardımcı olur, enerji tedarikindeki dalgalanmaları azaltır ve genel sistem güvenilirliğini artırır. Yine başka bir çalışmaya göre EA'lar, mobil batarya depolama cihazları olarak görev yapabilirler ve özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi gibi belirsiz enerji kaynaklarından etkilenen arz ve talep dengesizliğini dengelemeye yardımcı olabilmektedir (Elalfy vd. 2023).

Şekil 6: V2G ile yüksek sayıda EA entegrasyonu ile arıza anında frekans tepkisi



Kaynak: (Vásquez-Cardona vd. 2025).

Yukarıda yer alan şekil-6'da Hollanda'nın Curaçao bölgesine ait güç sistemleri modellenerek sisteme farklı senaryolarda V2G

uygulanması ile farklı sayıda EA bağlanarak arıza durumlarında sistemin frekans tepkisi analiz edilen çalışmada elektrikli araçların arıza durumlarında frekans tepkisinde düzeltici olarak faydalı bulunduğu, potansiyel olarak V2G teknolojisini içeren, iyi düzenlenmiş bir EA entegrasyon stratejisinin, kontrol edilebilir bir enerji kaynağı olarak hareket ederek frekans kararlılığını artırabileceğini göstermektedir (Vásquez-Cardona vd. 2025). Ancak, EA şarj cihazlarında bulunan eviriciler gibi doğrusal olmayan yükler, sistemde toplam harmonik bozulmalara (THD) yol açmaktadır. THD'nin artması, elektronik kontrol sistemlerinin arızalanmasına, termal problemlere ve hatta şebekeye bağlı ekipmanlarda ciddi arızalara neden olabilir (Theo Laughner 2024).

Aşağıdaki tabloda V2G teknolojisinin çeşitli uygulama alanlarında yapılan güncel çalışmalarda güç sistemlerinin frekans kararlılığına etkisi incelenen ve bu çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlar özet halinde sunulmaktadır.

Tablo 1: V2G Teknolojisinin frekans kararlılığına etkisi -güncel çalışmalar ve özetleri

Referans	Çalışma Alanı	Sonuç
(Vásquez-Cardona vd. 2025)	Frekans kararlılığı üstünde Elektrikli Araçların etkisi	Arıza durumlarında güç sisteminin frekans tepkisini hızlandırabilir ve kararlılığa ulaşmasına destek olabilir. Ancak, yüksek EV penetrasyon senaryolarında şebekenin frekans bozukluklarına dayanma kabiliyetinin zayıflatabilmektedir.
(Safari ve Rahimi 2025)	Elektrikli Araçların Farklı Teknolojik entegrasyon (V2X)	Araçtan-Her Şeye (V2X) teknolojileri ile farklı sistemlere entegrasyonu konu edinen çalışmada Araçtan-Şebekeye (V2G), Araçtan-Binaya (V2B), Araçtan-Yüke (V2L), Araçtan-Araca (V2V) ve Araç-Gemiye (V2S) teknolojileri ile EA'lar ve çevreleri arasında enerji ve veri transferini olanaklı hale geleceği ve böylelikle elektrik şebekesinin

		istikrarını destekleyeceğini ortaya koymaktadır.
(Xiaoming ve Jingjing 2025)	Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile entegrasyonu	V2G teknolojisi aracılığıyla elektrikli araçları (EA) dinamik enerji depolama birimleri olarak kullanarak rüzgâr enerjisinin güç sistemlerine entegrasyonunu geliştiren farklı bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmaya göre, detaylı EA toplama modellemesi ile sistemde rüzgâr enerjisi emilimini %28 oranında artırdığını ve işletme maliyetlerini %15 oranında azalttığını ortaya çıkarmaktadır.
(Qays vd. 2025)	V2G Uzun dönem teknolojik ekonomik analizi	V2G uygulaması çoğaldıkça, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kullanan elektrik sisteminin dengesinin bozulması riskini incelenen bu çalışmada şarj istasyonları kurmadan önce, sistemin ne kadar güçlü ve güvenilir olacağını uzun vadeli (2025'ten 2045'e kadar) hem teknik hem de ekonomik olarak hesaplamaktadır. 20 yıllık projeksiyonlarda V2G altyapısı, sistem güvenilirliğini %10 artırdığı belirlenmiştir.
(Pradana, Haque, ve Nadarajah 2025)	EA toplayıcı modeli	EA toplayıcı bir sistemde elektrikli araçların hem sistemin Yük Faktörünü (LF) daha düzeye çıkararak şebeke yükünü azaltmayı azaltılabileceğini hem de EA sahiplerine istikrarlı bir gelir akışı sağlayabileceğini öne sürülen bu çalışmada, böyle bir sistemde aynı zamanda iletim kaybında azalma, pik yük kaydırma, ertelenmiş altyapı yatırımı ve toplayıcılar için artan gelir gibi ek faydalar da sunabildiği ifade edilmektedir.
(Kouzelis vd. 2025)	Araca entegre fotovoltaik (VIPV) ve (V2G) teknolojisine	Araca entegre fotovoltaik (VIPV) ve araçtan şebekeye (V2G) teknolojisine sahip elektrikli araçlarda bu iki sistemin EA'nın pil ömrü üzerindeki etkisi incelendiği bu çalışma ile pilin takvim yaşlanma kapasite kaybını

	sahip elektrikli araçlar	yaklaşık onda bir oranında azaltılabileceğini göstermektedir. VIPV-V2G kombinasyonu batarya yaşlanmasını hızlandırırsa da PV katkısı enerji maliyetini düşürür.
(Woo vd. 2025)	Çift yönlü şarj stratejileri	V2G uygulamasında toplayıcılar için faydalarını etkileyen kritik hizmet parametrelerini analiz edilen çalışmada uygulanan farklı senaryolarda farklı kazanç durumları, farklı seviyelerde emisyonlara işaret etmektedir. Araç pil kapasitelerinin ve şarj ve deşarj güçlerinin artırılması V2G gelirlerini önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymaktadır.
(Alghsoonl E, Harb A, ve Hamdan M 2017)	Güç kalitesi, Gerilim ve frekans kararlılığı analizi	V2G uygulamasının sistemin frekans kararlılığı üzerindeki etkisinin analiz edildiği çalışmada frekans kararlılığının V2G ile şarj/deşarj durumlarından etkilendiği, ancak bu oranların standartların kabul edilebilir sınırları içerisinde yer almaktadır.
(Kulat vd. t.y.)	V2G sistemi ve şebeke kararlılığı	Elektrikli Araçların (EA) hem yük hem de dağıtılmış depolama sistemleri olarak hizmet sağlayabilen bir sistemde toplu EA filoları pik yük azaltma, frekans düzenleme, voltaj desteği, dönen rezerv alanlarında hizmet verebilir ve V2G özellikli elektrikli araçlarının yaygınlaşma oranı arttıkça pik talebini de azaltıp yenilenebilir enerji kullanımını artırabilir.
(Katic vd. 2019).	EA şarj istasyonları ve V2G uygulamaları	EA şarj istasyonlarının şebekeye bağlı araç sayısının artması ile hem gerilim düşüşünü hem de harmonik bozulmaları artırdığını göstermiş, ancak V2G modunda çalışmanın bu olumsuz etkileri önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.
(SivaramKrishnan vd. 2025)	Elektrikli araçlar için akıllı şarj çözümleri-	Güneş enerjisiyle çalışan bir elektrikli araç (EA) şarj istasyonu için önerilen model ile güç sisteminin dinamik tepkiselliği artmakta ve toplam

gerilim dalgalanmaları	harmonik bozulmaları azaltmaya yönelik katkıda bulunmaktadır.
---------------------------	--

V2G Uygulamasının Gerilim Kararlılığına Etkileri

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminde çalışma süresi boyunca sisteme entegre bulunan tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalma yeteneği şeklinde ifade edilebilir (Kaygusuz, Tuttokmağı, ve Acar 2025). V2G teknolojisinin yaygınlaşması ile güç sistemlerinde dağıtık enerji depolama birimleri olarak hizmet verebilmesi ve gerilim kararlılığına destek verme konusunda umut vermektedir.

Yenilenebilir enerji depolamayı geliştirmek ve şebeke istikrarını sağlamak için V2G teknolojisinin entegrasyonunu dönüştürücü bir çözüm olarak görülen bir çalışmada EA'ların hem yük hem de dağıtılmış depolama sistemleri olarak hizmet sağlamaktadır. Böylelikle toplu EA filoları pik yük azaltma, frekans düzenleme, voltaj desteği, dönen rezerv alanlarında hizmet verebilir ve V2G özellikli elektrikli araçlarının yaygınlaşma oranı arttıkça pik talebini de azaltıp yenilenebilir enerji kullanımını artırabilir (Kulat vd. t.y.). Bir başka çalışmada elektrikli araçları gerilim düşümleri sırasında V2G modunun dağıtım sistemi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 3 MW kapasiteli bir dağıtım sistemi simüle edilmiş ve 22 adet, 22 kW gücünde EA şarj istasyonu sisteme bağlanmıştır. Analizler, şebekeye bağlı araç sayısının artmasının hem gerilim düşüşünü hem de harmonik bozulmaları artırdığını göstermiş, ancak V2G modunda çalışmanın bu olumsuz etkileri önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir (Katic vd. 2019).

Bulanık mantık tekniği ile V2G uygulanmasında elektrikli araçların kontrol edilebilir akıllı yük akışı düzenleyicileri olarak elektrik şebekesinin gerilim kararlılığına katkısının incelendiği bir çalışmada V2G şarj sistemlerinin şebeke gerilim kararlılığını iyileştirmede etkili olduğu ortaya çıkmaktadır (Mohamed Shazly A. 2020). Bir başka çalışmada hem V2G hem de G2V uygulamaları ile

önerilen modelde elektrikli araçların reaktif güç dengelemeye yardım etmesi amacıyla yapılan testlerde batarya ömrü üzerinde herhangi negatif bir etki yapmadan şebeke gerilim profilini pozitif yönde iyileştirmektedir (Mazumder ve Debbarma 2021a).

Aşağıdaki tabloda V2G uygulaması için yapılan güncel çalışmalarda gerilim kararlılığına etkisi ile ilgili bazı analiz sonuçları özet halinde sunulmaktadır.

Tablo 2: V2G Teknolojisinin gerilim kararlılığına etkisi Hakkında Yapılan Güncel Çalışmalar ve Özetleri

Referans	Çalışma Alanı	Sonuç
(SivaramKrishnan vd. 2025)	Elektrikli araçlar için akıllı şarj çözümleri-gerilim dalgalanmaları	Şebeke ve Bütünleşik Güç Kalitesi Düzenleyici içeren, güneş enerjisiyle çalışan bir Elektrikli Araç (EA) şarj istasyonu için iki farklı algoritmayı aynı anda çalıştıracak bir yaklaşım önermektedir. Çalışmaya göre önerilen sistem ile güç sisteminin dinamik tepkiselliği artmakta, gerilim yükselmeleri ve çökmeleri gibi geçici olaylar sırasında daha iyi güç kalitesi kontrolü sağlanmaya yönelik katkıda bulunmaktadır.
(Türkoğlu vd. 2024)	V2G Uygulaması ile Elektrikli araçlardan faydalanma ve şebeke kararlılığı	Farklı IEEE test baraları ile elektrikli araçların V2G uygulamasında aktif güç kaybını azaltma, güç dengesi ve voltaj kararlılığı analiz edilen çalışmada önerilen bir senaryoda sistemin aktif güç kaybını azalttığı ve voltaj dalgalanmalarını kısmı oranlarda engellediği ortaya çıkmaktadır.
(Alghsoonl E vd. 2017)	V2G Uygulaması ile Güç kalitesi, Gerilim ve frekans kararlılığı analizi	Gerçek bir trafo merkezine ait yük profili ile tasarlanan dağıtım şebekesi üzerinden V2G uygulamasının sistemin güç kalitesi, gerilim ve frekans kararlılığı analizinin yapıldığı çalışmada V2G sisteminde yüksek şarj

		seviyelerinde kullanılması gerilim karalılığı ve güç kalitesi açısından güvenli bulunmaktadır.
(Mazumder ve Debbarma 2021b)	EA şarj İstasyonları ve Akıllı şebekelere entegrasyonu	Mevcut dağıtım şebekesine entegre edilen elektrikli araçların V2G ile hızlı ve yavaş şarj durumlarının fizibilitesi yapılan çalışmada elektrikli araçların voltaj dengesine olan olumsuz etkilerini azaltmak için reaktif güç kompanzasyonu olarak modüle edilen sistemde voltaj değişimleri olmakta, ancak bu sapsmalar standartların kabul edilebilir sınırları içerisinde yer almaktadır.
(Yıldırım D. 2024)	V2G ile G2V sistemlerinde enerji yönetimi	V2G uygulaması ile önerilen modelde şebeke gerilimini etkin bir şekilde düzenlediğı ortaya çıkmaktadır.
(Huang ve Sandström 2025)	Şebeke yönetimi, fiyatlandırma optimizasyonu	V2G ile koordineli şarjın, bireysel kontrollere kıyasla pik yükleri daha etkili bir şekilde azalttığını ortaya koymaktadır. Ancak, V2G, iyi düzenlenmezse, yüksek EA penetrasyon seviyelerinde pik yükleri artırdığını de göstermiştir.
(Secchi vd. 2025)	PV-V2G koordinasyonu	EA kaynaklı yüksek güç talebi dalgalanmalara neden olarak trafo merkezlerini zorlayabileceğinden dolayı trafodaki net yük güç varyanslarını en aza indirmek için merkezi çift yönlü V2G akıllı EA şarj uygulamasını önerilmektedir. Yapılan çalışma ile kontrolle PV destekli V2G, trafo yük varyansını %80 azalttığı ve sistem esnekliğini artırdığı ortaya çıkmıştır.
(Arsalan vd. 2025)	Araç-Şebeke (V2G) sisteminin genel ekonomik fizibilitesi	V2G teknolojisinin ekonomik analizinin yapıldığı çalışmada bir EA kullanıcısının, koordineli bir sistemde V2G katılımı altında hatırı sayılır miktarda tasarruf elde edebileceğini ortaya koymaktadır.

V2G teknolojisinin hem güç sistemleri üzerinde hem de elektrik araç sahipleri nezdinde birçok avantajı bulunmaktadır. Ancak V2G sisteminin tam düzenlenmediği ve enerji yönetiminin dengeli sağlanamadığı durumlarda mevcut dağıtım sistemine elektrikli araç yüklerinin entegre edilmesi, baralardaki gerilim düşüşlerine ve bunun sonucunda sistem verimliliğinin azalmasına yol açabilir. Bu durumun temel nedeni, baralar arasında yükün dengesiz bir şekilde dağılmasıdır. Konut tarafında çok sayıda tek fazlı şarj cihazının bulunması ve bunların üç fazlı sistem boyunca düzgün şekilde dağıtılmaması, gerilim dengesizliklerine neden olabilir (Yuvaraj vd. 2024) .

V2G Teknolojisinin Uygulama Avantajları ve Zorlukları

Akıllı şebekelere V2G'nin uygulanması, doğası gereği teknik ve operasyonel olarak karmaşıktır. Dalgalanma düzeltme ve diğer görevler için gerekli olan şarj ve deşarj döngüleri, pilin korunması ve binlerce elektrikli aracın optimum kontrolü konusunda endişeler doğurmaktadır. V2G sistemlerini, şebeke operatörlerini ve elektrik piyasalarını başarılı bir şekilde senkronize etmek için sofistike iletişim sistemleri ve ilgili politikalar ve önlemler de gereklidir. Ayrıca, V2G'nin frekans kararlılığındaki etkinliği, tüketicilerden alınan yanıtlara ve elektrikli araç sahiplerine şebeke hizmetlerinin sağlanması konusunda verilen teşviklere bağlıdır. Bununla birlikte, V2G teknolojisinin sanal atalet ile birlikte kullanılması, frekansın kararlılığını artırma ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artan yoğunluğu ile birlikte elektrik sistemi kaynaklarının tedarik ve kullanımının entegrasyon faktörünü iyileştirme olasılığını da sunmaktadır (Ben Sassi H. vd. 2019). Güneş Enerji sistemi ile birlikte Enerji depolama sistemi entegre edilen EA şarj istasyonun akıllı kontrol ile enerji tüketimin maksimum olduğu zamanlarda trafoyu aşırı yükten kurtarmayı ve tüketimin az olduğu anlarda şebekeye enerji akışını sağlayan bir sistemin uygulanabilirliği analiz edilen bir çalışmada, EA için 100

kW ve 200 kW olmak üzere iki batarya sistemi, Trafo için 121 kVA ve 200 kVA iki farklı güçte trafo ve 22 kW PV sistemi üzerinde testler yapılmıştır. Depolamanın (EA batarya) kapasitesine bağlı olarak trafonun aşırı yüklenmesinde neredeyse %138'lik bir azalma sağlanabileceği belirtilmiştir (Datta, Kalam, ve Shi 2020). Aşağıda yer alan Şekil 7' de V2G teknolojisi yolundaki teknik zorluklar ve engeller özet olarak görülmektedir.

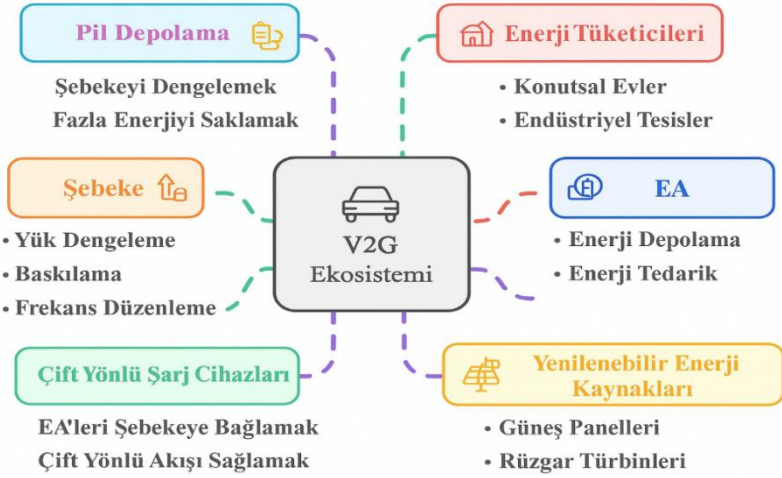
Şekil 7: V2G teknolojisi yolundaki teknik zorluklar



Kaynak: (Kumar vd. 2025)

Elektrikli araç şarj istasyonlarının karşılaştığı teknik ve operasyonel zorlukları analiz edilen bir çalışma ile EVCS konumlandırmasının önemini vurgulamış ve şarj istasyonu türleri ile seviyelerini detaylı şekilde incelemiştir. Ayrıca, lityum iyon batarya şarj stratejileri ve Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) gibi temel teknolojileri açıklayarak şarj altyapısının performans ve verimlilik açısından değerlendirilmesini sağlamıştır (Pareek vd. 2020). V2G teknolojisi ile birlikte akıllı şebekede enerji trafiği ve temel ekosistemi şekil 8'de görülmektedir.

Şekil 8: V2G Ekosistemi



Kaynak: (Kumar vd. 2025)

Başka bir çalışmada bir grup elektrikli aracın yenilenebilir enerji kaynağı (Güneş) ile desteklenen bir tesiste Batarya Şarj İstasyonu ve Batarya Değişim Sistemi ile şebeke senkronizasyonu V2G ve G2V ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Amaç, EA kullanıcıları için hizmet kalitesini artırmak ve maksimum enerji talep dönemlerinde şebeke desteği sağlamaktır. Geliştirilen kısıtlı optimizasyon algoritmasının performansı, çeşitli hizmet ve fiyatlandırma seçeneklerini içeren senaryolar üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, önerilen modelin kullanımının hem ekonomi hem de işletme yönetimi açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir (Aktar vd. 2024).

Aşağıdaki tabloda güncel V2G uygulamalarına ait çalışmalarda ortaya çıkan bazı avantajlar ve zorluklar özet halinde sunulmaktadır.

Tablo 3: V2G Teknolojisinin Avantajları ve Zorlukları ile İlgili Güncel Çalışmalar

Referans	Avantajlar	Zorluklar
----------	------------	-----------

(Van Eijk vd. 2025)	Şebeke esnekliği, karbon emisyonu düşmesi	Kurumsal rol belirsizliği, standart eksiklikleri
(Huang ve Zafar 2025)	Net yük eklemekten şebeke desteği sağlar ve elektrikli araçları pasif tüketicilerden aktif varlıklara dönüştürür.	Batarya döngüsel yıpranma riski, pil döngü bozulmasını artırır.
(Callanan, Samuelsson, ve Márquez-Fernández 2025)	Pik yük yönetimi, yük paylaşımı	Trafolarda aşırı yüklenme riski
(Zhang vd. 2025)	Gerçek zamanlı kontrol kolaylığı	Haberleşme altyapısında gecikme ve senkronizasyon sorunu
(Alatise vd. 2025)	Şebeke dengeleme, acil durum desteği	Kullanıcı katılım isteksizliği
(Bortotti vd. 2023)	Frekans düzenleme, pik tıraşlama ve mevsimlik enerji depolama, Şebekeye destek sağlayarak elektrik kalitesini artırır.	Batarya kapasite düşümü, Şarj verimliliği ve Çevresel düzenlemelerin eksikliği
(Kumar vd. 2025)	EA'lar pik talep sırasında şebeke operasyonlarını desteklemekte, sera gazı emisyonlarını azaltır, şebeke esnekliğini ve dayanıklılığını artırarak sürdürülebilir enerjiye katkı sağlar.	Ek batarya çevrimleri nedeniyle ömür kısalması
(Yayla S. 2024)	Mobil depolama aracı olarak hizmet vermesi, trafo kapasite kullanım oranını düşürmek, Trafo ani yük dalgalanmalarını düzenlemek	V2G'nin uygulama tarafındaki zorluklar, şebeke ile entegrasyon zorlukları, fiyatlandırma ve EA sahiplerinin V2G izin süreçleri
(Vásquez-Cardona vd. 2025)	Arıza durumlarında güç sisteminin frekans tepkisini hızlandırabilir ve kararlılığa ulaşmasına destek olabilir.	Yüksek EV penetrasyon senaryolarında şebekenin frekans bozukluklarına dayanma kabiliyetinin zayıflatabilmektedir.

Sonuç olarak, elektrikli araçların ve araçtan şebekeye teknolojisinin, sürdürülebilir ve karbonsuz bir enerji sistemine geçişte hayati bir rol oynayacağını açıkça göstermektedir. EA'ların

muazzam büyümesi, özellikle aralıklı yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve iletim-dağıtım ağlarının istikrarı için gerekli olan büyük ölçekli dağıtılmış güç depolama kapasitesi için büyük bir fırsat sunmaktadır. Bunun yanında elektrikli araçlar gelecekteki şebekeler için kritik bir depolama çözümü ve elektrik tedarikçisi olarak hizmet etme potansiyeli taşımaktadır. V2G, yük dengeleme, reaktif güç kontrolü, gerilim ve frekans dalgalanmalarının azaltılması gibi yardımcı şebeke hizmetleri sunma konusunda umut vaat etmektedir. Ancak, V2G teknolojisine ait kültürün tam olarak uygulanması ve EA penetrasyonunun şebeke istikrarına zarar vermeden yönetilmesi çeşitli teknik, operasyonel ve ticari zorluklar içermektedir. En kritik zorluklar, yüksek şarj/deşarj döngüleri nedeniyle pil ömrünün korunması, güç elektroniği kayıplarının yönetilmesi için gelişmiş kontrol algoritmalarına duyulan ihtiyaç ve çift yönlü güç akışını teşvik edecek uygun bir iş modelinin olmamasıdır. Gelecekteki araştırmalar, bu zorlukların üstesinden gelmeye odaklanabilir.

Sonuç olarak, V2G teknolojisi şu anda hala büyüme aşamasında olmasına rağmen, gelecekteki şebeke modernizasyonu ve düşük karbonlu bir enerji ağının desteklenmesi için önemli ve vazgeçilmez bir potansiyel barındırmaktadır.

Kaynakça

Aktar, A. K., A. Taşcıkaraoğlu, O. Erdinç, ve S. Güner. 2024. “Impacts of Distribution-Level Joint Scheduling of Electric Vehicle Battery Charging and Swapping Stations on Reliability Improvement”. *IEEE Transactions on Industry Applications* 60(5):7844-57. doi:10.1109/TIA.2024.3416093.

Alatise, Olayiwola, Ruizhu Wu, Arkadeep Deb, ve Jose Ortiz Gonzalez. 2025. “Second life potential of electric vehicle power electronics for more circular economies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 210:115238. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115238.

Alghsoonl E, Harb A, ve Hamdan M. 2017. *Power Quality and Stability Impacts of Vehicle to Grid (V2G) Connection*. IEEE.

Areola, Raphael I., Abayomi A. Adebisi, ve Katleho Moloi. 2025. “Integrated Energy Storage Systems for Enhanced Grid Efficiency: A Comprehensive Review of Technologies and Applications”. *Energies* 18(7).

Arsalan, Muhammad, Etoju Jacob, Zifei Nie, ve Hooman Farzaneh. 2025. “Analyzing the impact of battery technical performance and driving conditions on the overall economic feasibility of a Vehicle-to-Grid (V2G) system implemented in the Japan electric power exchange (JEPX) market”. *Energy Conversion and Management: X* 26:100980. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100980.

Baraniak, Joanna, ve Jacek Starzyński. 2020. “Modeling the impact of electric vehicle charging systems on electric power quality”. *Energies* 13(15). doi:10.3390/en13153951.

Bortotti, Marcos Frederico, Pascoal Rigolin, Miguel Edgar Morales Udaeta, ve José Aquiles Baesso Grimoni. 2023. “Comprehensive Energy Analysis of Vehicle-to-Grid (V2G)

Integration with the Power Grid: A Systemic Approach Incorporating Integrated Resource Planning Methodology”. *Applied Sciences* (Switzerland) 13(20). doi:10.3390/app132011119.

Callanan, Alice, Olof Samuelsson, ve Francisco J. Márquez-Fernández. 2025. “Impact of aggregated electric vehicle home charging in the sub-transmission grid”. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 13:101066. doi:https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101066.

Datta, Ujjwal, Akhtar Kalam, ve Juan Shi. 2020. “Smart control of BESS in PV integrated EV charging station for reducing transformer overloading and providing battery-to-grid service”. *Journal of Energy Storage* 28:101224. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101224.

Dewi, Citra, Adrianti Adrianti, ve Muhammad Nasir. 2025a. “A Comprehensive Review of Vehicle-to-Grid Technology Effect on Frequency Stability in Electric Power Systems”. *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology* 5(02):106-20. doi:10.25077/aijaset.v5i02.203.

Dewi, Citra, Adrianti Adrianti, ve Muhammad Nasir. 2025b. “A Comprehensive Review of Vehicle-to-Grid Technology Effect on Frequency Stability in Electric Power Systems”. *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology* 5(02):106-20. doi:10.25077/aijaset.v5i02.203.

Van Eijk, Mark W., Jan Anne Annema, Mylène Van der Koogh, ve Zofia Lukso. 2025. “Institutional barriers to vehicle-to-grid implementation in Europe”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 217:115653. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115653.

Elalfy, D. A., E. Gouda, M. F. Kotb, ve B. E. Sedhom. 2023. "Frequency Regulation Based on Antlion Optimization Technique for Microgrids with Electric Vehicles". Ss. 1-7 içinde *2023 24th International Middle East Power System Conference (MEPCON)*.

Huang, Pei, ve Maria Sandström. 2025. "Do smart charging and vehicle-to-grid strengthen or strain power grids with rising EV adoption? Insights from a Swedish residential network". *Applied Energy* 401:126713. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126713>.

Huang, Pei, ve Rehman Zafar. 2025. "Enhancing grid hosting capacity through an Electric Vehicle based virtual Electricity Network (EVEN)". *Journal of Energy Storage* 140:119028. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119028>.

Katic, Vladimir, Aleksandar M, Aleksandar Stanisavljević, Boris Dumnic, ve Bane Popadic. 2019. *Impact of V2G operation of electric vehicle chargers on distribution grid during voltage dips*.

Kaygusuz, Asım, Özge Tuttokmağlı, ve Ayşe Acar. 2025. "Investigation of the effects of distributed-uncertain production and consumption conditions on power system stability". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 40(2):1049-58. doi:10.17341/gazimmfd.884439.

Kempton, Willett, ve Jasna Tomić. 2005. "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue". *Journal of Power Sources* 144(1):268-79. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.12.025.

Kouzelis, Antonios, Koen Linders, Soumya Bandyopadhyay, ve Gautham Ram Chandra Mouli. 2025. "Analysis of vehicle-integrated photovoltaics and vehicle-to-grid on electric vehicle

battery life”. *Journal of Power Sources* 631:236117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.236117>.

Közkurt, Cemil, Harun Özbay, Adem Dalcalı, ve Mehmet Tektaş. 2020. “Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar”. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* 3(1):34-50. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jitsa/issue//712337>.

Kulat, H. S., DrTT Waghmare, Gopalkrishna D. Dalvi, ve Shrikant Burje. t.y. *Issue 1s (2025) Vehicle-to-Grid (V2G) Technology for Renewable Energy Storage and Grid Stability*. C. 14. <https://www.jneonatalurg.compg.1427>.

Kumar, Pulkit, Harpreet Kaur Channi, Raman Kumar, Asha Rajiv, Bharti Kumari, Gurpartap Singh, Sehijpal Singh, Issa Farhan Dyab, ve Jasmina Lozanović. 2025. “A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future”. *Energy Conversion and Management: X* 25.

Liu, Jia, Huijun Wu, Huakun Huang, ve Hongxing Yang. 2023. “Renewable energy design and optimization for a net-zero energy building integrating electric vehicles and battery storage considering grid flexibility”. *Energy Conversion and Management* 298:117768. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117768>.

Mazumder, Mondeep, ve Sanjoy Debbarma. 2021a. “EV Charging Stations with a Provision of V2G and Voltage Support in a Distribution Network”. *IEEE Systems Journal* 15(1):662-71. doi:10.1109/JSYST.2020.3002769.

Mazumder, Mondeep, ve Sanjoy Debbarma. 2021b. “EV Charging Stations with a Provision of V2G and Voltage Support in a Distribution Network”. *IEEE Systems Journal* 15(1):662-71. doi:10.1109/JSYST.2020.3002769.

Mohamed Shazly A. 2020. "Design and Control of V2G to Enhance System Voltage Stability". *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering* 7(1):1-18. doi:10.13189/ujeee.2020.070101.

Nair, Anjali J., Induja J. Vineeth, ve V. Nair. 2023. "Improvement of Power Quality in Electric Vehicle Charging". *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)* 5:238. doi:10.35629/5252-0507238241.

Nour, Morsy, José Chaves-Ávila, Gaber Magdy, ve Álvaro Sánchez-Miralles. 2020. "Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems". *Energies* 13:4675. doi:10.3390/en13184675.

Pareek, S., A. Sujil, S. Ratra, ve R. Kumar. 2020. "Electric Vehicle Charging Station Challenges and Opportunities: A Future Perspective". Ss. 1-6 içinde *2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3)*.

Pradana, Adlan, M. M. Haque, ve Mithulananthan Nadarajah. 2025. "A comprehensive framework for harnessing energy arbitrage benefits through an electric vehicle aggregator". *Journal of Energy Storage* 139:118617. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118617.

Qays, Md. Ohirul, Iftekhar Ahmad, Daryoush Habibi, ve Paul Moses. 2025. "Long-term techno-economic analysis considering system strength and reliability shortfalls of electric vehicle-to-grid-systems installations integrated with renewable energy generators using hybrid GRU-classical optimization method". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 76:104294. doi:https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104294.

Safari, Ashkan, ve Afshin Rahimi. 2025. "Vehicle-to-everything mode of operation technologies: A state-of-art systematic review". *Applied Energy* 398:126382. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126382>.

Ben Sassi H., Errahimi F., Essbai N., ve Alaoui C. 2019. *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*. IEEE.

Saygın, , D., O. ., Tör, M. ., Koç, S. ., Teimourzadeh, J. ., Hildermeier, ve C. Kolokathis. 2019. *Türkiye ulaştırma sektörünün dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri*.

Secchi, M., D. Macii, G. Barchi, ve M. Marinelli. 2025. "Centralised vehicle-to-grid smart charging supported by PV generation for power variance minimisation at the transformer: A user's perspective analysis". *eTransportation* 24:100394. doi:<https://doi.org/10.1016/j.etrans.2025.100394>.

SivaramKrishnan, M., N. Kathirvel, C. Kumar, ve Tomonobu Senjyu. 2025. "Smart charging solution for electric vehicles: Leveraging grid connected solar PV with UPQC using HBA-MORARNN approach". *Energy Reports* 13:2454-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.004>.

Şahin, Habip. 2025. "Electricity Consumption of Electric Vehicles in Türkiye and Its Share in Total Electricity Consumption: 2030 Projection". *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 37(1):423-32. doi:10.35234/fumbd.1603738.

Tayri, Asiri, ve Xiandong Ma. 2025. "Grid Impacts of Electric Vehicle Charging: A Review of Challenges and Mitigation Strategies". *Energies* 18(14).

Theo Laughner, Stan Heckman, Angel Manzur, Chris Sloop. 2024. “Analysis of Total Harmonic Distortion on the U.S. Electric Grid”. *Whiskerlabs*, Kasım 11.

Türkoğlu, A. Selim, H. Cihan Güldorum, Ibrahim Sengor, Alper Çiçek, Ozan Erdinç, ve Barry P. Hayes. 2024. “Maximizing EV profit and grid stability through Virtual Power Plant considering V2G”. *Energy Reports* 11:3509-20. doi:10.1016/j.egyr.2024.03.013.

Vásquez-Cardona, Daniela, Sergio D. Saldarriaga-Zuluaga, Santiago Bustamante-Mesa, Jesús M. López-Lezama, ve Nicolás Muñoz-Galeano. 2025. “Impacts of Electric Vehicle Penetration on the Frequency Stability of Curaçao’s Power Network”. *World Electric Vehicle Journal* 16(5). doi:10.3390/wevj16050264.

Woo, Soomin, Leo Strobel, Yuhao Yuan, Marco Pruckner, ve Timothy E. Lipman. 2025. “Exploring bidirectional charging strategies for an electric vehicle population”. *Applied Energy* 397:126361. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126361.

Xiaoming, Han, ve Qian Jingjing. 2025. “Increasing integration of wind energy through the joint operation of electric vehicles and the grid using the intelligent spider monkey algorithm”. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 64:102017. doi:https://doi.org/10.1016/j.jestech.2025.102017.

Yayla S. 2024. *Elektrikli Araç Şarjının Şebeke Etkisini İyileştirmek İçin Yenilenebilir Enerji Kaynakları İle Desteklenen Araçtan Şebekeye (V2g) Enerji Yönetim Sistemi - Tezi*.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.

Yıldırım D. 2024. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçeren Akıllı Şebekelerde Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinin Araçtan Şebekeye Enerji Yönetimi - Yüksek Lisans Tezi*. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.

Yuvaraj, T., K. R. Devabalaji, J. A. Kumar, S. B. Thanikanti, ve N. I. Nwulu. 2024. “A Comprehensive Review and Analysis of the Allocation of Electric Vehicle Charging Stations in Distribution Networks”. *IEEE Access* 12:5404-61. doi:10.1109/ACCESS.2023.3349274.

Zhang, Baokun, Junjun Deng, Mengchen Duan, Chang Li, Yi Zheng, Shuo Wang, ve David Dorrell. 2025. “Design and Implementation of Interoperable High-Efficiency Bidirectional Wireless Power Transfer Systems for Multiple Vehicles”. *Green Energy and Intelligent Transportation* 100307. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geits.2025.100307>.

BÖLÜM 9

X- IŞINI KIRINIMI(XRD) ANALİZİ VE KULLANIM ALANLARI

YUNUS AKALTUN¹

Giriş

X-Işını Kırınımı (XRD, X-ray Diffraction) analizi, malzeme bilimi, kimya, fizik ve jeoloji gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir. Kristal yapıya sahip malzemelerin atomik düzeni hakkında detaylı bilgi sağlayan bu teknik, malzeme analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, malzemelerin kristal yapısını, faz bileşimlerini, kristal boyutlarını ve iç gerilmelerini belirlemek için kullanılan XRD analizi, modern malzeme bilimi araştırmalarında vazgeçilmez bir yöntemdir.

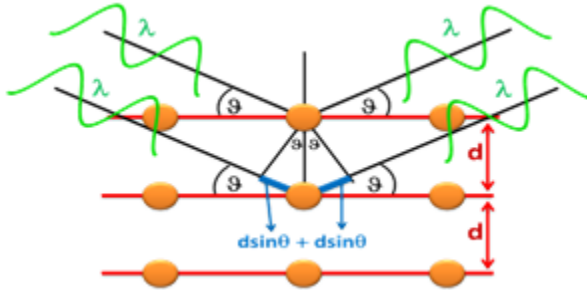
XRD analizleri, genellikle toz veya ince film numuneleri üzerinde uygulanmaktadır. Deneysel düzenekte bir X-ışını kaynağı, numune ve dedektör bulunur. Numuneye belirli bir açıyla X-ışını gönderilir ve yansıyan ışınlar belirli açılarda algılanarak bir kırınım deseni oluşturur. Bu yöntem, malzemelerin iç yapısına dair detaylı bilgi sağlar ve faz analizinde önemli bir araç olarak kullanılır.

¹ Prof. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9534-9106

XRD ANALİZİNİN TEMELLERİ

XRD analizi, kristal yapılı malzemelerin X- ışınları ile etkileşiminden kaynaklanan kırınım desenlerini inceler. Temel prensip, Bragg Yasası'na dayanır:

Şekil 1. Bragg yasasının temsili gösterimi.



Bu şekil, X-ışınlarının kristal içindeki atomik düzlemlerden yansıyarak Bragg kırınımı oluşturma prensibini göstermektedir. Gelen X-ışınları kristal düzlemlerine belirli bir θ (teta) açısıyla çarpar ve üst üste gelen yansımaların yapıcı girişim oluşturabilmesi için iki ışın arasında yol farkının tam sayı katı dalga boyuna ($n\lambda$) eşit olması gerekir [1-4].

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Burada;

- n tam sayılı bir katsayı,
- λ X- ışınının dalga boyu,
- d kristal düzlemleri arasındaki mesafe,
- θ kırınım açısıdır.

Bragg Yasasının Açıklaması

- X-ışınları, kristal yapıya gönderildiğinde atomik düzlemlerden yansır.

- Eğer yansıyan ışınlar kendi aralarında girişim yaparak kuvvetlenirse, kırınım gözlemlenir.
- Bu konstrüktif girişim (yapıcı girişim) ancak yukarıdaki Bragg şartı sağlandığında meydana gelir.

Bragg Yasasının Önemi ve Kullanımı

- XRD analizinde **faz tanımlaması** yapmak için kullanılır.
- Kristal yapının düzlem aralıklarını (d) belirlemeye yardımcı olur.
- Malzemenin kristal yapısındaki bozuklukları ve iç gerilmeleri analiz etmek için kullanılır.

Bir kristal yapı, belirli açılarda gelen X- ışınlarını belirli yönlerde yansıtarak bir kırınım modeli oluşturur. Bu model, malzemenin kristal yapısı ve faz bileşimleri hakkında bilgi verir. XRD analizinde, X-ışınlarının bir numune üzerine gönderilmesi ve geri saçılan ışınların belirli açılarda dedektörler tarafından toplanmasıyla bir kırınım deseni elde edilir. Bu kırınım deseni, malzemenin iç yapısını anlamada temel bir veri kaynağıdır.

XRD Cihazları ve Ölçüm Teknikleri XRD analizlerinde kullanılan cihazlar genellikle iki ana bileşenden oluşur: X-ışını tüpü ve dedektör. X-ışınları, yüksek gerilim altında çalışan bir anot ve katot sistemi aracılığıyla üretilir. Numune üzerine düşen X-ışınları, kristal yapı içerisindeki atomik düzlemlerden yansır ve belirli açılarda girişim desenleri oluşturur. Dedektör, bu desenleri ölçerek veri toplar.

XRD ölçüm teknikleri şunlardır:

- **Toz XRD (PXR):** Polikristal numuneler üzerinde faz analizi yapmak için kullanılır.
- **İnce Film XRD:** Kaplamaların ve ince filmlerin kristal yapısını incelemek için uygundur.

- **Yüksek Çözünürlüklü XRD (HRXRD):** Mikro ve nano yapılı malzemelerin detaylı karakterizasyonu için kullanılır.
- **Gerinim ve Doku Analizleri:** Malzeme içindeki gerilimlerin belirlenmesine yardımcı olur.

Şekil 2. XRD cihazı



XRD pikleri, kristal yapıya sahip malzemeler analiz edildiğinde, belirli açılarda (2θ) yoğun X-ışını kırınımalarının oluşmasıyla ortaya çıkar. Bu pikler, malzemenin atomik düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının Bragg şartını sağlaması sonucu gözlemlenir.

XRD Piklerinin Oluşumu

1. X-ışınları malzemeye gönderildiğinde, ışınlar kristal içindeki atomik düzlemlerden yansır.
2. Bragg yasasına uygun açılarda, girişim sonucu kuvvetli bir kırınım meydana gelir.
3. Bu kırınım XRD dedektörü tarafından ölçülür ve belirli bir 2θ açısında bir pik olarak kaydedilir.

4. Farklı düzlemler (hkl indeksleri) farklı açılarda kırınımına neden olduğu için, her kristalin kendine özgü bir XRD deseni oluşur.

XRD Piklerinin Özellikleri

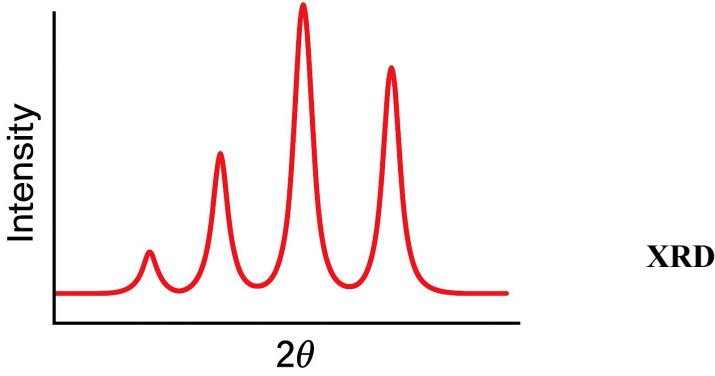
- **Pik Konumu (2 θ):** Malzemenin kristal yapısına ve kafes parametrelerine bağlıdır.
- **Pik Şiddeti:** Kristal içindeki **düzlemlerin atom yoğunluğu** ve X-ışınının bu düzlemlerle etkileşimi belirleyicidir.
- **Pik Genişliği:** Kristal boyutu küçüldükçe pikler genişler (Scherrer Denklemi ile hesaplanabilir).

XRD Pikleri ile Hangi Bilgiler Elde Edilir?

- Malzemenin faz bileşimi ve kristal yapısı belirlenebilir.
- Kristal boyutu, iç gerilmeler ve hata oranları hakkında bilgi verir.
- Numunenin tek kristal mi, polikristal mi yoksa amorf mu olduğu anlaşılabilir.

Özetle, XRD pikleri, kristal yapıların benzersiz bir "parmak izi" gibidir ve malzemelerin tanımlanması, saflık analizi ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi için kritik öneme sahiptir.

Şekil 3. Örnek bir XRD piki



Bu şekil, bir malzemenin kristal yapısının analizinde kullanılan X-ışını kırınım (XRD) desenini göstermektedir. Grafikte yatay eksen 2θ (difraksiyon açısı), dikey eksen ise kırınım şiddetini (Intensity) temsil etmektedir. Grafikte görülen kırmızı eğri üzerinde birkaç adet keskin tepe (pik) bulunmaktadır. Bu pikler:

- Kristal içindeki atomik düzlemlerden yansıyan X-ışınlarının Bragg koşulu sağlandığında oluşturduğu yapıcı girişime karşılık gelir.
- Her bir pik, belirli bir kristal düzlemine (ör: (100), (101), (110), (200) vb.) karşılık gelen d-aralığının varlığını gösterir.
- Piklerin konumu (2θ değeri) malzemenin kristal fazını, piklerin yüksekliği ise düzlemlerin tercihli yönelimi veya kristal miktarı/yoğunluğu hakkında bilgi verir.
- Pik genişlikleri kristalin boyutu, gerilme durumu ve kusur yoğunluğu gibi parametrelerle ilişkilidir.

Bu örnek XRD deseninde birden fazla keskin pik olması, analiz edilen malzemenin:

- Kristalin bir yapıya sahip olduğunu,
- Farklı düzlemlerden kırınım meydana geldiğini,
- Muhtemelen çok fazlı değil, tek fazlı bir yapı içerdiğini (pikler düzenli ve uyumlu olduğu için) işaret eder.

ANALİZİNİN KULLANIM ALANLARI

Kristal Yapı Analizi

XRD, bir malzemenin kristal yapısını belirlemek için en etkili yöntemlerden biridir. Malzemenin kristal fazlarını [5-7], kafes parametrelerini ve atomik düzenini [8-10] belirlemek için kullanılır. Bu analiz, özellikle metal, seramik ve polimer malzemelerde kristal yapı özelliklerini incelemek için yaygın olarak kullanılır.

Faz Analizi

Bir malzemenin içinde bulunan kristal fazların belirlenmesi için XRD analizi kullanılır. Malzemelerin hangi kristal yapıda olduğu, farklı fazların oranları ve önemli faz geçişleri bu analiz ile incelenebilir. Örneğin, çimento ve seramik malzemelerde faz analizi yapılarak üretim süreçlerinin optimizasyonu sağlanabilir.

Malzeme Saflığı ve Kusur Analizi

Kristal yapılardaki kusurlar, çatlaklar ve malzeme saflığı XRD analizi ile tespit edilebilir. Özellikle yarı iletken malzemeler, seramikler ve metal alaşımlarında malzeme saflığı kritik bir faktördür. XRD analizi, safsızlıkların belirlenmesi ve malzemenin istenilen özellikleri sağlayıp sağlamadığını test etmek için kullanılır.

Gerinim ve Tekstil Yapılarının Analizi

XRD, ince film ve kaplama malzemelerinde iç gerilmelerin belirlenmesi için kullanılır. Malzemelerin üretim sürecinde maruz kaldıkları mekanik gerilmeler XRD yöntemi ile ölçülerek mekanik

dayanıklılık analizleri yapılabilir. Ayrıca, lifli malzemelerin tekstil yapısını incelemek için de XRD kullanılabilmektedir.

Nanomalzeme ve İnce Film Karakterizasyonu

Nanomalzemelerin yapısını anlamak ve ince filmlerin kalınlığını ve kristal yapısını analiz etmek için XRD tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, yarı iletken cihazların üretiminde ve fotovoltaiik malzemelerde ince film tabakalarının analizinde büyük önem taşır.

Metalurji ve Seramik Uygulamaları

XRD, metalurji ve seramik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal alaşımlarının faz analizleri, kristal yapıları ve termal işleme bağıli yapısal değişiklikler bu teknik ile belirlenebilir. Aynı şekilde, seramik malzemelerin üretim sürecinde XRD kullanılarak faz dönüşümleri ve sinterleme işlemi değerlendirilir.

Farmasötik ve Kimyasal Uygulamalar

Farmasötik sektörde XRD analizi, ilaçların kristal formunu belirlemek ve amorf-kristal oranlarını analiz etmek için kullanılır. İlacın çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını etkileyen kristal yapı, XRD ile tespit edilerek ilaç geliştirme sürecinde kritik bilgiler sağlar. Ayrıca, kimya sektöründe katalizörlerin kristal yapısı ve reaktiflerin faz analizleri için de yaygın olarak uygulanmaktadır.

SONUÇ

XRD analizi, kristal yapıli malzemelerin detayli olarak karakterize edilmesini sağlayan güçlü bir tekniktir. Malzeme bilimi, kimya, fizik ve jeoloji alanlarında yaygın olarak kullanılan bu yöntem, malzemelerin yapısal analizini gerçekleştirmek için kritik bir öneme sahiptir. Teknolojik gelişmelerle birlikte XRD cihazlarının hassasiyeti artmış ve çok daha detayli analizler yapılabilir hale

gelmiştir. Gelişmiş veri işleme yöntemleri ile XRD sonuçları daha hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilerek malzemelerin atomik yapıları üzerine kapsamlı bilgiler elde edilmektedir. Bu nedenle, XRD analizi günümüzde ve gelecekte malzeme karakterizasyonunda temel tekniklerden biri olmaya devam edecektir.

Kaynakça

1. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray diffraction* (3rd ed.). Pearson. Warren, B. E. *X-ray Diffraction*, Dover Publications, 1990.
2. Hammond, C. (2009). *The basics of crystallography and diffraction*. Oxford University Press.
3. West, A. R. (2014). *Solid state chemistry and its applications*. Wiley.
4. Warren, B. E. (1990). *X-ray diffraction*. Dover Publications.
5. Yu, D., Griesemer, S., Liu, T. C., et al. (2025). Automated phase mapping of high-throughput X-ray diffraction data encoded with domain-specific materials science knowledge. *npj Computational Materials*, 11, 354. <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01837-6>
6. Rincón, S., González, G., Macías, M. A., et al. (2025). A new benchmark for machine learning applied to powder X-ray diffraction. *Scientific Data*, 12, 1186. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05534-3>
7. Yue, W., Mehdi, M. R., Tripathi, P. K., et al. (2024). Exploring 2D X-ray diffraction phase fraction analysis with convolutional neural networks: Insights from kinematic-diffraction simulations. *MRS Advances*, 9, 921–928. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00862-9>
8. Chernyshev, V. V. (2023). Structural characterization of pharmaceutical cocrystals with the use of laboratory X-ray powder diffraction patterns. *Crystals*, 13(4), 640. <https://doi.org/10.3390/cryst13040640>
9. Murakami, R., Matsushita, Y., Nagata, K., Shouno, H., & Yoshikawa, H. (2023). Bayesian inference to

identify crystalline structures for XRD. *arXiv preprint arXiv:2309.14785*

10. Racioppi, S., Otero-de-la-Roza, A., Hajinazar, S., & Zurek, E. (2025). Powder X-ray diffraction assisted evolutionary algorithm for crystal structure prediction. *Digital Discovery*, 4, 73–83.
<https://doi.org/10.1039/D4DD000269E>

BÖLÜM 10

PCPDTBT ARA KATMANLI SCHOTTKY BARİYER DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE YÜKSEK FREKANSLI MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜNDE KULLANIMI

1. Özgün UZ¹

2. Burak TAŞ²

3. Ömer Berkan ÇELİK³

4. Özge TÜZÜN ÖZMEN⁴

GİRİŞ

Memristör teknolojisi, adını hafıza (memory) ve direnç (resistor) kelimelerinin birleşiminden alır. İlk kez 1971 yılında Leon Chua tarafından teorik olarak tanımlanan memristör, elektrik devrelerinin dördüncü temel elemanı olarak kabul edilmiştir [1]. Ancak bu teorik temelin pratikte somut bir bileşen olarak

¹ Doktora Öğrencisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-6752-2861

² Araştırma Görevlisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-9928-5004

³ Yüksek Lisans Öğrencisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0009-0004-0116-766X

⁴ Prof. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Orcid: 0000-0002-5204-3737

geliştirilmesi, 2008 yılında HP Labs'in nanoteknolojik araştırmaları sonucunda mümkün olabilmektedir. Memristörler, elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi temsil eden ve aynı anda hem bellek hem de direnç özelliklerini taşıyan yenilikçi cihazlardır. Tarihsel gelişimi incelendiğinde, memristörler, yalnızca elektronik bileşenlerin evrimi açısından değil, aynı zamanda biyolojik sinir sistemlerinin modellenmesinde sunduğu benzerlikler ile yapay zeka alanında yeni bir paradigma oluşturma potansiyeline sahiptir.

Memristörlerin yapay zeka uygulamalarındaki önemi, düşük enerji tüketimi, hızlı veri işleme yeteneği ve paralel hesaplama kapasitesinden kaynaklanmaktadır [2]. Geleneksel transistör tabanlı sistemler, veri miktarındaki üstel artış karşısında enerji ve hız açısından sınırlamalarla karşılaşırken, memristörlerin biyolojik sinapslara benzer yapısı, sinir ağı modellerinin daha verimli şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle büyük verinin işlendiği ve dinamik öğrenme süreçlerinin gerektiği derin öğrenme gibi modern yapay zeka uygulamalarında büyük avantajlar sunmaktadır.

Bununla birlikte, memristör teknolojisi yalnızca avantajlarıyla değil, aynı zamanda bazı sınırlamaları ve zorluklarıyla da dikkat çekmektedir. Üretim süreçlerindeki karmaşıklığın gerektirdiği teknik bilgi ve yüksek teknolojinin yanı sıra, üretim tekniklerinin pahalılığı ve zorluklarına dayalı yüksek maliyeti nedeniyle, memristörlerin henüz ticari üretimi ve kullanımı bulunmamaktadır [3].

Yüksek maliyetleri nedeniyle memristörler her ne kadar ticari olarak kullanılsalar da, sağladığı avantajları göz önüne koyabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmış ve memristörlerin özelliklerini birebir taklit edebilen emülatör devreleri önerilmiştir [4]. Ancak bu devrelerin çoğu, karmaşık yapıları ve düşük uygulanabilirlikleri nedeniyle ticari olarak yeterince ilgi

görmemiştir [5]. Literatürde, memristör emülasyonu üzerine yapılan çalışmalar giderek çeşitlenmiş; bazı araştırmalarda bu devreler filtre, osilatör veya eğitim amaçlı uygulamalarda kullanılmıştır [10-12]. Ayrıca TiO_2 tabanlı memristörlerin simülasyon ortamında modellenmesine yönelik örnekler de bulunmaktadır [9]. Uluslararası düzeyde ise memristör emülatörlerinin paralel hesaplama, düşük enerji tüketimi ve sinyal işleme gibi alanlardaki potansiyeli üzerine çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir [2,3,8]. Tüm bu çalışmalar, memristör teknolojisinin hem akademik hem de uygulamalı yönünü desteklemekte; özellikle düşük maliyetli ve yüksek frekanslı emülatör tasarımlarına yönelik araştırmaların önemini ortaya koymaktadır.

Önerilen bu emülatör devreleri arasında uygulanabilirliğinin kolay olması ile dikkat çeken memristif köprü diyot uygulaması en düşük maliyetle üretilebilecek memristör emülatörlerinden biridir [6]. Ancak bu emülatör devresi, diyotlar temel alınarak tasarlandığından dolayı yeterince yüksek frekanslara ulaşamamaktadır [7].

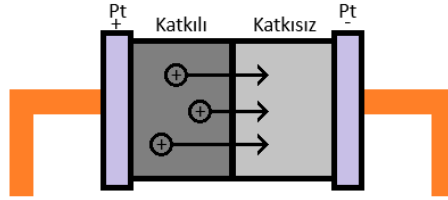
Bu çalışma kapsamında, memristörlerin çalışma prensipleri incelenerek, memristörlerin kullanımına uygun olacak şekilde daha yüksek çalışma frekansına ve düşük sızıntı akımına sahip diyotların geliştirilmesi gerektiği ön görülmüştür. Ardından bu özelliklere sahip Schottky Bariyer Diyot'un tasarımı ve üretimi yapılarak memristif köprü diyot uygulaması geliştirilmiş ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Karakterizasyon sonucunda elde edilen sonuçlar, çeşitli parametrelerle ilişkilendirilerek gelecekte kullanılacak olan emülatör tasarımları için literatüre bilgi sağlanması amaçlanmıştır [5].

Memristörün Tanımı ve Modellenmesi

Memristörler, 1971 yılında ilk defa Leon Chua tarafından teorik olarak tanımlanan, direnç, bobin ve kondansatör olarak bilinen

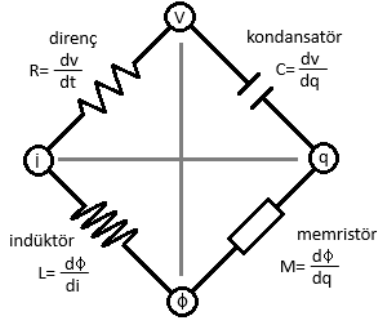
3 temel pasif devre pasif elemanlarından farklı olarak lineer olmayan özellik gösteren pasif elektrik elemanıdır. Memristörler ismini Memory (İngilizce: Hafıza) ve resistor (İngilizce: Direnç) kelimelerinden almaktadır.

Memristörler, 2008 yılında HP araştırma ekibi tarafından yapılan bir çalışma ile ilk defa fiziksel olarak üretilene kadar yeterince ilgi görmemekteydi. Şekil 1’de gösterildiği üzere iki Pt (Platin) elektrot plaka arasında ince bir TiO_2 yarıiletken eklem tabaka yerleştirilerek gerçekleştirilen memristör, elektrik akımı uygulandığında yarıiletken tabakasında yer alan oksijen atomlarının hareketiyle elektrik direncini değiştirmiştir.



Şekil 1. HP araştırma ekibi tarafından tasarlanan memristör modeli

Memristörler, üzerinden geçen akıma göre direnç değerini değiştirebilme ve devreden çıkarılsa dahi son direnç değerini koruyabilme yeteneğine sahiptir. Memristörün gerilim, akım ve yük ile olan ilişkisi Şekil 2’de gösterilmiştir:



Şekil 2. Temel pasif elemanlarının yük (q), gerilim (v), akı (ϕ), ve akım (i) ilişkileri

- C , gerilim ve elektrik yükü arasındaki ilişkiyle ($C = dq/dv$),
- L , akıyla akım arasındaki ilişkiyle ($L = d\phi/di$),
- R , gerilimle akım arasındaki ilişkiyle ($R = dv/di$), tanımlanır.

Memristörün elektrik yükü ve akı arasındaki ilişki ise Eşitlik 1’de gösterilmiştir.

$$M = dq/d\phi \quad [1]$$

Memristörün anlık direnç değeri (R_w), hem (R_{ON})hem de (R_{OFF})değerlerine bağlıdır ve memristörde biriken yükün (w) göreceli konumuyla ilişkilidir. Eşitlik 2’de gösterildiği üzere, bu konum, memristörün durumunun ne kadar iletken veya yalıtkan olduğunu belirler.

$$R_w = R_{ON} \cdot w/D + R_{OFF} \cdot (1 - w/D) \quad [2]$$

Açıklamalar:

R_{ON} : Memristörün düşük dirençli (iletken) durumu. Bu direnç, memristörün "on" durumunda olduğu zaman ortaya çıkar ve akımın daha serbestçe akmasına olanak tanır.

R_{OFF} : Memristörün yüksek dirençli (yalıtkan) durumu. Bu direnç, memristörün "off" durumunda olduğu zaman ortaya çıkar ve akımın geçişini büyük ölçüde sınırlar.

w : Memristörün aktif uzunluğu veya durum değişkeni. Bu uzunluk, memristörün içindeki iletken bölgenin toplam cihaz uzunluğuna göre oranını ifade eder.

D : Memristörün toplam uzunluğu. Bu değer, memristörün fiziksel boyutlarını ifade eder.

Bu denklem, memristörün durum değişkeni üzerinden anlık direnç değerini hesaplamada kullanılan bir temel bağıntıdır ve memristörün doğrusal olmayan davranışını yansıtır.

Memristörün R_w değerini hesaplamak için hem iletken R_{ON} hem de yalıtkan R_{OFF} bölgenin etkilerini birleştirir. Denklemdaki w/D oranı, memristörün iletkenlik durumunu ifade eder:

Eğer w , D 'ye yakınsa ($w/D \rightarrow 1$): Memristörün içindeki iletken bölge daha geniştir, bu yüzden R_w düşük olur ve memristör daha çok "ON" durumuna benzer.

Eğer w , 0 'a yakınsa ($w/D \rightarrow 0$): Memristörün içindeki yalıtkan bölge daha geniştir, bu yüzden R_w yüksek olur ve memristör daha çok "OFF" durumuna benzer.

Memristörün en belirgin karakteristik özelliği, akım-gerilim grafiği ele alındığında göze çarpan histerezis eğrisidir. Histerezis eğrişi devredeki voltaj ve akım arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu ilişki, memristörün içindeki memristansın (direncin değişen bir formu) yük miktarına göre dinamik olarak değişmesine dayanır.

Histerezis eğrisi, memristörün bu doğrusal olmayan ilişkiyi görselleştirmek için kullanılan grafiksel bir temsildir.

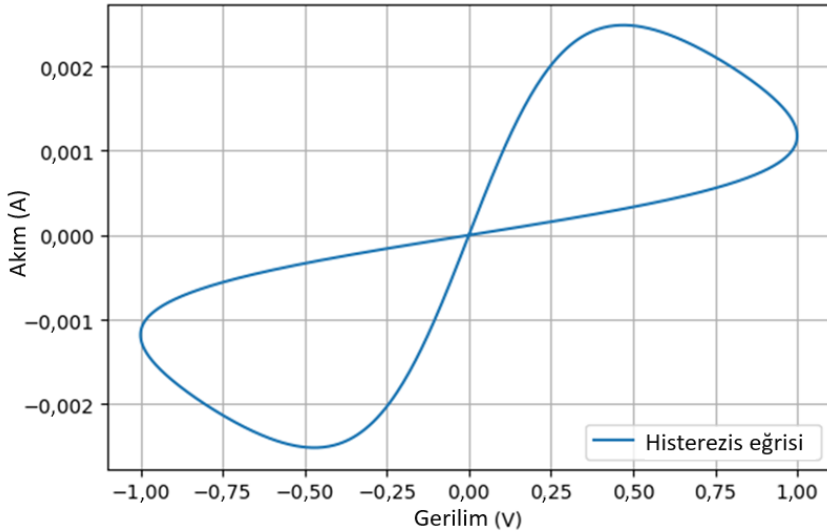
Memristans yük miktarı Eşitlik 3'te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$q = \sum [v(t) \cdot d(t)] \quad [3]$$

Eşitlik 4'te gösterildiği gibi memristans, R_{ON} ve maksimum R_{OFF} direnç değerlerine bağlı olmakla birlikte yük miktarına göre değişir:

$$M(q) = R_{ON} + (R_{OFF} - R_{ON}) \cdot \frac{q}{\max(q)} \quad [4]$$

Eğer Eşitlik 1-4 dikkate alınarak bir memristörün akım-gerilim grafiği oluşturulsaydı, Şekil 3'teki grafikte gösterilen histerezis eğrisinin oluşması beklenirdi.

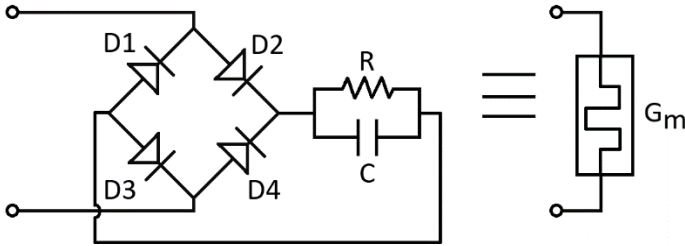


Şekil 3. Memristif histerezis eğrisi.

Şekil 3’te gösterildiği üzere, memristörler aynı gerilim altında farklı akım değerlerine sahip olabilmektedir. Bu, memristörlerin lineer bir davranış göstermediğinin ve direnç değerini uygulanan gerilime göre non-linear değiştirdiğini göstermektedir

Memristif Köprü Diyotun Modellenmesi

Literatürde yer alan memristör emülatör devreleri incelendiğinde, özellikle Corinto ve Ascoli tarafından geliştirilen memristif köprü diyot yaklaşımı dikkat çekmektedir. Bu yapı, genelleştirilmiş bir memristör modelini temel alarak tam dalga doğrultma işlemini gerçekleştirmekte ve yalnızca temel elektronik bileşenler (dört diyot, bir indüktör, bir kapasitör ve bir direnç) kullanılarak ikinci dereceden bir RC filtre ile tamamlanmaktadır. Söz konusu memristif köprü diyotun eşdeğer devre şeması Şekil 4’te sunulmuştur.



Şekil 4. Memristif Köprü Diyot Devresi

Bu tür memristif doğrultucu devreler, literatürdeki diğer alternatiflere kıyasla daha sade bir yapıya sahip olmaları ve uygulama açısından kolaylık sağlamaları nedeniyle öne çıkmaktadır. Ayrıca düşük üretim maliyeti, bu devrelerin cazibesini artıran bir diğer faktördür. Bununla birlikte, memristör tabanlı devrelerin potansiyeli, genellikle düşük çalışma frekansları nedeniyle sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmada, memristif köprü diyotların uygulama potansiyelini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla, araştırma ekibimiz tarafından Metal-Polimer-Yarıiletken (MPY) yapısına sahip Schottky bariyer diyotların (SBD) kullanıldığı yeni bir tasarım önerilmiştir. MPY SBD'ler; katkı malzemelerinin çeşitlendirilebilmesi sayesinde farklı elektriksel karakteristiklerin elde edilebilmesi, üretim süreçlerinin görece basit olması, düşük maliyetli üretim imkânı, geniş frekans aralığında düşük güçle çalışabilmeleri ve literatürde yer alan kapsamlı bilgi birikimi gibi birçok avantaj sunmaktadır.

Bu avantajlar doğrultusunda, farklı karakteristik özelliklere sahip memristif köprü diyotların üretimi ve bu özelliklerin karşılaştırmalı analizi mümkün hale gelmektedir. Bu bağlamda, ilk kez özel olarak üretilmiş MPY SBD diyotlar kullanılarak memristif köprü diyot uygulaması gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Araştırma ekibimiz daha önceki çalışmalarda farklı karışım oranları ile bir ön çalışma yayınlamış olup, 1 kHz çalışma frekansına sahip bir memristif köprü diyot üreterek zaten bu çalışma için gerekli temeli oluşturmuştur [13]. Bu çalışmada daha yüksek bir frekansa ulaşmak hedeflenmiştir.

MPY SBD'in Tasarımı Ve Üretimi

Çalışmamızın bu aşamaya kadar olan kısmı, yüksek çalışma frekansına ulaşabilen MPY SBD'lerin memristif köprü diyot uygulamalarında çok büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Üretimi gerçekleştirilecek olan MPY SBD'in Au/PCPDTBT/n-Si yapısında olması uygun görülmüştür. Bu yapı üretimi kolay ve düşük maliyetli olmasının yanısıra diyot parametrelerine etki eden değişkenlerin (organik polimer

  zeltisindeki malzeme sayısı, diyotun iş y  k  fonksiyonu gibi) daha az olmasıyla, daha anlaşılır olmasını sağlayacaktır.

Üretim ilk aşamasında alttaş olarak kullanılacak olan <1 0 0> dizilimine sahip n-tipi Fosfor (P) katkılı mono kristal Si plakalar kullanılmıştır. Si plakalar elmas kesici yardımıyla yaklaşıl 15'er mm kenarlara sahip kare pullar halinde kesilerek Hidroflorik Asit (HF)   zeltisinde 10 saniye bırakılarak temizlenmiştir. Ardından saf su ile durulanarak hotplate üzerinde kurumaya bırakılmıştır.

Üretim ikinci adımında, Sigma Aldrich markasından temin edilen PCPDTBT polimeri kloroform ile manyetik karıştırıcıda oda sıcaklığı olan 300  K ortamında 12 saat boyunca karıştırılarak, 25mg/ml konsantrasyonundaki polimer çözeltisi elde edilmiş ve sonraki aşamalarda kullanılmak üzere hazır edilmiştir. Hazırlanan PCPDTBT   zeltisi diyotların tamamında ara katman olarak kullanılmıştır.

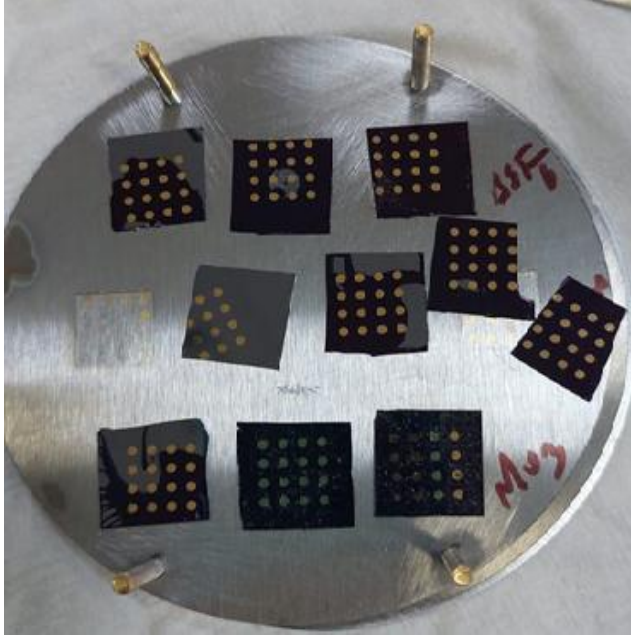
Üretim     nc  aşamasında temizlenen Si pulların mat yüzeyleri 1500  kalınlığında gümüş (Ag) kaplanmak üzere kaplama maskelerine dizilmiş ve ardından termal evaporatöre yerleştirilmiştir. Termal evaporatörde kaplanan Si pullar, daha iletken bir yüzey elde etmek için 450  C sıcaklığa ayarlanmış hotplate üzerinde 30 dakika boyunca tavlannmıştır. Ag kaplama işlemi tamamlanan Si Pullar şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: Ag kaplama işlemi tamamlanan Si pullar

Üretimin dördüncü aşamasında ara katmanın oluşturulması için önceden hazırlanan PCPDTBT çözeltisi 1500 devir/dakika hızında spin kaplama cihazında uygulanarak kaplanmıştır.

Üretimin son aşaması olan beşinci adımda ise ara katmanları oluşturulan Si pullar, Au kaplanmak üzere tekrar kaplama maskesine dizilerek termal evaporatöre yerleştirilmiştir. 1500Å kalınlığında Au kaplama işlemi yapılarak Şekil 6'da gösterildiği gibi MPY SBD üretimi tamamlanmıştır.



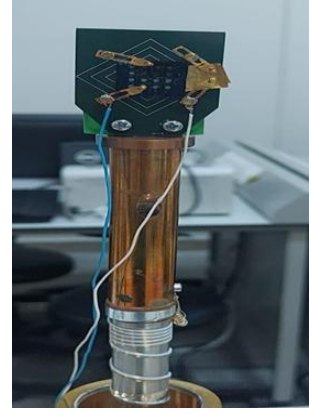
Şekil 6. Üretimi tamamlanan ve test için hazır hale getirilen MPY SBD'ler

Üretilen MPY SBD'lerin Elektriksel Karakterizasyonu

Üretilen MPY SBD'ler elektriksel karakterizasyon testlerinin yapılması için Şekil 7'de gösterilen kirostata (b) yerleştirilmiş ve Keithley 2450 model hassas akım-gerilim test cihazına (a) bağlanmıştır.



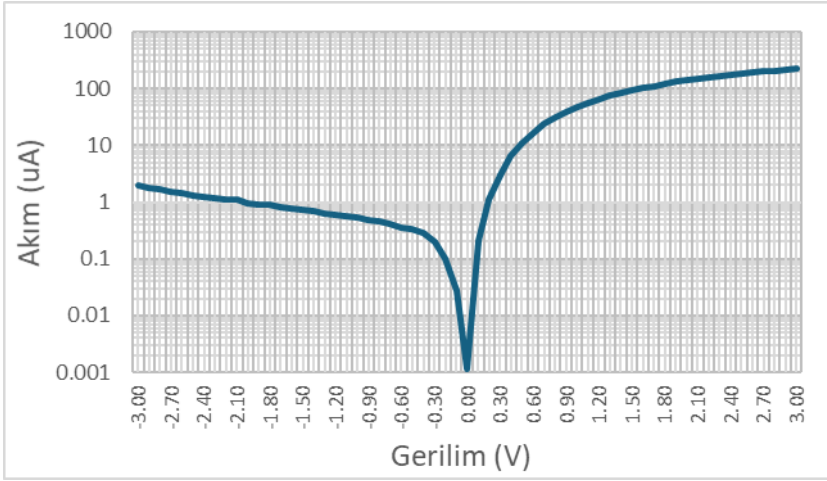
(a)



(b)

Şekil 7. Elektriksel karakterizasyon testinde kullanılan (a). Keithley 2450 akım-gerilim cihazı ve (b). MPY SBD'lerin kreaostata yerleştirilmesi.

Üretilmiş olan MPY SBD'ler kreaostata yerleştirilmiş olup elektriksel karakterizasyon testleri yapılmıştır. Tablo 1'de ilgili testler sonucunda elde edilmiş olan MPY SBD'lerin elektriksel özellikleri verilirken, SBD'lerin ara katmanlarında yer alan malzemelere göre akım gerilim grafiği de Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Üretilen SBD'lerin Akım-Gerilim grafiği

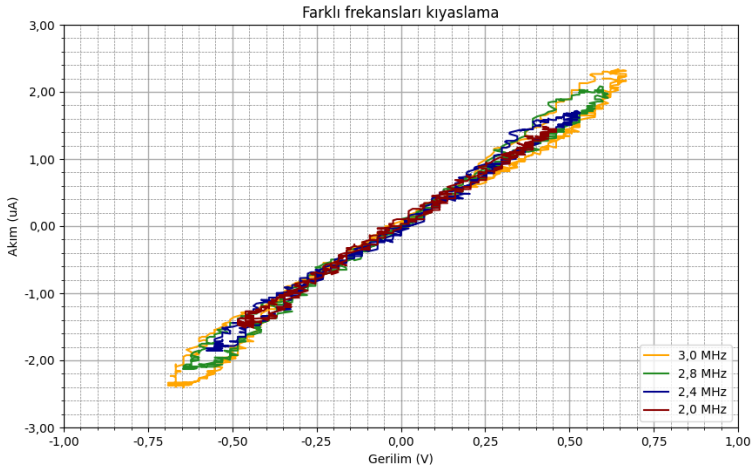
Şekil 8'de yer alan grafikteki veriler incelenerek yapılan hesaplamalara göre, üretilen SBD'lerin karakteristik parametreleri Tablo 1'de gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

Tablo 1. Üretilen SBD'lerin karakteristik parametreleri:

Parametre	Değer
Eğim	4,389
Kesme noktası	-0,782
I_0	0,457
İdealite faktörü	8,805
$\phi_B(I-V)$	0.422
Korelasyon	0,977

Tablo 1'de yer alan SBD parametreleri incelendiğinde, üretilen SBD'nin idealite katsayısının ideale çok yakın olmamakla birlikte, sızıntı akımı ve eğim değerleri dikkate alındığında başarılı bir SBD üretimi olduğu açıkça görülmektedir. Üretilen SBD'ler yüksek iletkenliğe sahip teller ve kontak elemanları ile memristif köprü diyot devresi oluşturulacak şekilde yerleştirildikten sonra

paralel bir 100 ohm direnç ve 47uF kapasitörden oluşan RC devresi yerleştirilmiş ve güç kaynağı ile seri olarak beslenmiştir. Ardından akımı ölçmek için 100k ohm çarpan direnci ile akım sinyali güçlendirilerek, memristör emülatörü üzerinden geçen akım ve emülatörün üzerindeki gerilim osiloskop yardımı ile ölçülmüştür. Farklı frekanslara sahip 7 voltluk sinusoidal sinyalle yapılan ölçümler Şekil 9’da yer alan grafikte gösterilmiştir.



Şekil 9. Üretilen SBD'lerin Akım-Gerilim grafiği

Şekil 9'daki grafik incelendiğinde, farklı frekanslarda histerezis eğrisinin farklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Sırasıyla 2,0 MHz, 2,4 MHz, 2,8 MHz ve 3,0 MHz frekanslarında yapılan ölçümlerde; frekansın artmasıyla birlikte memristör üzerindeki gerilimin ve akımın daha yüksek oldumasının yanı sıra memristif histerezis eğrisinin, daha yumuşak ve belirgin hatlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, memristif köprü diyotun daha yüksek frekanslarda daha fazla güç tükettiğini ve memristif etkinin daha belirgin olduğunu göstermektedir. PCBDTBT katkılı SBD'ler ile yapılmış olan memristif köprü diyotlar, RC değerlerinin de optimize edilmesiyle birlikte daha önceki çalışmalara nazaran daha

etkili sonuçlar göstererek yüksek çalışma frekanslarına ulaşmıştır.

SONUÇ

Bu çalışma, önceki araştırmamızda ilk kez kullanılan Au/PCPDTBT/n-Si tabanlı MPY Schottky diyotların (SBD) üretimini temel alarak, bu yapının memristif devrelerdeki performansını daha ileri düzeyde incelemeyi amaçlamaktadır.

İlk aşamada, üretilen MPY SBD'lerin elektriksel karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve akım-gerilim ölçümleri üzerinden elde edilen parametreler, diyotların sağlıklı ve tekrarlanabilir şekilde üretildiğini göstermiştir. Bu bulgular, önceki çalışmamızın doğruluğunu pekiştirirken, yeni uygulamalar için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Karakterizasyonun ardından, tamamen kendi ürettiğimiz PCPDTBT tabanlı MPY SBD'ler kullanılarak memristif köprü diyot devresi tasarlanmış ve bu devrede yüksek frekanslı memristör emülatörü başarıyla çalıştırılmıştır. Deneyler 2.0 MHz, 2.4 MHz, 2.8 MHz ve 3.0 MHz frekanslarında gerçekleştirilmiş; bu frekans aralığında memristif histerezis eğrisinde belirgin bir daralma gözlemlenmiştir. Bu durum, memristif davranışın frekansla doğrudan ilişkili olduğunu ve devrenin yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, PCPDTBT tabanlı MPY SBD'lerin memristif devrelerde kullanılabilirliğini ortaya koymakla kalmamış; aynı zamanda bu yapıların yüksek frekanslı sistemlerde enerji verimliliği ve histerezis kontrolü açısından optimize edilebileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, memristör teknolojisinin biyomedikal sistemlerden ileri elektronik uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılabilmesi için yeni bir araştırma alanı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma önceki araştırmamızın üzerine inşa edilerek memristörlerin yüksek frekanslı ortamlarda çalışabilirliğini göstermiş ve ticari üretim ile günlük kullanım senaryolarına bir adım daha yaklaşılmış ve sağlanmıştır. Gelecekte yapılacak deneysel ve teorik çalışmalarla bu teknolojinin daha da olgunlaştırılması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma İzmir Bakırçay Üniversitesi BAP-TEZ.2023.1 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] Chua, L. (1971). Memristor—the missing circuit element. IEEE Transactions on Circuit Theory, 18(5), 507–519.
- [2] Lin, R., Shi, G., Qiao, F., Wang, C., & Wu, S. (2022). Research progress and applications of memristor emulator circuits. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University; Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University. Manuscript received November 21, 2022
- [3] Neifar, A., Barraç, I., Mestiri, H., & Masmoudi, M. (2025). Memristor emulator circuits: Recent advances in design methodologies, healthcare applications, and future prospects. Micromachines, 16(7), 818. <https://doi.org/10.3390/mi16070818>
- [4] Alharbi, A. G., & Chowdhury, M. H. (2021). Memristor emulator circuits. Springer.
- [5] Sánchez-López, C., Carro-Pérez, I., Carbajal-Gómez, V. H., Carrasco-Aguilar, M. A., & Morales-López, F. E. (2017). Memristor emulator circuit design and applications. In Memristor and Memristive Neural Networks (pp. 1–25). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69291>

- [6] Üstün, A. K., Apaydın Üstün, M., & Mutlu, R. (2024). A Liénard oscillator circuit with a memristive bridge rectifier. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(2), 126–134. <https://doi.org/10.55581/ejeas.1602019>
- [7] Zhou, L., You, Z., Liang, X., & Li, X. (2022). A memristor-based Colpitts oscillator circuit. *Mathematics*, 10(24), 4820. <https://doi.org/10.3390/math10244820>
- [8] Yang, S., Liu, B., Li, W., Wu, D., He, Y., & Dai, G. (2025). Design and application of passive very high-frequency memristor emulator. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 44, 2330–2348.
- [9] Şahin, M. E., & Güler, H. (2017). TiO₂ memristor modelling with Labview. *Turkish Journal of Science and Technology*, 12(2), 79–83.
- [10] Parlar, İ., & Almalı, M. N. (2024). Memristör taklit devresi kullanılarak yeni bir işlemsel yükselteç modeli ve faz kaydırmalı osilatör devresine uygulanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(3), 1963–1972.
- [11] Parlar, I., & Almalı, M. N. (2020). Memristör Temelli 2. Dereceden Aktif Yüksek Geçiren Filtrenin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 446–456.
- [12] Mutlu, R., Karakulak, E., & Bölümü, E. (2009). Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği*, 13.
- [13] Uz, Ö., Taş, B., Şağban, H. M., Sağbaş, M., & Tüzün Özmen, Ö. (2024). Metal-Polimer-Yarıiletken Yapılı, PCPDTBT: PCBM arayüz katmanlı Schottky bariyer diyotların memristör tasarımında kullanılması. *Mühendislik alanında yeni yaklaşımlar* (pp. 15–32).

