

EDİTÖR

Prof. Dr. Akın ÖZÇİFT

Alanında Araştırmalar
ve Değerlendirmeler

ELEKTRİK, ELEKTRONİK VE HABERLEŞME

Haziran 2025

İmtiyaz Sahibi • Yaşar Hız
Genel Yayın Yönetmeni • Eda Altunel
Yayına Hazırlayan • Gece Kitaplığı
Editör • Doç. Dr. Akın ÖZÇİFT

Birinci Basım • Haziran 2025 / ANKARA

ISBN • 978-625-388-443-7

© copyright
Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan
hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı
Adres: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak Ümit Apt
No: 22/A Çankaya/ANKARA Tel: 0312 384 80 40

www.gecekitapligi.com
gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt
Bizim Buro
Sertifika No: 42488

Elektrik, Elektronik ve Haberleşme Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler

Haziran 2025

Editör:
Doç. Dr. Akın ÖZÇİFT

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

TARİHİ ESER RESTORASYONLARINDA ELEKTRİK TESİSAT UYGULAMASI

Cihangir ÇÖRTEN, Ali GEZER.....1

BÖLÜM 2

ENERJİ DEPOLAMALI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILAN DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Barış ÇAVUŞ, Kübra Nur AKPINAR, Seçil GENÇ.....31

BÖLÜM 3

X BAND UYGULAMALARI İÇİN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

*Caner KALENDER, Mehmet Ali BELEN, Yakup HAMEŞ, Merih
PALANDÖKEN, Filiz GÜNEŞ.....47*

BÖLÜM 4

YAPAY ZEKA TABANLI VEKİL MODELLER KULLANILARAK 6GHZ ALTI 5G FREKANS BANDI UYGULAMALARI İÇİN FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN TASARIMI

Özlem TARİ, Aysu BELEN, Tarlan Mahouti.....67



BÖLÜM

1

TARİHİ ESER RESTORASYONLARINDA ELEKTRİK TESİSAT UYGULAMASI

Cihangir ÇÖRTEN¹

Ali GEZER²

¹ Cihangir ÇÖRTEN, Yük. Elk. Müh., Kayseri Üniversitesi, Siber Güvenlik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 24403800003@kayseri.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7924-0386

² Ali GEZER, Doç. Dr., Kayseri Üniversitesi, Siber Güvenlik Uygulama ve Araştırma Merkezi, agezer@kayseri.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8265-1736

1. GİRİŞ

Restorasyon, bozulmuş, yıpranmış veya zarar görmüş bir yapının, eserin ya da objenin aslına uygun biçimde onarılması ve korunması sürecidir. Bu kavram; tarihi yapılar, sanat eserleri, arkeolojik buluntular, kitaplar, belgeler ve diğer kültürel varlıklar için kullanılmaktadır.

Restorasyonun temel amacı, kültürel, sanatsal ve tarihî değere sahip yapı ya da nesnelerin, özgün niteliklerine sadık kalınarak korunması ve onarılmasıdır. Bu bağlamda, restorasyonun öncelikli hedeflerinden biri özgünlüğün korunmasıdır. Özgünlük, eserin tarihî ve sanatsal kimliğine zarar vermeksizin müdahalede bulunulmasını gerektirir (Ahunbay, 1996). Ayrıca, yapının inşa edildiği dönemden günümüze kadar geçen sürede meydana gelen fiziksel tahribatların giderilmesi, yani zararların onarılması, sürecin bir diğer önemli aşamasıdır. Restorasyon çalışmaları, aynı zamanda kültürel mirasın gelecek kuşaklara aktarılmasını hedefleyerek, tarihsel sürekliliğin sağlanmasına katkıda bulunur (Feilden, 2003). Özellikle mimari restorasyonlarda, yapının işlevselliğinin sürdürülebilirliğini sağlamak da dikkate alınması gereken temel unsurlardandır (Jokilehto, 1999).

Restorasyon faaliyetleri, farklı disiplinlerin katkısını gerektiren çok yönlü bir uygulama alanıdır. Bu faaliyetler, korunması gereken kültürel mirasın türüne bağlı olarak çeşitli uzmanlık alanlarını kapsamaktadır. Bu bağlamda restorasyon çalışmaları; tarihî yapılar ve anıtlar, sanat eserleri (örneğin resimler, heykeller), tarihî mobilyalar ve antika objeler, arkeolojik kalıntılar, el yazmaları ve arşiv belgeleri, duvar resimleri, mozaikler ve benzeri kültürel varlıkları içermektedir (Ahunbay, 1996; Akok, 1984). Her bir varlık türü, kendine özgü malzeme yapısı, bozulma biçimi ve koruma teknikleri barındırdığından, restorasyon süreci yalnızca teknik müdahale ile sınırlı kalmayıp tarihî, sanatsal ve kültürel bağlamın da dikkate alınmasını gerektirir (Aslanapa, 1986). Ayrıca sanat eserlerinin konservasyonu ise estetik bütünlüğün korunması ve sanatçının özgün tekniğine saygı çerçevesinde gerçekleştirilir (Eldem, 1980).

Bunun yanı sıra, restorasyon çalışmaları, sanat tarihi, mimarlık, arkeoloji ve yapı mühendisliği gibi disiplinlere bilimsel veri ve gözlem alanı sunarak eğitim ve araştırma faaliyetlerine katkı sağlar. Aynı zamanda yeni koruma tekniklerinin geliştirilmesi açısından da önemli bir laboratuvar işlevi görür (Feilden, 2003). Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, restorasyonu tamamlanan tarihî yapıların kültür turizmini canlandırdığı ve bu sayede yerel ekonomik gelişime katkıda bulunduğu gözlemlenmektedir (UNESCO, 2013). Ayrıca, mevcut yapıların korunması, yeni yapı inşa etmekten daha az çevresel maliyete

neden olduğu için sürdürülebilir bir yaklaşım olarak öne çıkar. Geleneksel yapı malzemelerinin doğa ile daha uyumlu olması da bu anlayışı desteklemektedir (Stubbs & Makas, 2011). Son olarak, restorasyon uygulamaları toplumun kültürel kimliğini güçlendirir; bireylerin yaşadıkları çevreyle olan duygusal bağlarını derinleştirir ve aidiyet hissini pekiştirir (Ahunbay, 1996).

Bu bağlamda tarihi yapıların restorasyonu yapılar iken yukarıda sayılan ilkelere dikkat edilerek hareket edilmeli ve restorasyon, restitüsyon, röleve ve elektrik projeleri çizilmelidir. Yeni yapılarda elektrik iç tesisatlarının uygulanması, yürürlükteki *Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği* çerçevesinde tanımlanmış teknik standartlara dayanmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2021). Ancak, restorasyon sürecine tabi tutulan tarihî yapılar, inşa edildikleri dönemin mimari anlayışını ve özgün yapı detaylarını barındırmaları nedeniyle özel bir yaklaşım gerektirir. Bu doğrultuda, söz konusu yapıların elektrik projeleri hazırlanırken, mevcut mimari özelliklerin ve tarihî unsurların korunmasına öncelik verilmelidir (Ahunbay, 1996). Örneğin, elektrik tesisatına ait kabloların taş duvarlar, ahşap kaplamalar, kolonlar ya da kirişler gibi özgün yapı elemanlarına denk gelmesi durumunda, mimariye zarar vermeyecek alternatif güzergâhlar üzerinden tesisatın döşenmesi önem arz etmektedir. Nitekim, çağdaş teknik çözümlerin geleneksel mimari ile uyum içinde entegre edilmesi, restorasyonun hem fiziksel bütünlüğünü hem de tarihî kimliğini sürdürülebilir kılmaktadır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, tarihî yapı restorasyonlarında elektrik tesisatlarının döşenmesine ilişkin yöntemler ile dikkat edilmesi gereken hususlar sistematik biçimde ele alınacaktır.

2.TARİHİ ESER RESTORASYONUNDA ÖN CALIŞMA VE PROJELENDİRME SÜRECİ

2.1 Restorasyon Süreci

Restorasyon sürecine başlamadan önce bir ön hazırlık yapılması gerekir. Restorasyon süreci, tarihî yapıların bilimsel temellere dayalı olarak korunmasını ve onarılmasını amaçlayan sistematik bir dizi aşamadan oluşmaktadır. Bu sürecin ilk adımını, yapının tarihsel geçmişine, mimari özelliklerine, malzeme yapısına ve özgün durumuna ilişkin bilgilerin elde edildiği belgeleme ve araştırma safhası oluşturmaktadır (Ahunbay, 1996). Ardından, fiziksel bozulmaların ve yapısal sorunların saptandığı tespit aşamasına geçilmektedir. Bu aşamayı, müdahale planının hazırlanması takip eder; bu plan, yapıya özgü uygun onarım ve koruma yöntemlerini içermelidir (Feilden, 2003). Daha sonra uygulama evresi gelir; bu aşamada, uzman ekiplerce fiziksel müdahaleler gerçekleştirilir. Son olarak, yapının gelecekte benzer zararlara maruz kalmaması amacıyla

uzun vadeli koruma stratejileri geliştirilir ve gerekli önlemler alınır (Jokilehto, 1999).

2.2 Elektrik Tesisatında Çalışacak Ekipler

Tarihi eser restorasyonlarında gerçekleştirilen elektrik tesisatı uygulamaları hem yapının özgünlüğünü korumak hem de çağdaş güvenlik standartlarını karşılamak adına çok disiplinli bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Bu süreçte, özellikle yapıların tarihi ve kültürel değerleri göz önünde bulundurularak, alanında uzman profesyonellerin koordineli biçimde çalışması esastır.

Elektrik mühendisleri, restorasyon sürecinde ilk aşamadan itibaren aktif rol üstlenirler. Bu uzmanlar, yürürlükteki elektrik tesisatı yönetmeliklerine uygun şekilde projelendirme işlemlerini gerçekleştirmenin yanı sıra, uygulama sırasında meydana gelebilecek riskleri öngörerek güvenlik denetimlerini sağlarlar. Aynı zamanda, enerji ihtiyaçlarının belirlenmesi ve bu gereksinimlerin yapıya zarar vermeyecek biçimde entegre edilmesi de mühendislerin sorumluluğundadır (TMMOB, 2020).

Restoratörler ise bu sürecin kültürel ve sanatsal boyutunu denetlemekle yükümlüdür. Elektrik tesisatının yapı içerisine entegre edilirken, özgün malzemeye zarar verilmemesi, tarihi dokunun korunması ve görsel estetiğin bozulmaması gibi kriterler restoratörlerce değerlendirilir. Bu uzmanlar, restorasyon ilkelerine ve ulusal/uluslararası koruma mevzuatlarına uygunluğu gözeterek mühendislik çözümleriyle tarihi koruma ilkeleri arasında denge kurarlar (ICOMOS, 2013).

Teknikerler ve sahadaki uygulayıcı ekipler ise, projede belirlenen özel yöntemler doğrultusunda montaj işlemlerini gerçekleştirirler. Bu uygulamalar, çoğu zaman geleneksel tekniklerle modern altyapı ihtiyaçlarını harmanlayan hassas yöntemler içerir. Özellikle kablo güzergâhlarının görünmez hâle getirilmesi, mevcut duvar dokularına zarar verilmeden gömme tesisat yapılması gibi uygulamalarda ileri seviye teknik bilgi ve deneyim gereklidir (Yılmaz & Çakır, 2018).

Tarihi yapılarda elektrik tesisatı uygulamaları yalnızca teknik bir işlem olarak değerlendirilmemeli; kültürel mirasın korunmasına yönelik bütüncül bir müdahale olarak ele alınmalıdır. Bu nedenle disiplinler arası iş birliği, projelerin hem teknik yeterliliğini hem de kültürel sürdürülebilirliğini güvence altına alır.

2.3 Projelendirme Aşamasında Göz Önünde Bulundurulması Gereken Hususlar

Tarihi yapıların restorasyonu sürecinde elektrik tesisatının projelendirilmesi, sadece teknik bir gereklilik değil; aynı zamanda kültürel mirasın korunması açısından stratejik bir adımdır. Bu nedenle projelendirme aşamasında, yapının tarihsel, mimari ve işlevsel bağlamları çok yönlü biçimde analiz edilmelidir.

Öncelikle, yapıların türü ve inşa edildikleri dönem doğru biçimde tanımlanmalıdır. Bu tanımlama yalnızca terminolojik bir zorunluluk değil; aynı zamanda kullanılacak malzeme, montaj teknikleri ve koruma yöntemlerinin seçiminde belirleyici bir faktördür. Örneğin, Osmanlı dönemi camilerinde kullanılan ahşap tavanlar, Bizans kiliselerinde bulunan mozaikler ya da Selçuklu kervansaraylarının taş işçiliği gibi özellikler, elektrik tesisatının yerleşimi açısından özel hassasiyetler gerektirir (Ahunbay, 2004; Kuban, 2010). Bu nedenle, yapının dönemine özgü mimari teknikler ve estetik anlayış mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

İkinci olarak, mevcut elektrik altyapısının modernize edilip edilmeyeceği ya da yapının orijinal sistemine sadık kalınıp kalınmayacağı önceden netleştirilmelidir. Bu karar hem yapının güvenlik düzeyini hem de müdahale derecesini doğrudan etkiler. Modern sistemlerin entegrasyonu, enerji verimliliği ve güvenlik açısından avantaj sağlasa da, bu tür müdahaleler yapının tarihi dokusuna zarar verme riski taşıyabilir (ICOMOS, 2011). Dolayısıyla bu tür kararlar hem mühendislik hem de restorasyon ilkeleri doğrultusunda disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

Üçüncü olarak, yapının günümüzde üstleneceği işlev, projelendirme aşamasında mutlaka belirlenmelidir. Restorasyon sonrası yapı bir müze, ibadet alanı ya da kültürel etkinlik merkezi olarak kullanılacaksa, elektrik ihtiyacı ve tesisat yerleşimi de bu doğrultuda planlanmalıdır. Örneğin bir ibadet mekânında aydınlatma doğal ışıkla desteklenmeli, oysa sergi amaçlı müzelerde kontrollü ve yönlendirilmiş aydınlatmalar tercih edilmelidir (Çelik, 2017).

İç mekân özellikleri –örneğin kubbeler, tonozlar, taş sütunlar, freskler, vitraylar gibi özgün unsurlar– titizlikle belgelenmeli ve bu unsurların elektrik tesisatı uygulamalarından olumsuz etkilenmemesi sağlanmalıdır. Belgelenme süreci, sadece restorasyonun arşivsel niteliği açısından değil; aynı zamanda tesisatın yönlendirilmesi, montaj

noktalarının seçimi ve yapının zarar görmesinin önlenmesi açısından da yaşamsal önemdedir (Yıldırım & Öztürk, 2019).

Bu bütünsel değerlendirmeler doğrultusunda yürütülen projelendirme süreci hem kültürel mirasın korunmasını hem de yapının günümüz ihtiyaçlarına hizmet edebilmesini olanaklı kılar.

2.4 Elektrik Tesisatı Projelendirme Aşaması

Tarihî yapıların restorasyon süreci, mülkiyet sahibi olan kamu kurumları, yerel yönetimler, özel kuruluşlar veya şahısların talebi üzerine başlatılmakta ve bu kapsamda uzman mimar ve mühendisler tarafından yapı üzerinde detaylı bir fizibilite çalışması gerçekleştirilmektedir. Bu ön çalışma sonucunda yapının mevcut durumu, yapısal özellikleri ve müdahale gereksinimleri bilimsel ölçütlerle analiz edilerek raporlanır (Ahunbay, 1996). Fizibilite raporunu takiben, yapıya özgü olarak hazırlanan restorasyon, restitüsyon ve rölöve projeleri ile elektrik ve mekanik sistem projeleri oluşturulmakta; bu projeler koruma kurullarının değerlendirme ve onay sürecine sunulmaktadır (Kuban, 2000). İlgili koruma kurulu tarafından onaylanan projeler doğrultusunda uygulama aşamasına geçilmekte ve yapı, özgün kimliği korunarak restorasyona tabi tutulmaktadır. Bu süreç, Türkiye'deki kültür varlıklarının korunmasında yasal ve bilimsel çerçeveyi belirleyen temel uygulama prosedürlerinden biridir (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2022).

Tarihî eserlerin restorasyonu kapsamında gerçekleştirilen elektrik tesisatı uygulamaları, yalnızca yapıya enerji sağlama işleviyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yapının tarihî ve estetik bütünlüğünü koruyarak, çağdaş kullanım ihtiyaçlarına cevap verebilecek çözümler üretmeyi amaçlamaktadır. Bu çerçevede, yapılan her müdahale hem teknik açıdan güvenli hem de kültürel mirasın korunması ilkeleri doğrultusunda yüksek duyarlılıkla planlanmalıdır (Ahunbay, 1996; Feilden, 2003). Özellikle tescilli yapılar söz konusu olduğunda, elektrik tesisatına yönelik projeler, tarihî dokunun zarar görmemesi için detaylı analiz ve özgün çözümleme yöntemleriyle geliştirilmelidir (Işıkkaya, 2011). Bu durum, koruma bilimi ile mühendislik uygulamalarının entegre bir şekilde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

3. TARİHİ ESER RESTORASYONLARINDA ELEKTRİK TESİSATI UYGULAMASI

Tarihi yapıların restorasyon süreçlerinde, elektrik tesisatının döşenmesi büyük bir hassasiyet gerektirmektedir. Bu süreçte temel amaç, yapının özgünlüğüne zarar vermemek ve görsel bütünlüğü bozmamaktır. Elektrik tesisatının entegrasyonu sırasında yapının taşıyıcı ve süsleyici mimari unsurlarına zarar verilmemeli, uygulamalar koruma ilkeleri doğrultusunda planlanmalıdır. Özellikle taş, mermer ve ahşap gibi özgün yapı elemanlarının delinmesi, kesilmesi ya da kırılması kesinlikle kabul edilemez bir müdahale türüdür. Yapılar arası geçişlerin zorunlu olduğu durumlarda ise mevcut derz aralıklarının kullanılması tavsiye edilmekte olup bu yöntem, yapısal bütünlüğü koruma açısından en az müdahale içeren çözüm olarak öne çıkmaktadır (Işık, 2016; Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2019).

Özellikle Osmanlı ve Selçuklu dönemi yapılarında sıklıkla karşılaşılan niş, kubbe, tonoz, mihrap ve minber gibi mimari öğelere elektrik tesisatının temas etmemesi gerekmektedir. Bu bölümler hem yapısal hem de estetik açıdan özgünlüğü temsil ettikleri için koruma önceliği taşımaktadır. Tesisat hattının planlanmasında bu alanlardan uzak durularak alternatif güzergâhlar belirlenmeli, mümkünse mevcut boşluklardan faydalanılmalıdır.

Ahşap kaplamaların yoğun olarak kullanıldığı yapılarda yangın riski artmakta olup, bu nedenle elektrik tesisatında kullanılan malzemelerin yangına dayanıklı olması büyük önem arz etmektedir. Kabloların alev iletmez özellikte olması, tesisatın metal koruyucu borular ya da yangına dayanıklı kablo kanalları içerisinde döşenmesi, güvenlik açısından alınabilecek başlıca önlemler arasındadır. Görsel bütünlüğü sağlamak adına bu kablo kanallarının yapıdaki ahşap malzemelere uygun renklerde boyanması tavsiye edilir (Bilgin, 2018).

Tarihi yapının beden duvarlarına monte edilecek armatürlerin uygulanması sırasında, taşıyıcı ya da süsleyici taşlara doğrudan müdahale edilmemelidir. Gerekli durumlarda özel ankraj sistemleri kullanılarak, müdahalenin geri döndürülebilir ve minimum düzeyde olması sağlanmalıdır. Ayrıca tesisat uygulamalarında yapının mevcut mimari yapısına ve dönemin üslup özelliklerine uygun estetik çözümler geliştirilmelidir (Günay, 2006). Elektrik tesisatının sadece teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda koruma etiği çerçevesinde değerlendirilmesi gereken bir unsur olduğu unutulmamalıdır.

3.1 Elektrik Tesisatında Kullanılan Modern Teknolojiler

Tarihi yapıların restorasyon sürecinde elektrik tesisatının günümüz teknolojileriyle entegre edilmesi hem uygulama kolaylığı sağlar hem de yapıların uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. Bu bağlamda, modern teknolojiler, yalnızca teknik altyapıyı iyileştirmekle kalmaz; aynı zamanda kültürel mirasın korunmasına yönelik daha hassas, planlı ve müdahalesiz çözümler sunar.

Günümüzde özellikle akıllı sistemler, restorasyon alanında yaygın olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Bu sistemler; aydınlatma otomasyonu, enerji tüketiminin izlenmesi ve uzaktan müdahale imkânı gibi özelliklerle hem işlevsel hem de güvenlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca yapı içinde insan hareketine göre devreye giren sistemler sayesinde gereksiz enerji tüketimi önlenir; böylece hem enerji verimliliği sağlanır hem de tarihi yapının orijinal aydınlatma düzenine minimum müdahale ile çözüm üretilmiş olur (Gökçe & Aydın, 2020).

Sensörlü aydınlatma sistemleri, tarihi yapıların kullanıcı deneyimini artırırken, aynı zamanda tesisatın görünür şekilde yerleştirilmesini engelleyerek yapının estetik bütünlüğünü korur. Bu sistemler, genellikle hareket ya da gün ışığı sensörleri aracılığıyla devreye girer ve özellikle müze gibi düşük yoğunluklu kullanım alanlarında enerji tasarrufu açısından etkili bir çözüm sunar (Yılmaz & Demir, 2019).

Elektrik tesisatı uygulamalarında ön hazırlık aşamasında kullanılan infrared tarama ve lazer tabanlı yüzey ölçüm teknolojileri, yapıların yüzey detaylarının temassız şekilde analiz edilmesini mümkün kılar. Bu teknolojiler sayesinde kablo kanallarının veya cihaz montaj noktalarının belirlenmesi sırasında mevcut tarihi dokuya zarar verilmeden planlama yapılabilir (ICOMOS, 2011). Özellikle duvar içi nemlenme, çatlak veya deformasyonların tespiti açısından da faydalıdır.

Bununla birlikte, 3D tarama teknolojileri ile entegre edilen Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), restorasyon alanında dijital planlamanın temelini oluşturur. BIM, hem elektrik tesisatı hem de genel yapısal müdahaleler için ayrıntılı katman bilgisi, malzeme özellikleri ve entegrasyon senaryoları sunarak, restorasyon sürecinde tüm disiplinlerin ortak bir dijital platformda çalışmasına olanak tanır. Bu teknoloji sayesinde, müdahalelerin öncesi ve sonrası belgelenebilir, olası hata payları minimize edilebilir (Şahin & Koç, 2021).

Restorasyon projelerinde modern elektrik teknolojilerinin kullanımı, sadece çağdaş gereksinimleri karşılamakla kalmaz; aynı

zamanda koruma süreçlerinin şeffaf, ölçülebilir ve sürdürülebilir olmasını da sağlar.

3.2. Tarihi Eser Elektrik Tesisat Uygulaması

Tarihi yapılarda elektrik tesisatı döşenirken dikkate alınması gereken temel husus, özgün duvar ve tavan yüzeylerinin korunmasıdır. Bu tür yapı elemanları, tarihî kimliğin taşıyıcı unsurları olduğundan, herhangi bir fiziksel müdahale yapının değerine zarar verebilir (Ahunbay, 1996). Estetik açıdan da yapı bütünlüğünün bozulmaması önemlidir; elektrik kabloları ve benzeri donanım unsurlarının mümkün olduğunca görünmeyecek şekilde yerleştirilmesi, tarihî estetiğin sürdürülebilirliği açısından gereklidir (Feilden, 2003). Öte yandan, tarihî yapılarda yangın riski, kullanılan yapı malzemelerinin çoğunlukla yanıcı (örneğin ahşap) olması nedeniyle modern yapılara kıyasla çok daha yüksektir. Bu durum, elektrik tesisatında yanmaz kablo ve ekipman kullanımını zorunlu kılmaktadır (Jokilehto, 1999). Ayrıca, söz konusu yapılar genellikle nem ve rutubete maruz kaldıkları için, tesisat sistemleri bu çevresel etkenlerden etkilenmeyecek biçimde planlanmalı; yalıtımı yüksek ve uzun ömürlü malzemeler tercih edilmelidir (Işıkkaya, 2011).

Tarihi eserlerin restorasyonu sırasında elektrik tesisatının uygulanması, yapının estetik bütünlüğünü ve tarihî kimliğini korurken, çağdaş güvenlik standartlarına uygun bir altyapının kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda ilk olarak yapının mimari ve tarihî özelliklerinin dikkatle analiz edilmesi gerekmektedir. Tesisat döşeme işlemi, yapı elemanlarına zarar vermeyecek şekilde planlanmalı; özellikle duvar ve tavan yüzeylerine müdahale edilmeden, görünürlüğü en aza indiren gizli sistem çözümleri tercih edilmelidir (Ahunbay, 1996).

Yangın güvenliği, tarihî yapılarda en kritik unsurlardan biridir; çünkü bu tür yapılar genellikle ahşap gibi yanıcı malzemelerle inşa edilmiştir. Bu nedenle elektrik tesisatında yanmaz kablo ve bağlantı elemanlarının kullanılması, kabloların yangına dayanıklı borular içinde döşenmesi önerilmektedir. Ayrıca, yapıya entegre edilecek duman dedektörleri, yangın söndürme sistemleri ve kaçak akım röleleri gibi ilave güvenlik önlemleri büyük önem taşımaktadır (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2022).

Malzeme seçimi açısından ise, yapının bulunduğu bölgenin iklimsel koşulları ve yapının mevcut fiziksel durumu dikkate alınmalıdır. Örneğin, yüksek nem oranına sahip yapılarda, nemden etkilenmeyen, yalıtımı güçlü ve uzun ömürlü kablo sistemleri tercih edilmelidir (Işıkkaya,

2011). Estetik uyumluluk da bu sürecin ayrılmaz bir parçasıdır; modern sistemlerin tarihî dokuya zarar vermeden uygulanabilmesi için uygun kaplama teknikleri kullanılmalı ve tesisat, yapının orijinal malzeme ve renk paletiyle uyumlu şekilde döşenmelidir (Feilden, 2003).

Tarihî yapılarda yüksek voltajlı sistemler risk teşkil edebileceğinden, mümkün olduğunca düşük voltajlı aydınlatma ve otomasyon sistemlerinin tercih edilmesi tavsiye edilmektedir (Jokilehto, 1999). Bu yaklaşım hem yapı güvenliğini artırmakta hem de müdahaleyi minimum düzeyde tutarak özgünlüğün korunmasına olanak tanımaktadır.

4.TARİHİ ESER RESTORASYONLARINDA İÇ AYDINLATMA

Tarihi eser restorasyonlarında iç aydınlatma, yalnızca mekânın görsel estetiğini artırma amacı taşımaz; aynı zamanda yapının korunması ve işlevsel olarak sürdürülebilirliğinin sağlanmasında da önemli bir rol üstlenir. Işıklandırma sistemlerinin doğru planlanması, yapının özgün malzemelerinin zaman içinde ışığa bağlı olarak zarar görmesini önleyici etkiler sağlayabilir. Bu bağlamda, iç aydınlatma tasarımı yalnızca görsel konforu değil, aynı zamanda malzeme korunumu ve yapı bütünlüğünü esas almalıdır (Çelik, 2017; ICOMOS, 2008).

Aydınlatma sistemlerinin seçiminde; ışığın yoğunluğu, yönü, rengi ve ısı üretimi gibi teknik faktörler dikkatle değerlendirilmelidir. Özellikle fresk, ahşap, kumaş ve benzeri ışığa duyarlı yüzeylerin bulunduğu yapılarda, aydınlatmanın zararlı etkilerinden korunmak adına düşük UV yayımı olan, kontrollü sistemler tercih edilmelidir. Aynı zamanda bu sistemlerin yapının mimari kompozisyonuyla uyumlu olması, özgün estetik değerlerin gölgede bırakılmaması açısından önemlidir (Yılmaz & Demir, 2019).

4.1 Tarihi Yapılarda İç Aydınlatmanın Temel Amaçları

Tarihi yapılarda iç aydınlatmanın tasarımı, sadece mekânın görünürlüğünü sağlamakla sınırlı kalmaz; aynı zamanda kültürel değerlerin aktarımı, malzeme korunumu ve kullanıcı deneyiminin zenginleştirilmesi gibi çok boyutlu hedeflere hizmet eder. Bu bağlamda iç aydınlatmanın temel amaçları dört ana başlıkta ele alınabilir: estetik vurgulama, ziyaretçi deneyimi, koruma ve fonksiyonellik.

Estetik vurgulama, tarihi yapının özgün mimari detaylarının, süsleme unsurlarının ve sanatsal bileşenlerinin görünürlüğünü artırmaya yöneliktir. Tonozlar, sütun başlıkları, kemerler, duvar resimleri ve yazıtlar gibi öğeler, doğru ışık açısı ve yoğunluğu ile aydınlatıldığında mekânın

tarihsel kimliği öne çıkarılır. Işığın dramatik kullanımı, mimari kompozisyonun algılanabilirliğini güçlendirerek yapıdaki görsel hiyerarşiyi destekler (Kocabey, 2020).

Ziyaretçi deneyimi, yapının tarihî atmosferini kullanıcıya en etkili biçimde aktarmayı hedefler. Aydınlatma, ziyaretçinin mekânla kurduğu duygusal ve bilişsel ilişkiyi derinleştirir. Özellikle müze işlevi gören restorasyonlarda, mekânın dönemin ruhunu yansıtan bir şekilde sunulması, ışığın anlatı aracı olarak kullanılmasını gerektirir (Çelik, 2017). Bu doğrultuda yapılan aydınlatma tasarımları, tarihsel bağlamı bozmadan mekânsal deneyimi zenginleştirmelidir.

Koruma ise tarihi yapıların iç yüzeylerinde bulunan organik ya da ışığa duyarlı malzemelerin uzun ömürlü olmasını sağlamayı amaçlar. Aydınlatma sistemlerinden yayılan UV ışınları, özellikle ahşap, tekstil, kâğıt ve pigmentli yüzeylerde fiziksel ve kimyasal bozulmalara yol açabilir. Bu nedenle iç aydınlatmada düşük UV yayan LED sistemleri tercih edilmeli ve hassas yüzeylere doğrudan ışık teması sınırlandırılmalıdır (Yılmaz & Demir, 2019; ICOMOS, 2008).

Fonksiyonellik, yapının güncel kullanım ihtiyaçlarına cevap verebilmesini ifade eder. Ziyaretçilerin ya da kullanıcıların güvenli bir şekilde mekânda hareket edebilmesi, aydınlatmanın düzeyine ve yerleşimine bağlıdır. Merdivenler, giriş alanları ve yönlendirme unsurları, yeterli düzeyde ve dikkat dağıtmayan biçimde aydınlatılmalıdır. Ayrıca, yapı eğer ibadet, sergi ya da kültürel etkinlik gibi işlevlerle yeniden kullanıma açılmışsa, bu kullanımlara uygun esneklikte aydınlatma çözümleri uygulanmalıdır (Gökçe & Aydın, 2020).

4.2 İç Aydınlatmada Kullanılan Yöntemler ve Uygulama Alanları

Tarihi yapılarda iç aydınlatma sistemlerinin seçimi hem yapının fiziksel korunumu hem de estetik sunumu açısından büyük önem taşır. Bu bağlamda kullanılan aydınlatma teknolojileri, yapının özgün mimarisine zarar vermeyecek şekilde planlanmalı; aynı zamanda enerji verimliliği, kullanım kolaylığı ve malzeme dostu çözümler sunulmalıdır.

Doğal ışık kontrolü, tarihi yapılarda en eski aydınlatma yöntemi olmakla birlikte, modern restorasyon süreçlerinde yeniden işlevselleştirilen önemli bir uygulamadır. Güneş ışığının yapı içine yönlendirilmesi; ışık kanalları, açıklıklar ve vitraylı pencereler gibi mimari unsurlar aracılığıyla sağlanır. Bu yöntem, yapının tarihsel mimarisine sadık kalınarak doğal aydınlatma sağlayan pasif bir çözümdür (Kocabey, 2020).

Dolaylı aydınlatma sistemleri, ışık kaynağının doğrudan görünmediği ve yansıma yoluyla aydınlatmanın sağlandığı uygulamalardır. Bu tür sistemler, tavan kirişleri, duvar nişleri veya sütun arkaları gibi yüzeylere entegre edilerek ışığın mekânda yumuşak bir şekilde dağılmasını sağlar. Özellikle fresklerin veya taş yüzeylerin üzerinde doğrudan ışık kaynaklarının yaratacağı hasarı önlemek açısından tercih edilmektedir (Çelik, 2017).

LED aydınlatma sistemleri, düşük ısı yaymaları, yüksek enerji verimlilikleri ve uzun ömürlü yapıları sayesinde tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılan çağdaş çözümlerden biridir. Özellikle freskler, ahşap yüzeyler ve sanat eserleri gibi ısıya duyarlı materyallerin bulunduğu alanlarda zararsız bir aydınlatma seçeneği sunar (Yılmaz & Demir, 2019).

Tür	Özellikleri	Uygulama Alanı
Doğal Işık Kontrolü	Güneş ışığının yönlendirilmesi	Vitraylı camlar, ışık kanalları
Dolaylı Aydınlatma	Işık kaynağı doğrudan görünmez	Tavan kirişleri, nişler
LED Aydınlatma	Düşük ısı yayar, enerji verimlidir	Sanat eserleri ve freskler
Fiber Optik Sistemler	UV ve IR ışını yaymaz	Kâğıt, kumaş gibi hassas objeler
Akıllı Aydınlatma Sistemleri	Zamanlayıcı ve sensörlerle çalışır	Müzeleştirilmiş tarihi yapılar

Şekil 1. Aydınlatma Türleri ve Kullanım Alanları

Fiber optik sistemler, UV ve IR ışını yaymayan yapısı sayesinde son derece hassas yüzeylerin aydınlatılmasında kullanılmaktadır. Bu sistemler, ışık kaynağının yapının dışında kalmasına imkân tanıyarak, özellikle kâğıt, tekstil veya deri gibi ışığa duyarlı objelerin sergilendiği alanlarda risk oluşturmadan etkin bir aydınlatma sağlamaktadır (ICOMOS, 2008).

Akıllı aydınlatma sistemleri ise sensör, zamanlayıcı ve otomasyon entegrasyonları sayesinde hem enerji tüketimini minimize eder hem de mekânsal kullanıma göre aydınlatma senaryoları oluşturulmasına olanak tanır. Bu sistemler özellikle müze olarak yeniden işlevlendirilen tarihi yapılarda tercih edilmekte; ziyaretçi hareketlerine göre otomatik olarak devreye girerek hem kullanıcı deneyimini artırmakta hem de yapıya gereksiz ışık maruziyetini azaltmaktadır (Gökçe & Aydın, 2020).

4.3 İç Aydınlatmada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Tarihi yapılarda iç aydınlatma sistemlerinin tasarımı ve uygulanması sürecinde, yalnızca görsel yeterlilik değil; aynı zamanda kültürel mirasın korunması açısından birtakım teknik kriterler de büyük önem taşımaktadır. Aydınlatma elemanlarının seçiminden montaj biçimlerine kadar tüm kararlar, yapı malzemelerinin hassasiyeti ve korunma gereklilikleri doğrultusunda değerlendirilmelidir.

İlk olarak, ultraviyole (UV) ve infrared (IR) ışınımının kontrolü, aydınlatma sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biridir. UV ve IR ışınları, özellikle organik kökenli malzemeler üzerinde geri dönüşü olmayan fiziksel ve kimyasal bozulmalara yol açabilir. Ahşap, kâğıt, deri, kumaş ve pigmentli yüzeyler bu tür ışınımına karşı yüksek derecede hassastır. Bu nedenle aydınlatma sistemlerinde UV ve IR filtreleri kullanılmalı veya bu spektrumda ışınım yaymayan armatürler tercih edilmelidir (Yılmaz & Demir, 2019; ICOMOS, 2008).

İkinci olarak, ısı yayımı, aydınlatma kaynağının hem yapıya fiziksel temasında hem de çevresel etkisinde dikkate alınması gereken bir husustur. Geleneksel halojen lambalar ve akkor flamanlı ampuller, yüksek düzeyde ısı üretmeleri nedeniyle tarihi yapılardaki hassas yüzeylere zarar verebilir. Bu yüzden modern restorasyon uygulamalarında düşük ısı yayımı ve yüksek enerji verimliliği sağlayan LED sistemler önerilmektedir (Gökçe & Aydın, 2020).

Üçüncü olarak, yapıya müdahalenin en aza indirilmesi, restorasyon etiği açısından temel bir ilkedir. Aydınlatma sistemleri yapıya zarar vermeyecek, kolayca sökülebilecek ya da geri dönüştürülebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Montaj sırasında orijinal duvarlara, tavanlara veya taş yüzeylere kalıcı müdahaleden kaçınılmalı; bunun yerine yapısal olmayan yüzeylere, mevcut açıklıklara veya özel taşıyıcı sistemlere entegrasyon sağlanmalıdır (Çelik, 2017).

Bununla birlikte renk sıcaklığı, mekânın atmosferini belirleyen önemli bir görsel parametredir. Tarihi yapılarda genellikle 2700K ile 3000K arasındaki sıcak beyaz tonlar tercih edilmektedir. Bu renk aralığı hem doğal gün ışığına yakınlığı hem de tarihi dokuyla uyumlu yumuşaklık sağlaması açısından uygundur. Aynı zamanda bu tonlar, ziyaretçinin algısını rahatsız etmeden mimari detayları ön plana çıkarır (Kocabey, 2020).

Bu kriterlerin bütünsel olarak değerlendirilmesi hem kullanıcı konforunun sağlanması hem de kültürel mirasın sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

4.4 İç Aydınlatmada Kullanılan Teknolojik Uygulamalar

Tarihi yapılarda iç aydınlatma uygulamaları, yalnızca fiziksel ekipman seçimiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda gelişmiş dijital teknolojilerle desteklenerek hem enerji verimliliği hem de koruma odaklı stratejiler doğrultusunda şekillenmektedir. Bu çerçevede, güncel aydınlatma tasarımında kullanılan bazı teknolojik uygulamalar öne çıkmaktadır.

Bunlardan biri olan DALI (Digital Addressable Lighting Interface) sistemi, bireysel armatürlerin dijital adresleme yoluyla merkezi bir kontrol mekanizmasına bağlanmasını sağlar. Bu sistem sayesinde her bir aydınlatma armatürü, mekâna ve zamana özel olarak programlanabilir. Aydınlatma düzeyleri, renk sıcaklıkları ve çalışma senaryoları, yapıdaki farklı işlevsel ve estetik gereksinimlere uygun biçimde uyarlanabilir (Gökçe & Aydın, 2020). Tarihi yapılarda DALI gibi esnek sistemlerin tercih edilmesi, sabit ve homojen aydınlatma çözümlerinin ötesinde, koruma açısından da avantaj sağlamaktadır. Örneğin, günün belirli saatlerinde daha düşük ışık seviyeleriyle hassas objelerin korunması mümkündür.

Bir diğer yenilikçi uygulama olan Li-Fi (Light Fidelity) yönlendirme teknolojisi, LED ışıklar üzerinden veri aktarımı yaparak ziyaretçilerin mekân içindeki konumlarını belirlemeye ve ilgili bilgilere anlık olarak ulaşmalarına olanak tanımaktadır. Özellikle müze olarak işlevlendirilmiş tarihi yapılarda, ziyaretçilerin mobil cihazlarına yönlendirme, sesli anlatım veya dijital rehberlik gibi içerikler bu sistem aracılığıyla aktarılabilir. Bu teknoloji, hem ziyaretçi deneyimini zenginleştirir hem de geleneksel yönlendirme tabelalarına olan ihtiyacı azaltarak yapının bütünlüğünü korur (Yılmaz & Demir, 2019).

3D ışık simülasyonu ise aydınlatma tasarım sürecinde kullanılan ileri düzey bir planlama aracıdır. Yapının dijital ortamda modellenmesiyle birlikte, ışık kaynaklarının fiziksel yüzeylere etkisi üç boyutlu ortamda analiz edilebilmekte, potansiyel yansımalar, gölge oluşumları ve aydınlatma yoğunluğu önceden test edilebilmektedir. Bu yöntem hem estetik hedeflerin hem de yapısal koruma ilkelerinin dengelenmesini mümkün kılar (Kocabey, 2020). Aynı zamanda, müdahale öncesi planlama hassasiyetini artırarak restorasyon sürecinde olası hata riskini azaltır.

Sonuç olarak, dijital teknolojilerin entegre edildiği iç aydınlatma uygulamaları, tarihi yapıların korunması, işlevselleştirilmesi ve ziyaretçi deneyiminin geliştirilmesi açısından büyük katkılar sağlamaktadır. Bu teknolojilerin doğru biçimde planlanması ve uzman ekiplerce uygulanması, kültürel mirasın sürdürülebilirliğinde kritik rol oynamaktadır.

4.5 Ana Besleme Hat Güzergahının Belirlenmesi

Tarihi eserlerin enerji ihtiyacını karşılamak için, elektrik dağıtım şirketine ait iletim hattı ile ana elektrik panosu arasında bir besleme kablosu tesis edilmektedir. Bu hat genellikle havai hat olarak çekilmektedir. Günümüzde havai hatların yer altına alınması tercih edildiğinden, bu yöntem oldukça ilkel olup görüntü kirliliğine neden olmaktadır. Yapılması gereken, tarihi eserin elektrik ihtiyacını karşılayacak kesitteki besleme hattının yer altından bir güzergâh takip ederek, beden duvarına ait taş derz aralığından iç mekâna taşınmasıdır. Böylece, tarihi esere zarar verilmemiş ve görüntü kirliliği ortadan kaldırılmış olur.

Elektrik besleme hattı, görünür bir noktadan ve beden duvarına ait kesme yonu taş delinerek iç mekâna taşınmıştır. (Şekil 1,2)



Şekil 1 Ana besleme hattı



Şekil 2 Ana besleme hattı

4.6 Tarihi Eserlerde Ana Elektrik Panosu Konumlandırılması

Ana pano, eski eserin silüetini etkilemeyecek ve beden duvarlarına ait taşlara zarar vermeyecek bir noktada konumlandırılmalıdır. Ana pano, eserden uzak bir alanda, ayaklı olarak ya da yeni inşa edilecek bir duvarda (örneğin bahçe duvarında) gömme şekilde yerleştirilmelidir. Örneğin, mimari projede iç mekânda sonradan açılmış pencere, kapı veya baca gibi noktaların taşla yeniden örülmesine karar verildiğinde, ana pano bu noktalara yerleştirilerek gizlenebilir.

Şekil 3'te elektrik panosu, eserin silüetini etkileyecek şekilde yanlış bir noktada konumlandırılmıştır. Ayrıca, eserin beden duvarına ankraj edilerek taşlara zarar verilmiştir.



Şekil 3 Ana pano

Şekil 4'te elektrik panosu, eserin silüetini etkilemeyecek şekilde doğru bir noktaya konumlandırılmıştır.



Şekil 4 Ana pano

Şekil 5'te, ana elektrik panosu ahşap görünümlü bir malzeme ile kaplanarak görüntü kirliliği önlenmiştir.



Şekil 5 Ana pano

4.7 Tarihi Eserlerde Tali Elektrik Pano Konumlandırılması

Tarihi eserlerin içine yerleştirilecek tali elektrik panosu, mekânın silüetini etkilemeyecek bir noktada bulunmalı ve mümkün olduğunca göze çarpmamalıdır. Bu bağlamda, sütun arkası veya niş gibi noktalar tercih edilebilir. Ayrıca, tarihi dokuya uygun, eserin estetiğine yakışacak bir malzeme ile kaplanmalı ya da eskitme uygulanarak mekâna uyum sağlamalıdır.

Örneğin, restorasyonu yapılacak eserin bahçe duvarındaki ahşap kapı sonradan açılmıştır. Mimari restorasyon projesinde, bu kapının iptal edilerek yerine kesme taş duvar yapılmasına karar verilmiştir. Onarım

sırasında ortaya çıkan bu yeni durum, mimar ve mühendisler tarafından değerlendirilmiş ve tali elektrik panosunun bu noktaya yerleştirilmesine karar verilmiştir. Böylece hem tarihi esere zarar verilmemiş hem de görüntü kirliliği engellenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6 Tali pano yeri

Şekil 7’te, tali elektrik panosu duvarda bulunan uygun boşluğa gömülmüş ve ahşap görünümlü malzeme ile kaplanarak görüntü kirliliği önlenmiştir.



Şekil 7 Tali pano

Şekil 8'te, tali elektrik panosunda eskitme boya kullanılarak tarihi eser iç mekânıyla uyum sağlanmıştır.



Şekil 8 Tali pano

Şekil 9'te, tali elektrik panosu ahşap görünümlü malzeme kullanılarak tarihi eser iç mekânıyla uyumlu hale getirilmiştir.



Şekil 9 Tali pano

4.8. Tarihi Esere Ait Mimari Detay Aydınlatmaları

Mimari detay aydınlatma, yapıların mimari özelliklerini vurgulamak için kullanılan özel bir aydınlatma türüdür. Bu aydınlatma türü, binanın estetik değerini artırmanın yanı sıra, yapı elemanlarının detaylarını ve özgün özelliklerini ön plana çıkarmayı amaçlar. Kullanılan aydınlatma teknikleri, doğru gölge ve ışık dengesiyle mekânın dokusunu, formunu ve karakterini vurgular, böylece göz alıcı bir estetik yaratır. Tarihi eserler için mimari detaylar; sütun, taç kapı, mihrap, minber, niş, minare, kubbe gibi bölümler olabilir.

Başarılı bir mimari detay aydınlatma uygulaması için dikkate alınması gereken bazı unsurlar şunlardır:

Doğru Işık Kaynağı Seçimi: Işık kaynağının rengi, yoğunluğu ve açısı, detayları vurgulamak için önemlidir. LED ve fiber optik aydınlatmalar, düşük enerji tüketimi ve ayarlanabilir özellikleri ile sıklıkla tercih edilir.

Gölgeler ve Kontrast: Detayları belirgin hale getirmek için uygun kontrast oluşturulmalı, fazla gölge oluşmamasına dikkat edilmelidir. Işık açısı, gölge derinliğini ayarlayarak mimari detayları daha canlı hale getirir.

Renk Tonları ve Doku Vurgulama: Aydınlatma tonları, yapının malzeme dokusunu ön plana çıkarır. Soğuk veya sıcak tonlar ile mekânın atmosferi ve algılanması değiştirilebilir.

Kontrol Sistemleri: Akıllı kontrol sistemleri ile aydınlatma seviyeleri ayarlanarak, günün farklı saatlerine uygun ışık düzenleri oluşturulabilir.

Bu tür mimari detay aydınlatma uygulamaları iç ve dış mekanlarda kullanılabilir. Özellikle müze, tarihi binalar, anıtlar ve modern yapılar gibi özel mimari tasarımlar için idealdir. Aydınlatma tasarımı, mimari ile uyumlu şekilde planlandığında, kullanıcı deneyimini iyileştirerek mekânı daha etkileyici ve estetik kılar.



Şekil 10 Ahşap kolon aydınlatma örneği



Şekil 11 Taş kolon aydınlatma örneği



Şekil 12 Niş aydınlatma örneği



Şekil 13 Mihrap ve minber aydınlatma örneği

4.9. Tarihi Eser Aydınlatma Armatürlerinin Seçimi

Tarihi yapıların restorasyon süreçlerinde aydınlatma armatürlerinin seçimi, sadece işlevsel değil, aynı zamanda estetik ve kültürel bir tercih olarak ele alınmalıdır. Restorasyonun temel ilkelerinden biri olan “özgünlüğün korunması” doğrultusunda, kullanılacak aydınlatma elemanlarının yapının inşa edildiği dönemin mimari üslubuna ve estetik anlayışına uygun olması gerekmektedir. Bu bağlamda, modern ve yüksek teknolojili ürünlerin kullanımı tarihi dokuyla uyumsuzluk yaratabileceğinden ötürü sınırlandırılmalı, tercihen dönemin ruhunu yansıtan ve geleneksel görünümlü eskitme tip armatürler tercih edilmelidir (Günay, 2006; Işık, 2016).

Osmanlı ve Selçuklu dönemlerine ait cami, medrese gibi dini ya da kamusal yapılarda gerçekleştirilen restorasyon projelerinde, cam fanuslu avizeler ve aplikler hem estetik hem de işlevsel bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu tür armatürler, geleneksel ışıklandırma yöntemlerini çağrıştıran tasarımlarıyla yapının tarihsel atmosferine katkı sağlar. Diğer yandan, Bizans ve Roma dönemine ait kilise veya bazilika gibi yapılarda ise şamdan tipi aydınlatma elemanları tarihsel referansları güçlendirmekte ve mekânın özgün karakterini desteklemektedir (Bilgin, 2018).

Kullanılacak armatürlerin malzeme özellikleri de en az görsel uygunluk kadar önemlidir. Özellikle dış etkilere maruz kalabilecek iç ve dış mekân uygulamalarında oksidasyon ve paslanmaya karşı dayanıklı

malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu noktada pirinç malzeme, hem tarihi yapılara özgü dekoratif etkisi hem de uzun ömürlü yapısı nedeniyle ideal bir seçenektir. Pirinç, yüksek dayanıklılığı sayesinde oksitlenmeye karşı direnç gösterirken, aynı zamanda eskitilmiş yüzey işçiliğiyle dönemin estetik anlayışını da yansıtabilmektedir (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2019).

Tüm bu unsurlar göz önünde bulundurulduğunda, aydınlatma armatürlerinin seçiminde yalnızca teknik kriterler değil, aynı zamanda yapıların kültürel bağlamı, sanatsal dili ve dönem estetiği de belirleyici faktörler olmalıdır. Bu yaklaşım, tarihi yapıların restorasyonunun yalnızca fiziksel onarım değil, aynı zamanda kültürel süreklilik taşıyan bir koruma faaliyeti olduğu gerçeğiyle örtüşmektedir.



Şekil 14 Avize



Şekil 15 Aplik

5. SONUÇ

Tarihi eserlerde ihtiyaç duyulan onarımlar, teknik personel tarafından belirlenip raporlanır. Bu rapora dayanarak, yapıya ait elektrik projeleri hazırlanır. İlgili koruma kurulu onayı alındıktan sonra, restorasyon çalışmalarına aslına uygun şekilde başlanır. Restorasyon sürecinde, yapının özgün mimari özelliklerine zarar vermemek büyük önem taşır. Elektrik tesisatı, mümkün olduğunca görünmeyecek şekilde ve mevcut duvar ya da tavan dokusunu bozmayacak biçimde, gizli döşeme yöntemleriyle uygulanmalıdır. Bu görünürlüğü en aza indirmek için uygun kaplama teknikleri tercih edilmeli ve tesisat, tarihi dokuya uyumlu biçimde yerleştirilmelidir.

Tarihi yapının iç aydınlatması; estetik vurgulama, ziyaretçi deneyimini artırma, koruma ve işlevsellik olmak üzere dört temel amaç doğrultusunda planlanmalıdır. İç aydınlatmada kullanılabilecek yöntemler; doğal ışık kontrolü, dolaylı aydınlatma sistemleri, LED sistemleri ve fiber optik sistemlerdir. Aydınlatma tasarımında ultraviyole (UV) ve kızılötesi (IR) ışınım kontrolü, ısı yayılımı ve renk sıcaklığı gibi faktörlere dikkat edilmelidir. Mimari detayların aydınlatılmasında; doğru ışık kaynağı seçimi, gölge-kontrast dengesi, renk tonları ve dokuların vurgulanması önemlidir.

Tarihi yapının elektrik ihtiyacını karşılayacak besleme hattı, yer altından bir güzergâh izleyerek, beden duvarındaki kesme yonu taşların derz aralıklarından iç mekâna ulaştırılmalıdır. Ana ve tali panolar, yapının silüetini etkilemeyecek ve taş yapıya zarar vermeyecek noktalarda konumlandırılmalıdır. Beden duvarlarına monte edilecek aydınlatma armatürleri uygulanırken, taşıyıcı ya da süsleyici taşlara doğrudan müdahaleden kaçınılmalıdır.

Tarihi yapıların restorasyon süreçlerinde aydınlatma armatürlerinin seçimi, sadece işlevsel değil, aynı zamanda estetik ve kültürel bir tercih olarak ele alınmalıdır ve yapının inşa edildiği dönemin mimari üslubuna ve estetik anlayışına uygun olması gerekmektedir. Bu bağlamda, modern ve yüksek teknolojili ürünlerin kullanımı tarihi dokuyla uyumsuzluk yaratabileceğinden ötürü sınırlandırılmalı, tercihen dönemin ruhunu yansıtan ve geleneksel görünümlü eskitme tip armatürler tercih edilmelidir.

KAYNAKÇA

Ahunbay, Z. (1996). *Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon*. İstanbul: YEM Yayınları.

Feilden, B. M. (2003). *Conservation of Historic Buildings* (3rd ed.). Oxford: Architectural Press.

Jokilehto, J. (1999). *A History of Architectural Conservation*. Oxford: Butterworth-Heinemann

Akok, M. (1984). *Arkeolojik eserlerin restorasyonu ve konservasyonu*. Ankara: Kültür ve Turizm Bakanlığı Yayınları.

Aslanapa, O. (1986). *Türk sanatı*. İstanbul: Remzi Kitabevi.

Eldem, S. H. (1980). *Sanat eserlerinin korunması ve müze konservasyonu*. İstanbul: Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu Yayınları.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2021). *Elektrik iç tesisleri yönetmeliği*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/07/20210728-8.htm>

Stubbs, J. H., & Makas, E. (2011). *Architectural conservation in Europe and the Americas: National experiences and practice*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

UNESCO. (2013). *New life for historic cities: The historic urban landscape approach explained*. Paris: UNESCO Publishing.

Kuban, D. (2000). *Mimarlık kavramları*. İstanbul: Yem Yayınları.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2022). *Kültür varlıklarını koruma kurulları görev, yetki ve çalışma esasları*. <https://kvmgm.ktb.gov.tr/>

Işıkkaya, A. (2011). Tarihi yapılarda elektrik tesisatı uygulamaları ve karşılaşılan sorunlar. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 19(4), 22–29.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2022). *Tarihi yapılarda elektrik tesisatı uygulama esasları*. <https://kvmgm.ktb.gov.tr>

ICOMOS. (2013). *Guidelines on Education and Training in the Conservation of Monuments, Ensembles and Sites*. International Council on Monuments and Sites.

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. (2020). *Elektrik Tesisat Proje Hazırlama Yönetmeliği*. <https://www.emo.org.tr>

Yılmaz, F., & Çakır, D. (2018). Tarihi yapılar için uygun elektrik tesisatı çözümleri. *Mimarlık ve Restorasyon Dergisi*, 24(2), 45–58.

Ahunbay, Z. (2004). *Tarihi çevre koruma ve restorasyon*. İstanbul: YEM Yayın.

Çelik, M. (2017). Tarihi yapılarda aydınlatma tasarımı: Kültürel miras ve enerji verimliliği ilişkisi. *Mimarlık ve Kent Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 77–92.

Yıldırım, G., & Öztürk, T. (2019). Tarihi yapılarda teknik belge üretiminin önemi: Elektrik tesisatı uygulamaları örneği. *Koruma ve Restorasyon Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 29–44.

Gökçe, H., & Aydın, A. (2020). Akıllı bina teknolojilerinin tarihi yapılarda uygulanabilirliği. *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 8(2), 122–130.

Şahin, B., & Koç, M. (2021). Tarihi yapıların restorasyonunda BIM (Building Information Modeling) uygulamaları: Süreç, zorluklar ve fırsatlar. *Yapı Teknolojileri Dergisi*, 10(1), 88–99.

Yılmaz, S., & Demir, F. (2019). Enerji verimli aydınlatma sistemlerinin kültürel miras alanlarında kullanımı. *Restorasyon ve Konservasyon Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 55–67.

Çelik, M. (2017). Tarihi yapılarda iç aydınlatma tasarımı: Koruma ve estetik ilişkisi. *Mimarlık ve Kent Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 61–75.

ICOMOS. (2008). *Charter on the Built Vernacular Heritage*. International Council on Monuments and Sites.

Kocabey, H. (2020). Kültürel miras alanlarında mimari aydınlatma stratejileri. *Koruma ve Restorasyon Dergisi*, 11(1), 45–59.

UNESCO. (2011). *Recommendation on the Historic Urban Landscape*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Karakaya, S., & Çetiner, E. (2019). Tarihi yapıların aydınlatılmasında simülasyon temelli analizlerin kullanımı. *Mimarlık ve Tasarım Dergisi*, 5(2), 95–110.

Yener, A. K., & Turgut, H. (2015). Akıllı aydınlatma sistemleri ve sürdürülebilirlik bağlamında değerlendirilmesi. *İçmimarlık Dergisi*, 3(1), 45–59.

Bilgin, N. (2018). *Tarihi yapılarda elektrik tesisatı uygulamaları ve yangın güvenliği*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.

Günay, R. (2006). *Tarihi çevre koruma ve restorasyon*. YEM Yayınları.

Işık, N. (2016). *Koruma projelerinde elektromekanik tesisat uygulamaları*. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Yayınları.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2019). *Tarihi yapılarda restorasyon ilkeleri ve uygulama esasları rehberi*. Ankara: Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü Yayınları.



BÖLÜM

2

ENERJİ DEPOLAMALI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILAN DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Barış ÇAVUŞ¹

Kübra Nur AKPINAR²

Seçil GENÇ³

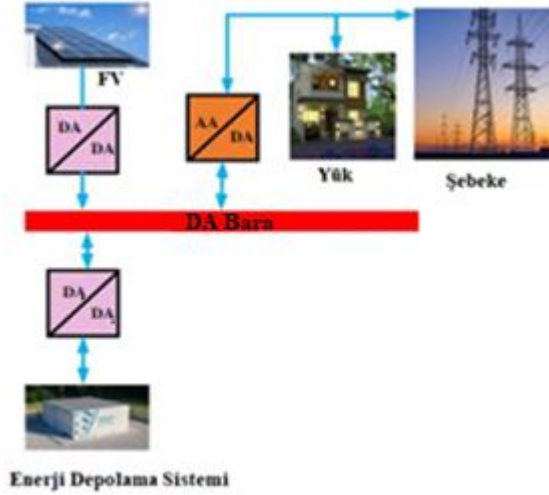
1 Dr. Öğr. Üyesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye, Orcid: 0000-0002-5798-8350, baris.cavus@omu.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi, Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0003-4579-4070, knur@marmara.edu.tr

3 Dr. Öğr. Üyesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3754-0209, secil.yilmaz@stu.omu.edu.tr

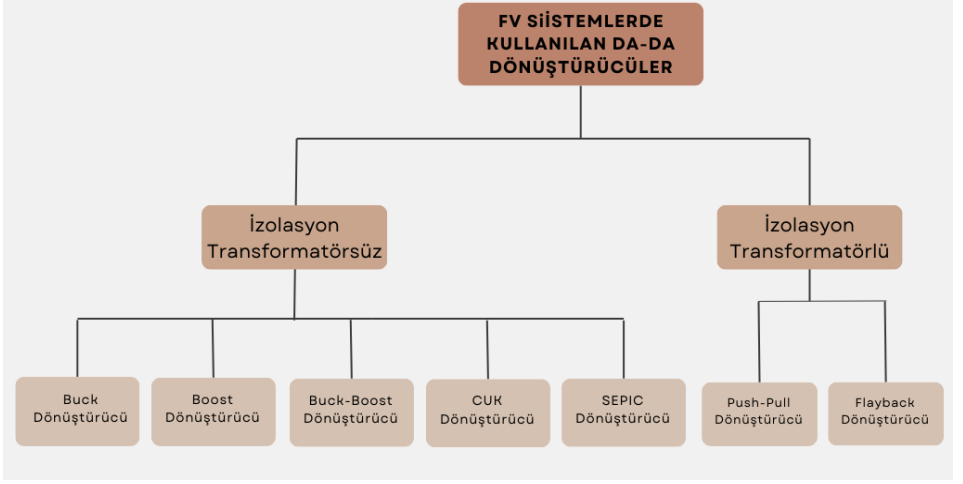
1. Giriş

Yenilenebilir enerji, fosil yakıtların kullanımının çevresel sorunlara yol açmasından dolayı günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Güneş enerjisine dayalı fotovoltaik (FV) santraller, daha uzun ömür, çevre dostu olma, düşük bakım ihtiyacı, yüksek taşınabilirlik ve hareket kabiliyeti gibi çeşitli avantajları sayesinde en çok tercih edilen sistemler arasında yer almaktadır. Ancak, FV dizisinin doğrusal olmayan akım-gerilim (I-V) karakteristikleri nedeniyle güneş enerjisinin maksimum güç noktasının (MPP) izlenmesi önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle, FV sistemlerinin çalışması sırasında MPP'ye ulaşmak için maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi geliştirilmiştir. FV paneller tarafından üretilen elektriğin büyük ölçüde atmosfer koşullarına, özellikle güneş ışınımı miktarına ve çevre sıcaklığına bağlı olmasından dolayı FV sistemlerde MPPT kullanımı oldukça önemlidir. MPPT ile birlikte kullanılan DA-DA dönüştürücüler, yük ile uyum sağlayabilmeli ve FV sistemlerinden daha fazla güç elde edebilmelidir [1]. Şekil 1'de FV sistem tabanlı mikro şebeke modeli sunulmuştur [2]. Sistem batarya tabanlı bir enerji depolama sistemi, rüzgâr türbini, şebekeye bağlı dönüştürücü sistemi ve doğru akım yüklerini içeren bir yapıdır.



Şekil 1. FV sistemin mikro şebeke bağlantı yapısı [2]

FV sistemlerde gerilim kazancını artırarak verimliliğini iyileştirmek için genellikle birden fazla DA-DA dönüştürücü kaskat olarak tasarlanır. Bu çalışmada ise enerji depolamalı fotovoltaik sistemlerde yaygın kullanılan DA-DA dönüştürücülerden azaltan (buck), arttıran (boost), azaltan-arttıran (azaltan-boost), SEPIC, ÇUK, push-pull ve flayback temelli yapılar sunulmaktadır. FV sistemlerde yaygın kullanılan DA-DA dönüştürücüler Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. FV sistemlerde kullanılan yaygın DA-DA dönüştürücüler

2. FV Sistemlerde Kullanılan DA-DA Dönüştürücü Tasarımında Dikkat Edilecek Unsurlar

FV sistemlerde kullanılan dönüştürücüler, yüksek anahtarlama gerilim stresi ve ters toparlanma gibi sorunlara maruz kalmaktadırlar. Bu durum da supraharmooniklere yani elektromagnetik girişim sinyallerine neden olmaktadır. Bu sebeple anahtarlama kaynaklı harmonik etkisini gidermek için güç elektroniği tasarımcıları filtre yapısı kullanmalarının yanı sıra yumuşak anahtarlama gibi anahtarlama tekniklerini de kullanmaktadır [3]. Ayrıca geleneksel dönüştürücülerde sınırlı gerilim kazancı sorununu aşmak amacıyla, çeşitli ileri düzey teknikler geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan gerilim **çarpan hücreleri (VMC- Voltage Multiplier Cell)** entegre edilerek giriş geriliminin katlanarak daha yüksek çıkış gerilimi elde edilmesinin sağlanmasıdır. Diyot ve kapasitör gibi pasif bileşenlerden oluşan bu hücreler, arıca yarı iletken elemanlar üzerindeki gerilim stresini azaltma imkânı sunar. Bir diğer yaygın yöntem, anahtarlama döngüsü süresince enerji depolayıp iletebilen **kuplajlı indüktörlerin (CI- Coupled Inductor)** kullanımıdır. Bu yapı, sargı dönüş oranları üzerinden gerilim kazancının ayarlanabilmesine ve sızıntı enerjisinin geri kazanılarak verimliliğin artırılmasını sağlamaktadır. Kuplajlı indüktörler, VMC'ler veya **birbirine geçmiş (interleaved)** dönüştürücü yapılarıyla birlikte kullanıldığında, giriş akımı dalgalanması azaltarak daha dengeli bir çalışma olanağı sağlayabilir. Ayrıca, **kuplajlı indüktörler ve anahtarlama kapasitör (SC - Switched Capacitor)** hücrelerinin birleştirildiği hibrit yapılar, geniş gerilim dönüşüm aralıklarının elde edilmesini sağlamaktadır. SC hücreleri hem gerilim kazancını artırırken hem de anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim stresini sınırlamaktadır. VMC, SC ve CI elemanlarının bir araya getirildiği yapılar, pasif sıkıştırma (clamping) sağlanarak kayıpları azaltabilmektedir. **Kademeli (cascaded)** topolojiler ise iki veya daha fazla adım yükseltici

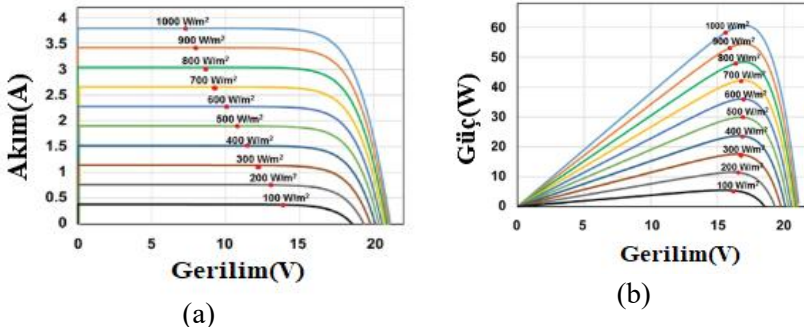
dönüştürücünün art arda bağlanmasıyla yüksek gerilim kazancının sağlanmasında basit ve etkili bir yöntemdir. Bazı yapılar, sadece tek bir anahtarlama elemanı kullanarak bileşen sayısını ve parazitik kayıpları azaltmaktadır. Ancak bu yapıların dezavantajları arasında karmaşıklık, hacim artışı ve verimlilik kaybı yer alır. Son olarak, **gerilim kaldırma (VL- Voltage Lift)** tekniği, kondansatörlerin belirli seviyelerde doldurulup boşaltılmasıyla çıkış geriliminin artırıldığı kompakt ve verimli bir tekniktir. Bu yöntem hem düşük hem de yüksek güçlü uygulamalarda yüksek verim sağlayabilirken aynı zamanda yüksek güç yoğunluğu ve düşük çıkış gerilim dalgalanması gibi avantajlar sunmaktadır. Sonuç olarak, VMC, CI, SC hücreleri, kademeli yapılar ve VL teknikleri gibi bu ileri düzey çözümler, DA-DA dönüştürücülerin gerilim kazancını artırmak, bileşen üzerindeki stresi azaltmaktadır [1].

3. Enerji Depolamalı FV Sistemler

3.1. FV Sistemler

Fotovoltaik diziler, güneş enerjisini elektrik enerjisine güneş panelleri aracılığıyla dönüştüren sistemlerdir. Bir FV dizisi, genellikle ızgara şeklinde bağlanmış çok sayıda panelin birleşiminden oluşur. Panellerin seri (string) veya paralel olarak yapılandırılır.

FV dizileri, doğrusal olmayan bir güç-gerilim (P-V) karakteristiği sergiler. Çıkış gerilimi arttıkça üretilen güç de artar, ancak bu artış yalnızca belirli bir gerilim seviyesine kadar devam eder. Bu eşik noktasından sonra güç üretimi keskin bir şekilde düşer. Şekil 3'te görülebileceği gibi, bu eğri üzerinde tek bir tepe noktası yer alır. Tepe noktasının konumu, güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Farklı ışınım seviyelerinde tepe noktasının konumu değiştirmektedir. FV sistemin en yüksek verimle çalışabilmesi için gerekli kontrol mekanizması olan maksimum güç takip noktası izleme (MPPT) tasarımı kritik öneme sahiptir [4].

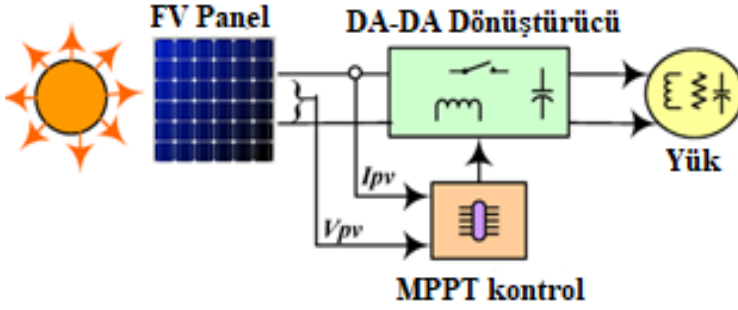


Şekil 3. FV dizisinin I-V (a) ve P-V (b) grafikleri [5]

3.2. MPPT Kontrol

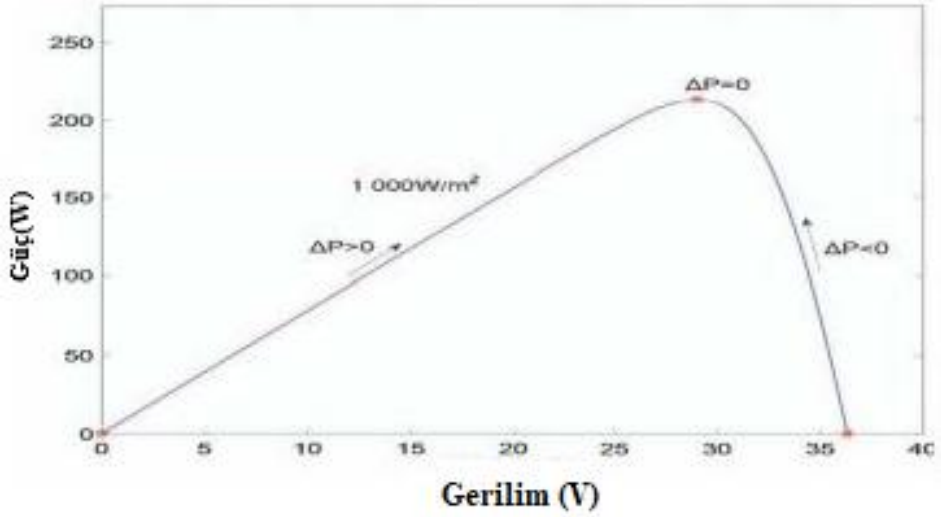
FV sistemlerde maksimum gücü elde edebilmek için çeşitli teknikler geliştirilmektedir. Bu yöntemlerden biri elektronik izleme yöntemidir. Bu yöntem, sistem gücünün maksimum olduğu çalışma noktasını bulmayı

hedeflemektedir. Bu amaçla birçok algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, yapılarında bulunan çeşitli senaryolar aracılığıyla MPP (maksimum güç noktası) değerini korumaya veya daha da iyileştirmeye çalışır. Bu yöntemle maksimum güç noktası izleme (MPPT) denilmektedir. FV sistemlerde anlık olarak ölçülen gerilim ve akım değerleri, MPPT yönteminde kullanılan bir algoritma sayesinde görev döngüsünü (duty cycle) ayarlar. Bu görev döngüsü DA-DA dönüştürücü devresinin çıkışında sistem tarafından kontrol edilmektedir. MPPT yöntemleri; izleme hızı, izleme doğruluğu, salınım (osilasyon), verimlilik, karmaşıklık gibi çeşitli faktörler açısından birbirinden ayrılmaktadır. MPPT kontrole ait yapı Şekil 4'te sunulmuştur [6].



Şekil 4. MPPT kontrol yapısı [6]

Şekil 5'te, yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan Boz-Gözle (P&O – Perturb and Observe) algoritması sunulmuştur. P&O algoritması, güneş panelinin güç çıkışını iyileştirmek amacıyla panelin gerilim veya akımı üzerinde küçük değişiklikler yapar ve bu değişimlerin güç çıkışına olan etkisini izler. Bu yöntemde amaç, panelin sürekli olarak maksimum güç noktasında (MPP) çalışmasını sağlamaktır. Bu nedenle sistem, I-V (akım-gerilim) eğrisini sürekli olarak analiz eder. Bu yöntemin temel prensibi, belirli zaman aralıklarında DA-DA dönüştürücünün görev oranı 'd' değiştirilerek güneş paneli (FV) dizisinin çıkış geriliminin artırılması veya azaltılmasıdır. Bu işleme "bozma" (disturbance) denir ve ardından çıkış gücündeki değişim gözlemlenir (observe). Şekil 'te gösterildiği gibi, eğer çıkış gerilimi değiştirilir ve güç değişimi $\Delta P > 0$ olarak gözlemlenirse, bu durumda çalışma noktasının MPP'nin sol tarafında olduğu anlaşılır. Algoritma bu durumda referans gerilimi artırır ve çalışma noktası MPP'ye yaklaştırılır. Eğer gerilim değişimi sonucunda $\Delta P < 0$ olursa, çalışma noktasının MPP'nin sağ tarafında olduğu anlaşılır. Bu durumda algoritma referans gerilimi azaltır, böylece çalışma noktası tekrar MPP'ye doğru yönlendirilir. Gücün maksimum olduğu noktadaki gerilim ve akımı korumak amacıyla, görev döngüsü (duty cycle) şeklindeki çıkış sinyali dönüştürücüye gönderilir. Bu sinyal sayesinde, çıkış gücü en verimli şekilde elde edilir. Bu işlem belirli aralıklarla periyodik olarak tekrarlanır ve bu sayede güneş paneli sürekli olarak maksimum güç noktasında çalışmaya yönlendirilmiş olur [7].



Şekil 5. P&O tekniği [7]

3.3. FV Sistemlerde Kullanılan Enerji Depolama Sistemleri

Bataryalar, FV sistemlerinden elde edilen enerjiyi kimyasal olarak depolar ve ihtiyaç halinde tekrar elektrik enerjisine çevirir. Seri-paralel bağlı hücrelerden oluşan bu bataryalar, kapasite, enerji yoğunluğu, verimlilik, ömür, deşarj derinliği ve çalışma sıcaklığı gibi kriterlere göre değerlendirilir. FV sistemlerde kullanılan bataryaların derin deşarjlara ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olması, sistem ömrünü doğrudan etkiler. FV sistemlerde kullanılan batarya tipleri aşağıda sıralanmıştır.

- **Kurşun Asit:** Düşük maliyeti ve kolay temini nedeniyle FV sistemlerinde sıkça kullanılır. Ancak enerji yoğunluğu düşüktür ve derin deşarja dayanımı sınırlıdır.
- **Lityum İyon (Li-iyon):** FV sistemlerde yüksek verimlilik (%90-95) ve enerji yoğunluğu ile öne çıkar. Uzun ömürlüdür ancak maliyeti yüksektir.
- **Sodyum Kükürt (NaS):** Yüksek sıcaklıkta çalıştığı için büyük ölçekli FV uygulamalarında kullanılır.
- **Akış Pilleri:** Enerji kapasitesi bağımsız olarak artırılabilirdiğinden, büyük FV kurulumlarında avantaj sağlar.
- **Çinko Bromin (ZnBr):** Yenilenebilir enerji entegrasyonuna uygun, güvenli ve modüler bir çözümdür.

Sonuç olarak, FV sistemlerden elde edilen enerjinin kesintisiz ve verimli şekilde kullanımı için batarya teknolojileri kritik önemdedir. Tablo 1’de uygulama türüne göre en uygun batarya tipi seçilerek, enerji sürekliliği ve sistem verimliliği sağlanabilir [8].

Tablo 1. Farklı batarya teknolojilerinin karşılaştırılması [8]

Batarya Türü	Enerji Yoğunluğu (kW/kg)	Enerji Verimliliği (%)	Ömür (yıl)	Çevre Dostu Olması
Li-ion	150–250 (1. sırada)	95 (1. sırada)	10–15 (1. sırada)	1. sırada (Evet)
NaS	150–250 (2. sırada)	85 (2. sırada)	10–15 (2. sırada)	2. sırada (Evet)
Akış	60–80 (3. sırada)	75–85 (4. sırada)	10–15 (4. sırada)	4. sırada (Hayır)
Ni-Cd	60–80 (4. sırada)	70–75 (3. sırada)	5–15 (3. sırada)	3. sırada (Hayır)
Kurşun Asit	30–50 (5. sırada)	60–70 (5. sırada)	3–6 (5. sırada)	5. sırada (Hayır)

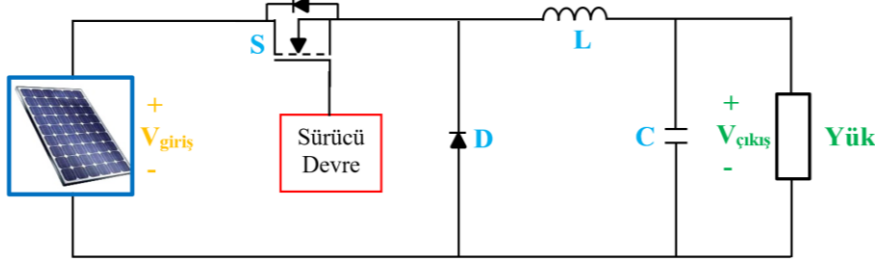
4. Depolamalı Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan DA-DA Dönüştürücü Türleri

Güneş enerji sistemlerinde kullanılan FV panellerin çıkış gerilimleri düşük seviyede olduğu için paneller seri-paralel bağlı modüller şeklinde kullanılır. Modül çıkışında elde edilen gerilim seviyesinin yük tarafında istenilen gerilim seviyesine arttırmak-azaltmak için dönüştürücü devrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca güneş panellerinin çıkış geriliminin güneş ışığı ve hava durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermesi nedeniyle değişken gerilimin yük barasında sabit tutulması gereklidir. Bu nedenle DA-DA dönüştürücü topolojileri, FV sistemlerin çıkışındaki gerilim seviyesini DA yüklerin belirli taleplerini karşılamak üzere kullanılmaktadır.

Sabit frekansta darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile çalışan güç anahtarlama elemanları kullanılarak, ayarlanmış bir DA çıkış gerilimi elde etmek amacıyla ayarlanmamış/düzenlenmemiş bir DA gerilimi artırarak veya azaltarak uygun bir kullanım gerilimine dönüştürebilen çeşitli DA-DA dönüştürücü devreler mevcuttur. Bu amaçla DA-DA dönüştürücü tipleri azaltan, arttıran, azaltan-arttıran, ÇUK, tek uçlu birincil indüktör dönüştürücü (Single Ended Primary Inductor Converter-SEPIC) flyback ve push-pull dönüştürücüler kullanılmaktadır [9]. Her bir dönüştürücü, gerektiğinde açmak ve kapatmak için güç elektroniği anahtarlama elemanına ihtiyaç duyar. Kullanılan bu devrelere aynı zamanda anahtarlama modlu regülatör ismi de verilmektedir. MOSFET'ler, IGBT'ler ve BJT'ler gibi güç elektroniği anahtarlama elemanları, uygulamalara ve devrenin tasarım parametrelerine bağlı olarak kullanılır. Anahtarlama elemanını tetiklemek için, kapı sürücü devresi aracılığı ile uygun kapı sürücü sinyalleri (PWM) güç elektroniği anahtarının kapısına uygulanmalıdır. DA-DA dönüştürücü devrelerde çıkış geriliminin seviyesi uygulanan PWM sinyalinin doluluk oranı ile kontrol edilir. Bu oran teoride 0-1 arasında olabilirken uygulamada 0.25-0.7 aralığında olması gerekmektedir.

4.1. Azaltan DA-DA Dönüştürücü

Şekil 6'da azaltan DA-DA dönüştürücünün temel devre şeması görülmektedir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre bir adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, bir adet diyot, bir adet indüktör ve bir adet kapasitörden oluşmaktadır. Bu devre girişine uygulanan gerilimi daha düşük seviyede çıkışa aktarmak için kullanılmaktadır. Gerilim seviyesini düşürmek için güç elektroniği anahtarını kontrol eden PWM sinyalinin doluluk oranının kontrol edilmesi gerekmektedir [10]. Şekil 6'da verilen devre güneş enerji sisteminin çıkış geriliminden düşük seviyede gerilim seviyesine sahip bataryayı şarj etmek veya bağımsız güneş enerjisi sistemlerine sahip kırsal bölgelerde kullanılan su pompası vb. uygulamalar için kullanılmaktadır [11, 12].



Şekil 6. Azaltan DA-DA dönüştürücü temel devre şeması
Şekil 6'da verilen devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki;

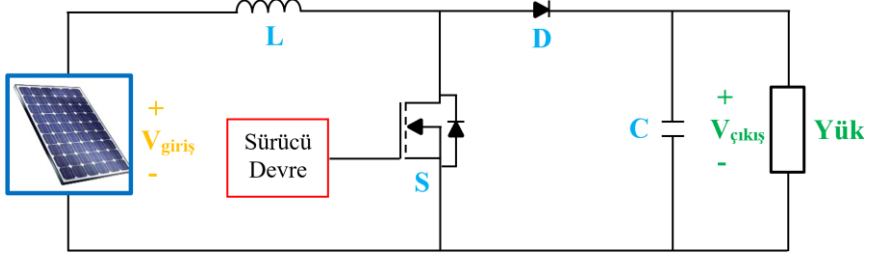
$$V_{\text{çıkış}} = DV_{\text{giriş}}$$

Bu denklemde D güç elektroniği anahtarına uygulanan PWM sinyalinin doluluk oranıdır. Bu devrenin kararlılığının artırılması, giriş-çıkış gerilimi arasında daha geniş kontrol aralığı, verim, güç elektroniği elemanları üstündeki gerilim stresini azaltmak ve çıkış geriliminin dalgalanmasının azaltılması gibi iyileştirmeler için temel dönüştürücü devre üzerinde seri kapasite yapısı veya yumuşak anahtarlama yöntemi gibi yapılar/yöntemler kullanılabilir [1].

4.2. Arttıran DA-DA Dönüştürücü

Şekil 7'de arttıran DA-DA dönüştürücünün temel devre şeması görülmektedir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre bir adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, bir adet diyot, bir adet indüktör ve bir adet kapasitörden oluşmaktadır. Bu devre girişine uygulanan gerilimi daha yüksek seviyede çıkışa aktarmak için kullanılmaktadır. Gerilim seviyesini ayarlamak için devrede bulunan güç elektroniği anahtarının iletim ve kesime geçişi kontrol edilir. Gerilim seviyesini yükseltmek için güç elektroniği anahtarını kontrol eden PWM sinyalinin doluluk oranının kontrol edilmesi gerekmektedir [10]. Anahtar iletim durumunda iken indüktörde enerji depolanırken diyot ters kutuplu olduğu için yük akımı sadece kondansatör tarafından sağlanır. Anahtar tıkama durumuna geçtiği zaman indüktörde depolanan enerji yük ve kapasitörü besler. Arttıran DA-DA dönüştürücülerin sürekli akım modu ve süreksiz akım modu olmak

üzere iki çalışma modu bulunmaktadır. Sürekli akım modunda indüktör akımı sürekli pozitif değer alırken süreksiz akım modunda indüktör akımı her anahtarlama sürecinde belirli bir süre sıfır değerini almaktadır. Güncel çalışmalar incelendiği zaman FV sistemlerde kullanılan DA-DA arttıran dönüştürücülerin yüksek gerilimli bataryaları şarj etmek gibi uygulamalara ek olarak harmonik yok etme, güç faktörünün düzeltilmesi, sıfır gerilim regülasyonu ve yük dengeleme gibi güç kalitesi uygulamalarında da kullanıldığı görülmektedir [13, 14].



Şekil 7. Arttıran DA-DA dönüştürücü temel devre şeması
Şekil 7’de verilen devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki;

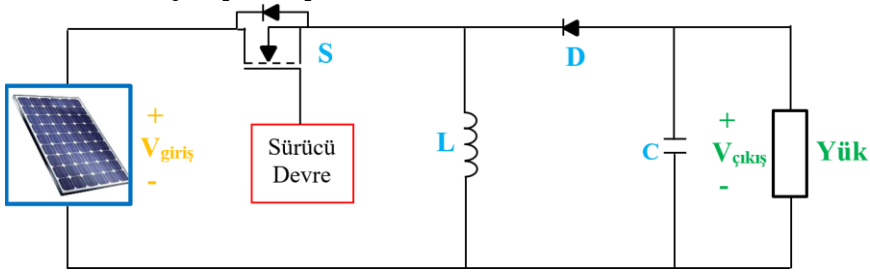
$$V_{\text{çıkış}} = \frac{V_{\text{giriş}}}{1 - D}$$

Bu denklemde D güç elektroniği anahtarına uygulanan PWM sinyalinin doluluk oranıdır. Bu devrenin kararlılığının artırılması, giriş-çıkış gerilimi arasında daha geniş kontrol aralığı, verim, güç elektroniği elemanları üstündeki gerilim stresini azaltmak ve çıkış geriliminin dalgalanmasının azaltılması gibi iyileştirmeler için temel dönüştürücü devre üzerinde anahtarlama kapasitör yapısı veya anahtarlama indüktör gibi yapılar kullanılabilir [1].

4.3. Azaltan-Arttıran DA-DA Dönüştürücü

Şekil 8’de azaltan-arttıran DA-DA dönüştürücünün temel devre şeması görülmektedir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre bir adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, bir adet diyot, bir adet indüktör ve bir adet kapasitörden oluşmaktadır. Şekil 8’de görülen devre şeması, azaltan ve arttıran DA-DA dönüştürücü devrelerin kaskat bağlı yapısından oluşmaktadır [9]. Bu devre girişine uygulanan gerilimi yükseltmek veya düşürmek için kullanılabilir. Devrenin çalışma modu (azaltan ya da arttıran çalışma modu) güç elektroniği anahtarına uygulanan PWM sinyalinin doluluk oranının seviyesi ile belirlenmektedir. Eğer doluluk oranı 0.5’in altında ise devre giriş gerilimini azaltarak çıkışa aktarırken doluluk oranının 0.5’ten yüksek olması durumunda giriş gerilimi yükselterek çıkışa aktarılır. Azaltan-arttıran DA-DA dönüştürücülerin sürekli akım modu ve süreksiz akım modu olmak üzere iki çalışma modu bulunmaktadır. Sürekli akım modunda indüktör akımı sürekli pozitif değer alırken süreksiz akım modunda indüktör akımı her anahtarlama sürecinde belirli bir süre sıfır değerini almaktadır. FV sistemlerde kullanılan azaltan-

arttıran DA-DA dönüştürücüler, giriş geriliminin güneşlenme ve diğer faktörlere bağlı olarak çok fazla değişkenlik göstererek çıkışta istenilen gerilim seviyesinin üstünde ve altındaki değerlere sahip olabilmesine rağmen çıkışta sabit bir gerilime ihtiyaç olduğu durumlar ile maksimum güç noktası izleme sistemlerinde verimliliğin artırılması gibi uygulama alanlarına sahiptir [13, 14].

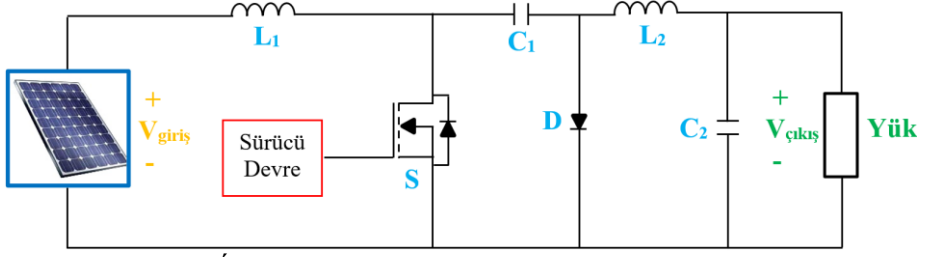


Şekil 8. Azaltan-arttıran DA-DA dönüştürücü temel devre şeması
Şekil 8’de verilen devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki;

$$V_{\text{çıkış}} = -\frac{DV_{\text{giriş}}}{1-D}$$

4.4. ÇUK DA-DA Dönüştürücü

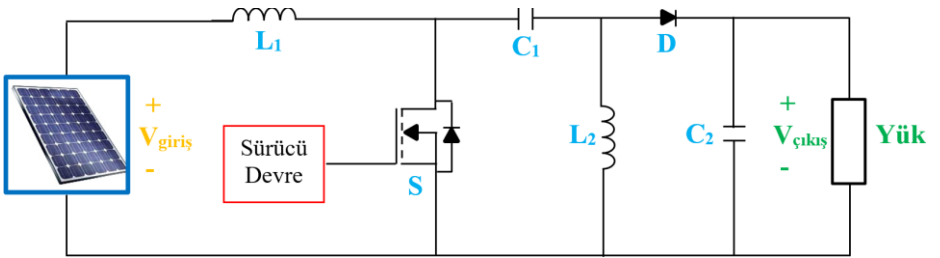
Şekil 9’da ÇUK DA-DA dönüştürücünün temel devre şeması görülmektedir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre bir adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, bir adet diyot, iki adet indüktör ve iki adet kapasitörden oluşmaktadır. Bu dönüştürücü azaltan-arttıran dönüştürücü gibi giriş geriliminin hem yükseltmek hem de düşürmek için kullanılabilir. Şekil 9’da verilen ÇUK dönüştürücü devresi oldukça düşük dalgalı bir çıkış gerilimi üretir; bu durum, çok geniş uygulama alanının oluşmasını sağlar [15]. Giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki azaltan-arttıran DA-DA dönüştürücü ile aynıdır. Bu nedenle bu dönüştürücüde de eğer doluluk oranı 0.5’in altında ise devre giriş gerilimini azaltarak çıkışa aktarırken doluluk oranının 0.5’ten yüksek olması durumunda giriş gerilimi yükselterek çıkışa aktarılır. Azaltan arttıran dönüştürücülere benzer olarak, FV sistemlerde kullanılan ÇUK DA-DA dönüştürücüler, güneşlenme ve diğer faktörlere bağlı olarak giriş geriliminin çok fazla değişkenlik göstererek çıkışta istenilen gerilim seviyesinin üstünde ve altındaki değerlere sahip olabilmesine rağmen çıkışta sabit bir gerilime ihtiyaç olduğu durumlar ile maksimum güç noktası izleme sistemlerinde verimliliğin artırılması gibi uygulama alanlarına sahiptir [16].



Şekil 9. ĆUK DA-DA dönüştürücü temel devre şeması

4.5. SEPIC DA-DA Dönüştürücü

SEPIC DA-DA dönüştürücünün temel devre şeması Şekil 10'da görülmektedir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre bir adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, bir adet diyot, iki adet indüktör ve iki adet kapasitörden oluşmaktadır. Yapısı itibariyle ĆUK DA-DA dönüştürücüye benzeyen SEPIC dönüştürücü çalışma ilkesi olarak da benzetilmektedir. Bu dönüştürücü azaltan-arttıran dönüştürücü gibi giriş geriliminin hem yükseltmek hem de düşürmek için kullanılabilir. ĆUK dönüştürücüden farkı çıkış geriliminin ters polariteye sahip olmamasıdır. Giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki azaltan-arttıran DA-DA dönüştürücü ile aynıdır. Bu nedenle bu dönüştürücüde de eğer doluluk oranı 0.5'in altında ise devre giriş gerilimini azaltarak çıkışa aktarırken doluluk oranının 0.5'ten yüksek olması durumunda giriş gerilimi yükseltilerek çıkışa aktarılır. Azaltan arttıran dönüştürücülere benzer olarak, FV sistemlerde kullanılan ĆUK DA-DA dönüştürücüler, güneşlenme ve diğer faktörlere bağlı olarak giriş geriliminin çok fazla değişkenlik göstererek çıkışta istenilen gerilim seviyesinin üstünde ve altındaki değerlere sahip olabilmesine rağmen çıkışta sabit bir gerilime ihtiyaç olduğu durumlar ile maksimum güç noktası izleme sistemlerinde verimliliğin artırılması gibi uygulama alanlarına sahiptir.



Şekil 10. SEPIC DA-DA dönüştürücü temel devre şeması

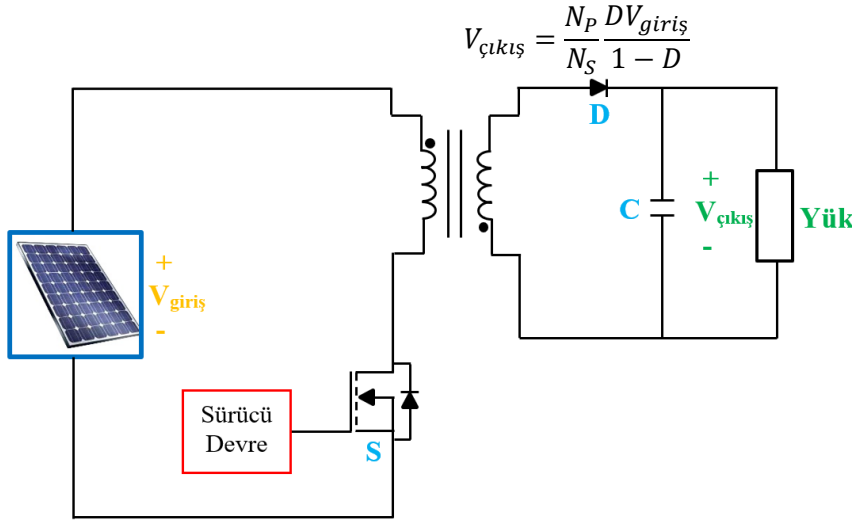
SEPIC dönüştürücü uygulanmasında dikkat edilmesi gereken çeşitli hususlar bulunmaktadır, Örneğin SEPIC dönüştürücü yüksek frekanslı bir transformatör ile kullanıldığında, çıkış geriliminde yüksek dalgalanmalar oluşmaktadır [17].

SEPIC dönüştürücü, güneş enerjisi toplama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Maksimum gücün elde edilebilmesi için, kayma kipli

kontrol, PI denetimi, dP/dV geri besleme kontrolü ve bulanık mantık denetimi gibi çeşitli kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Ayrıca, SEPIC dönüştürücü güneş enerjisiyle çalışan doğru akım motorlarının sensörsüz kontrolünü de gerçekleştirebildiğinden, çevreci ulaşım sistemlerinin desteklenmesinde de kullanılabilir. Bununla birlikte, dönüştürücünün çalışması sırasında oluşan kayıpları azaltarak daha yüksek performans elde etmek amacıyla yumuşak anahtarlama (soft-switching) tekniği de uygulanabilir [18].

4.6. Flyback DA-DA Dönüştürücü

Güneş enerji sistemlerinde kullanılan bir diğer DA-DA dönüştürücü yapısı flyback DA-DA dönüştürücüdür. Flyback dönüştürücü devre şeması Şekil 11’de verilmiştir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre bir adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, bir adet diyot, bir adet kapasitör ve bir adet transformatörden oluşmaktadır. Diğer DA-DA dönüştürücü topolojileri ile karşılaştırıldığında zaman flyback dönüştürücünün en önemli farklılığı indüktör yerine transformatör kullanılmasıdır. Bu durum hem dönüştürücünün giriş ve çıkış birimlerinin elektriksel olarak yalıtılmasını sağlar hem de gerilim kazancını daha geniş aralıkta kontrol etmemize olanak sağlar [19]. Şekil 11’de verilen devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.



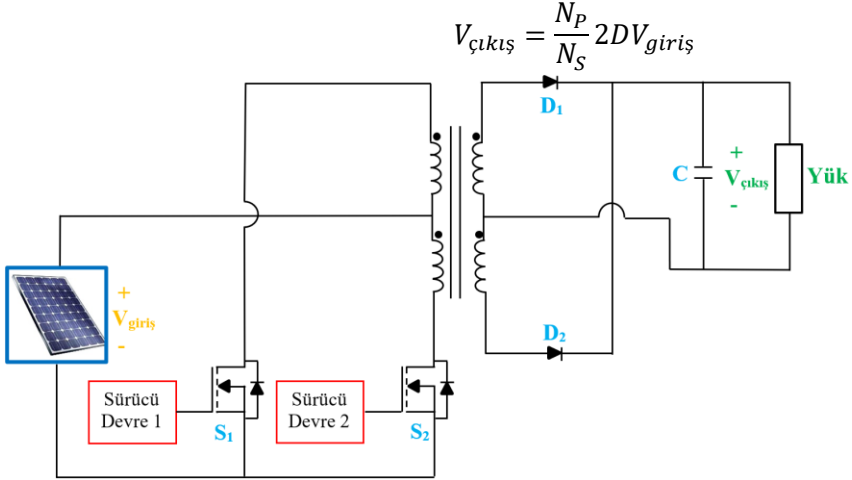
Şekil 11. Flyback DA-DA dönüştürücü temel devre şeması

Verilen eşitlikte N_p ve N_s sırasıyla transformatörün birincil ve ikincil sargılarının sarım sayılarıdır. Eşitliğe göre flyback dönüştürücü diğer dönüştürücüler ile kıyaslandığında zaman daha yüksek kazanç oranına sahiptir ancak bu dönüştürücü düşük güçlü uygulamalarda kullanılabilir [20]. Eğer yüksek güçlerde kullanılmak istenirse transformatörde büyük hava boşluğu oluşturulması gerektirir. Eğer çok fazla hava boşluğu oluşturulursa bu durum düşük manyetizasyon endüktansı ile sonuçlanır. Bu

durum dönüştürücüde kaçak akı sızıntısı meydana gelmesine neden olur [21]. Sonuç olarak düşük verimli güç aktarımı söz konusu olur.

4.7. Push-Pull DA-DA Dönüştürücü

FV sistemlerinde kullanılan flyback dönüştürücü gibi giriş-çıkış birimleri arasında yalıtım sağlayan bir diğer DA-DA dönüştürücü push-pull dönüştürücüdür. Push-pull dönüştürücü devre şeması Şekil 12’de verilmiştir. Devrede görüldüğü gibi dönüştürücü devre iki adet güç elektroniği anahtarlama elemanı, iki adet diyot, bir adet kapasitör ve bir adet orta noktalı transformatörden oluşmaktadır. Diğer DA-DA dönüştürücü topolojileri ile karşılaştırıldığı zaman push-pull dönüştürücünün en önemli farklılığı indüktör yerine transformatör kullanılmasıdır. Flyback dönüştürücü ile karşılaştırıldığı zaman, push-pull dönüştürücüde kullanılan transformatörün ikiye adet birincil ve ikincil sargıya sahip olmasıdır. Şekil 12’de verilen devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir. [21]



Şekil 12. Push-pull DA-DA dönüştürücü temel devre şeması

Push pull dönüştürücü devresi DA güç kaynağına bağlı iki aktif anahtar ile kontrol edilir. Güç iki anahtar üstünde paylaştırıldığı için daha yüksek güç uygulamalarında kullanılabilmektedir [21]. Transformatörün sarım oranı değiştirilerek çoklu çıkışlar elde edilebilir. Transformatörün sargısı, enerji depolama için bir indüktör görevi görür. Akım iki güç elektroniği anahtarı tarafından paylaşıldığı için push-pull dönüştürücüler daha yüksek güç uygulamalarında kullanılabilir.

5. Değerlendirmeler

Güneş enerji sistemleri, FV panellerin ürettiği değişken ve genellikle düşük gerilimi, yüklerin veya bataryaların ihtiyacına uygun hale getirmek için çeşitli **DA-DA dönüştürücülere** ihtiyaç duyar. Bu dönüştürücüler hem sistem verimliliğini artırmak hem de **Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)** gibi kontrol stratejilerini desteklemek açısından kritik öneme sahiptir.

DA-DA dönüştürücünün seçimi, FV panellerinin seri veya paralel bağlanması sonucu oluşan güneş enerji sisteminin uç gerilimine bağlıdır. DA-DA azaltan dönüştürücü çıkışında yüksek gerilim verebilecek seri bağlı FV dizileri için daha uygunken, arttıran DA-DA dönüştürücü paralel bağlı FV sistemlerinde daha verimli bir şekilde çalışır.

Bu nedenle, güneş enerji sisteminin bağlantı durumuna bağlı olarak oluşan çıkış gerilim seviyesi, kullanım bölgesindeki güneşlenme ve gölgelenme karakteristiği, yük seviyesi vb. durumlar göz önüne alınarak dönüştürücü seçimi yapılmalıdır. Bu durumlara ek olarak DA-DA dönüştürücülerin birbirlerine göre karşılaştırılması Tablo 2’de verilmiştir [2].

Tablo 2. DA-DA dönüştürücülerin gerilim kazançlarına bağlı karşılaştırılması [2]

Topoloji	Avantajlar	Dezavantajlar
Azaltan	Basit yapı, yüksek verimlilik, düşük giriş akımı dalgalanması	Giriş geriliminden daha düşük çıkış sağlar, düşük voltaj kazancı
Arttıran	Düşük donanım karmaşıklığı, kontrolü kolay, düşük maliyetli, kompakt tasarım, MPPT ile yüksek verim sağlanabilir.	Gerilim kazancı sınırlı, yüksek anahtarlama gerilimi, görev çevriminde aşırı uç, düşük tepki süresi.
Azaltan-Arttıran	Düşük donanım karmaşıklığı, kontrolü kolay, düşük maliyetli, kompakt tasarım, MPPT ile verimli çalışabilir.	Gerilim kazancı sınırlı, yüksek anahtarlama gerilimi, çıkış kutuplaması negatif, ani gerilim artışı.
ÇUK	Orta düzeyde verimlilik, MPPT ile yüksek verim, iki yönlü güç akışı mümkün, giriş ve çıkış dalgalanması düşük.	Yüksek bileşen sayısı, rezonans nedeniyle karmaşık kontrol, düşük güç aktarımı verimi.
SEPIC	Düşük donanım karmaşıklığı, MPPT ile yüksek verim sağlanabilir, giriş gerilimi değişimlerine dayanıklı.	Orta düzeyde verimlilik, yüksek anahtarlama gerilimi, orta seviye gerilim kazancı.
Flyback	Basit donanım yapısı, düşük maliyetli, yalıtılmış yapı, MPPT entegrasyonu kolay, kompakt yapı.	Yüksek gerilim gerilimi, yüksek sızıntı akışı, düşük enerji aktarım verimi.
Push-Pull	Yalıtılmış yapı, yüksek güç uygulamalarına uygun	Manyetik dengesizlik riski, yüksek anahtarlama gerilimi

KAYNAKÇA

- [1] T. Sutikno, A. S. Samosir, R. A. Aprilianto, H. S. Purnama, W. Arsadiando, and S. Padmanaban, "Advanced DC–DC converter topologies for solar energy harvesting applications: a review," *Clean Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 555-570, 2023.
- [2] I. Jagadeesh and V. Indragandhi, "Comparative study of DC-DC converters for solar PV with microgrid applications," *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7569, 2022.
- [3] I. Bashir, A. H. Bhat, and S. Ahmad, "A review on soft switched PFC boost converter for efficient lowering of switching losses," *Electric Power Systems Research*, vol. 242, p. 111430, 2025.
- [4] D. Rastogi, M. Jain, and M. Sreejeth, "Comparative study of DC-DC converters in PV systems using fuzzy logic MPPT algorithm," in *2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)*, 2022: IEEE, pp. 1-7.
- [5] M. Y. Baramadeh, M. A. A. Abouelela, and S. M. Alghuwainem, "Maximum power point tracker controller using fuzzy logic control with battery load for photovoltaics systems," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 12, no. 10, pp. 163-181, 2021.
- [6] N. Pamuk, "Performance analysis of different optimization algorithms for MPPT control techniques under complex partial shading conditions in PV systems," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3358, 2023.
- [7] Z. Fan, S. Li, H. Cheng, and L. Liu, "Perturb and observe mppt algorithm of photovoltaic system: A review," in *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2021: IEEE, pp. 1413-1418.
- [8] D. K. Kim, S. Yoneoka, A. Z. Banatwala, Y.-T. Kim, and K. Nam, "Handbook on battery energy storage system," *Asian Development Bank: Manila, Philippines*, pp. 1-6, 2018.
- [9] N. H. Baharudin, T. Mansur, F. A. Hamid, R. Ali, and M. I. Misrun, "Topologies of DC-DC converter in solar PV applications," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, no. 2, pp. 368-374, 2017.
- [10] M. Aly and H. Rezk, "An improved fuzzy logic control-based MPPT method to enhance the performance of PEM fuel cell system," *Neural Computing and Applications*, pp. 1-12, 2022.
- [11] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21-33, 2011.

- [12] E. V. Solodovnik, S. Liu, and R. A. Dougal, "Power controller design for maximum power tracking in solar installations," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1295-1304, 2004.
- [13] V. K. Kannan and N. Rengarajan, "Investigating the performance of photovoltaic based DSTATCOM using $I \cos \Phi$ algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 376-386, 2014.
- [14] S. Deo, C. Jain, and B. Singh, "A PLL-less scheme for single-phase grid interfaced load compensating solar PV generation system," *IEEE Transactions on industrial informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 692-699, 2015.
- [15] V. Bist and B. Singh, "PFC Cuk converter-fed BLDC motor drive," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 871-887, 2014.
- [16] R. Kumar and B. Singh, "Solar PV powered BLDC motor drive for water pumping using Cuk converter," *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 222-232, 2017.
- [17] B. K. Bose, "Power electronics, smart grid, and renewable energy systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2011-2018, 2017.
- [18] M.-S. Song, Y.-D. Son, and K.-H. Lee, "Non-isolated bidirectional soft-switching SEPIC/ZETA converter with reduced ripple currents," *Journal of Power Electronics*, vol. 14, no. 4, pp. 649-660, 2014.
- [19] B. ÇAVUŞ, "Elektrikli araçlar için doğrudan moment kontrollü asenkron motor sürücü tasarımı ve gerçekleştirilmesi," Yüksek Lisans, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi 2024.
- [20] M. Gao, M. Chen, Q. Mo, Z. Qian, and Y. Luo, "Research on output current of interleaved-flyback in boundary conduction mode for photovoltaic AC module application," in *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011: IEEE, pp. 770-775.
- [21] B. Bose and S. Kumar, "Design of Push-Pull Flyback Converter interfaced with Solar PV System," in *2020 first international conference on power, control and computing technologies (ICPC2T)*, 2020: IEEE, pp. 117-121.



BÖLÜM

3

X BAND UYGULAMALARI İÇİN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Caner KALENDER¹

Mehmet Ali BELEN²

Yakup HAMEŞ³

Merih PALANDÖKEN⁴

Filiz GÜNEŞ⁵

1 Yüksek Müh., İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, canerkalender2731@gmail.com, Hatay

2 Doç. Dr., İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Hatay, mali.belen@iste.edu.tr <https://orcid.org/0000-0001-5588-9407>

3 Prof. Dr., İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Hatay, yakup.hames@iste.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6736-224>

4 Prof. Dr., İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, İzmir, merih.palandoken@ikc.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3487-2467>

5 Prof. Dr., Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Kırklareli, filizgunes@klu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-0949-3687>

Giriş

Elektromanyetik spektrumun farklı bölgeleri, modern teknolojilerin gelişimiyle birlikte giderek daha stratejik hale gelmiştir. Özellikle savunma sanayi, uzay araştırmaları ve telekomünikasyon gibi yüksek öneme sahip alanlarda, dalgaların etkin bir şekilde yönetilmesi büyük bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda, frekans seçici yüzeyler (FSY), belirli frekans bantlarındaki elektromanyetik dalgaların kontrol altına alınabilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. FSY'ler, belirli bir frekans aralığında dalgaları geçirgen ya da yansıtan, çok katmanlı yapılar olarak, radyo frekansı (RF) mühendisliğinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir [1] [2].

Frekans seçici yüzeylerin (FSY) tarihi, mikrodalga ve RF teknolojilerinin gelişimi ile doğrudan ilişkilidir. 20. yüzyılın ortalarından itibaren, elektromanyetik spektrumun daha verimli kullanılması için yapılan araştırmalar, bu yüzeylerin radar sistemleri, uydu haberleşmeleri ve yönlendirilmiş enerji sistemleri gibi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur [3]. FSY'ler, belirli bir frekans aralığında dalgaları yansıtma veya iletme özellikleri ile öne çıkarak, sinyal işleme ve elektromanyetik dalga yönetiminde yeni olanaklar sunmaktadır.

X Band, 8–12 GHz frekans aralığını kapsayan ve hem sivil hem de askeri uygulamalarda geniş kullanım alanı bulan bir elektromanyetik spektrum dilimidir. Özellikle radar sistemlerinde (hava trafik kontrol radarları, denizcilik radarları, hava savunma radarları) yaygın olarak kullanılan X Band, aynı zamanda uydu haberleşmeleri ve füze sistemlerinde de kritik öneme sahiptir [4]. X Band'in avantajları arasında, yüksek çözünürlük, kısa dalga boyu sayesinde daha küçük antenlerle çalışma imkânı ve kötü hava koşullarında bile kararlı sinyal iletimi yer alır. Bu nedenle, X Band'de çalışan sistemlerin verimliliğini artırmak için frekans seçici yüzeylerin tasarımı önemli bir mühendislik çözümüdür.

Frekans seçici yüzeyler, X Band gibi yüksek frekanslı uygulamalarda, sadece elektromanyetik dalgaların iletimini ve yansımaları kontrol etmekle kalmaz, aynı zamanda istenmeyen sinyalleri filtreleme ve sistemlerin genel performansını artırma görevini de üstlenir [5]. Bu yüzden, FSY'lerin doğru bir şekilde tasarlanması, radar kesit alanını azaltma, elektromanyetik uyumluluk sağlama ve gürültü seviyesini düşürme gibi teknik gereksinimlere de katkı sağlar. Özellikle çok katmanlı ve karmaşık geometrik yapılarla geliştirilen FSY'ler, sistem performansında önemli iyileştirmeler sağlayabilir.

Sonuç olarak, X Band uygulamaları için daha etkin, güvenilir ve optimize edilmiş frekans seçici yüzeylerin nasıl tasarlanabileceğini araştırarak, radar ve iletişim sistemlerinin performansına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, frekans seçici yüzeylerin elektromanyetik dalga yö-

netimindeki rolünü ortaya koyarken, ileri teknoloji sistemlerinin daha verimli hale getirilmesi için yenilikçi çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir.

Frekans Seçici Yüzeylerin Tasarımı ve Simülasyonu

Frekans seçici yüzeyler üzerindeki araştırmalar, yeni teknolojilerin ve malzemelerin gelişimiyle devam etmektedir. Gelecekte, daha karmaşık geometrik yapılar ve daha yüksek frekans bantları için FSS tasarımlarının geliştirilmesi beklenmektedir. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin bu alana entegrasyonu, tasarım süreçlerini hızlandırarak daha optimize edilmiş çözümler sunabilir [9]. Özellikle, yapay zeka algoritmaları kullanılarak FSS tasarımlarının otomatik olarak optimize edilmesi, mühendislik süreçlerini önemli ölçüde iyileştirebilir.

Frekans seçici yüzeylerin (FSY) tasarımı ve simülasyonu, elektromanyetik dalgaların belirli frekanslarda iletilmesi, yansıtılması veya engellenmesi için optimize edilen karmaşık bir süreçtir. Bu tasarımlar, genellikle periyodik yapılar kullanılarak gerçekleştirilir ve geometrik parametrelerin yanı sıra malzeme özellikleri de performansı doğrudan etkiler [22]. FSY tasarımında, CST Studio Suite gibi yazılımlar önemli bir rol oynar. Yazılım, parametrik analizler sayesinde yüzey geometrilerinin ve materyallerin performans üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde inceleme olanağı sağlar [13]. Zaman ve frekans alanı çözücülerinin bir arada sunulması, geniş bantlı veya dar bantlı tasarımlar için uygun çözümler elde edilmesini mümkün kılar [23]. FSY'ler, radar kesit alanının (RCS) azaltılması, elektromanyetik dalgaların filtrelenmesi ve çeşitli savunma uygulamaları gibi birçok farklı alanda kullanılır. Bu uygulamalara yönelik tasarım ve simülasyon süreçleri, yüksek hassasiyet ve doğruluk gerektirir. CST Studio Suite, yansıma ve iletim katsayılarını optimize ederek, FSY'lerin performansını artırmaya yönelik kapsamlı analizler yapılmasına olanak tanır [21].

Birim Hücre Tasarımı

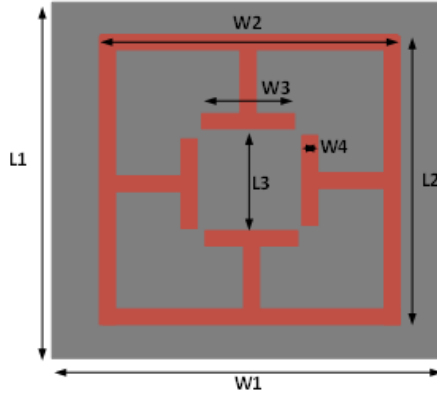
FSY'nin çalışma prensibi, elemanlarının boyutları, aralıkları ve yönelimlerine bağlı olarak elektromanyetik dalgaları manipüle etme yeteneğine dayanır. Bir elektromanyetik dalga FSY'ye çarptığında, yapıda rezonans fenomenleri uyarılır. Bu rezonanslar, belirli bir frekans bandının iletilip iletilmeyeceğini, yansıtılıp yansıtılmayacağını veya soğurulup soğurulmayacağını belirler. Elemanların periyodiklik ve geometrisi ayarlanarak, FSY belirli spektral tepkiler elde etmek için hassas bir şekilde ayarlanabilir [24]. FSY'lerin bu çok amaçlı kullanımı, Filtenna, Yansıtıcı dizi antenler, transmitarray antenler, ve geleneksel antenlerin performans iyileştirilmesi gibi bir çok farklı uygulamada kullanımı ise bir çok farklı çalışmanın ana araştırma konusu olmuştur [25],[26]. Bu çalışmada, X-band radar frekans

aralığında bant geçiren filtre davranışı sergileyen bir FSY birim hücresi-nin tasarımına ve simülasyonuna odaklanılmıştır. FSY, 8–12 GHz frekans aralığında yüksek iletim performansı sağlarken bu aralık dışındaki sinyalleri bastırarak elektromanyetik filtreleme görevini etkin bir şekilde yerine getirmektedir.

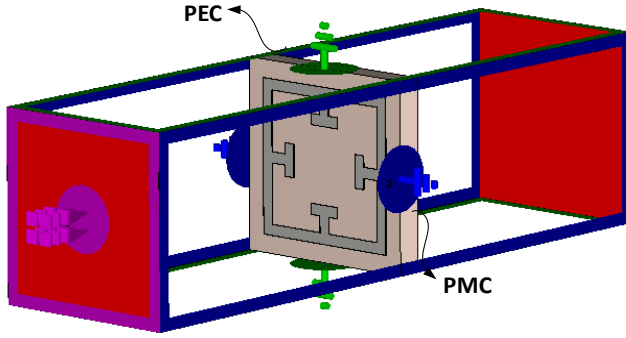
Önerilen Frekans Seçici Yüzey (FSY) birim elemanı tasarımı, şekil 1’de gösterilen şematik çizim ve ilgili 3D elektromanyetik simülasyon modeli ile birlikte, elektromanyetik saçılma analizine yönelik iki portlu bir yapı olarak geliştirilmiştir. Birim eleman geometrisi, periyodik bir yapıdan oluşur ve bu yapının belirgin parametreleri W_1 , L_1 , W_2 , L_2 , W_3 , L_3 ve W_4 olarak gösterilmiştir. Bu parametreler, periyodik rezonans yapıdaki iletkenlerin toplam boyutlarını, slot genişliklerini ve uzunluklarını tanımlamaktadır. Şekil 1’de birim elemanın tasarımını gösterilmektedir. Burada metalik yamalar kırmızı renkte, arka plan malzemesi (veya alt tabaka) ise gri renkte gösterilmiştir. Bu yapı, X-band radar frekans spektrumu içerisinde rezonans davranışı sergileyerek elektromanyetik dalgalarla etkileşimi kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Şekil 2’de, 3B elektromanyetik simülasyon modeli gösterilmektedir. Bu model, CST Microwave Studio veya HFSS gibi tam dalga elektromanyetik çözücüler kullanılarak sayısal analiz uygulanmıştır. Birim eleman modelinin sınır koşulları şekil 1(b) de gösterilmiştir. Bu sınır koşulları, periyodik elemanın sonsuz bir FSY dizisini doğru bir şekilde modellemesini sağlar. Tasarım, gelen elektromanyetik dalgaların giriş ve çıkışını temsil eden iki port içermektedir. Bu portlar, saçılma parametrelerinin (S-parametreleri S_{11} ve S_{21} ’nin) değerlendirilmesini sağlar:

- S_{11} (Yansım Katsayısı): Gelen elektromanyetik dalganın birim eleman tarafından geri yansıtılan kısmını nicel olarak ifade eder. Yansım tepkisinin rezonans frekansı ve bant genişliği, FSY tasarımının filtreleme özellikleri hakkında bilgi sağlar.
- S_{21} (Geçiş Katsayısı): Gelen dalganın birim elemandan geçen kısmını temsil eder. Bastırılmış bir S_{21} değeri, güçlü bir yansım veya soğurmayı gösterir; bu özellik, Radar Kesit Alanı (RCS) azaltımı için oldukça önemlidir.

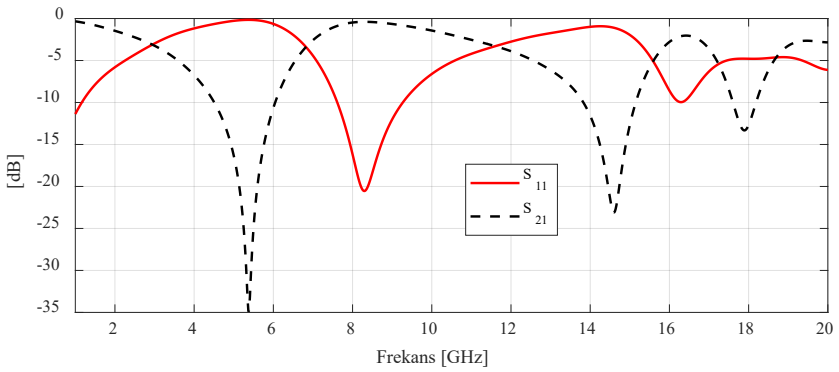
Saçılma parametrelerinin X-band frekans aralığında (8–12 GHz) analizi, birim elemanın tepkisini belirlemekte ve belirli frekansların bastırılma veya filtrelene yeteneğini göstermektedir.



Şekil 1. FSY birim hücrelerine ait şematik görsel



Şekil 2. FSY birim hücrelerine ait 3B elektromanyetik benzetim modeli.



Şekil 3. FSY birim hücrelerine ait saçılma parametresi benzetim sonucu

Tablo 1. Şekil 3 de sunulan benzetim sonuçlarına karşılık gelen tasarım değerleri [mm].

L1	12.5	W1	12.5
L2	10.2	W2	10.2
L3	5.1	W3	2.2
W4		0.74	

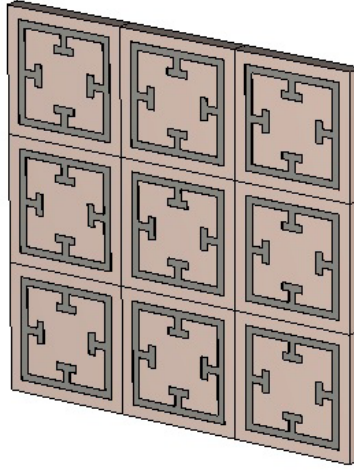
Şekil 3’de bu çalışma kapsamında tasarlanan FSY birim hücresinin saçılma parametreleri (S_{11} ve S_{21}) için benzetim edilmiş sonuçları göstermektedir. Parametreler, 1 GHz ile 20 GHz frekans aralığında desibel (dB) cinsinden çizilmiştir. Şeklin ana özellikleri şu şekilde açıklanabilir:

Kırmızı Çizgi (S_{11}): Grafikte, S_{11} değerinin 8 GHz ile 12 GHz arasında önemli bir düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu durum, bu frekans aralığında enerjinin büyük bir kısmının ya iletilmediğini (Yüksek S_{21} değerinde) ya da emildiğini (düşük S_{21} değerinde) ifade eder.

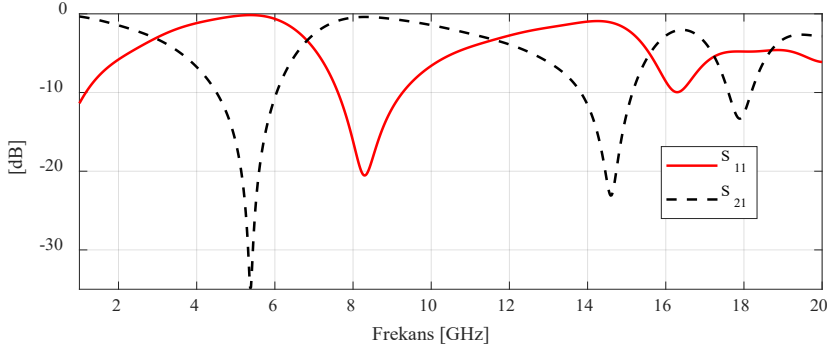
Siyah Kesikli Çizgi (S_{21}): 8 GHz ile 12 GHz arasındaki frekans aralığında S_{21} değeri oldukça yüksektir, bu da sinyalin güçlü bir şekilde iletilmediğini ve bu FSY’nin bant geçiren bir filtre gibi davrandığını göstermektedir.

Bant Geçiş Davranışı: FSY, 8 GHz ile 12 GHz frekans aralığındaki sinyallerin geçişine izin verirken, bu aralık dışındaki sinyalleri zayıflatır veya engeller. Bu durum, bu frekans bandında yüksek iletim (S_{21}) ve düşük yansıma (S_{11}) değerleri ile doğrulanmaktadır.

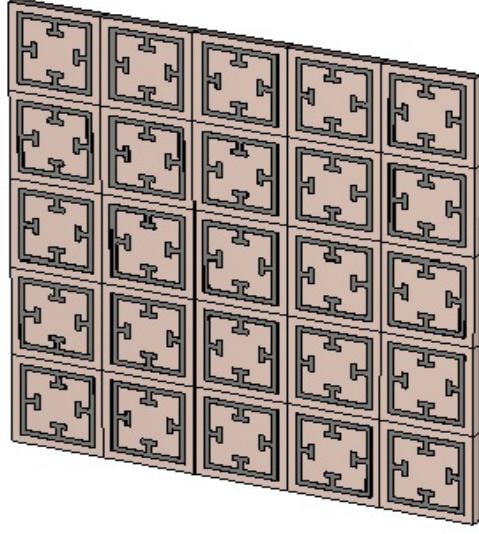
Bant Dışındaki Davranış: 8–12 GHz frekans aralığı dışındaki frekanslarda, S_{21} değeri önemli ölçüde düşmektedir, bu da FSY’nin bu sinyalleri engellediğini veya zayıflattığını göstermektedir. Benzer şekilde, bu bölgelerde S_{11} değeri daha yüksektir ve daha güçlü bir yansıma meydana geldiğini göstermektedir.



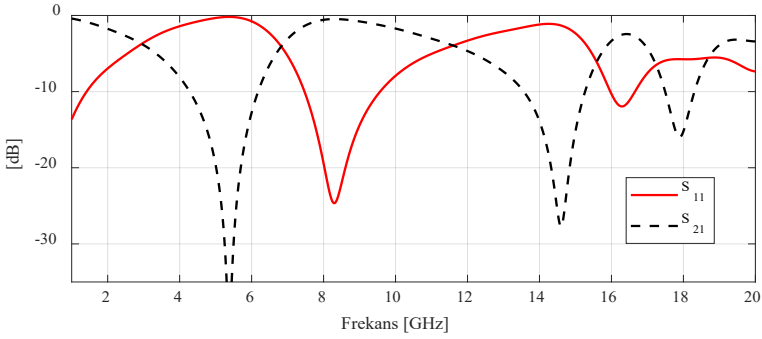
Şekil 4. Ele alınan FSİ hücresinin 3'e 3'lük dizi hali



Şekil 5. Ele alınan 3'e 3'lük FSİ hücresinin benzetim sonucu.



Şekil 6. Ele alınan FSY hücresinin 5'e 5'lik dizi hali



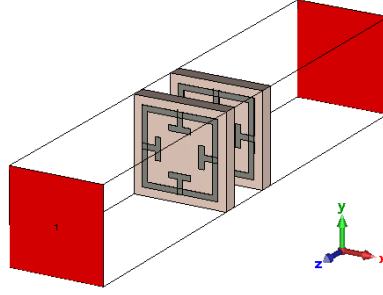
Şekil 7. Ele alınan 5'e 5'lik FSY hücresinin benzetim sonucu.

Şekil 5 ve şekil 7'den görüleceği üzere, tasarlanan hücrenin eleman sayısı artırıldığında ve dizi haline geldiğinde iletim ve bastırma performansı ciddi şekilde iyileşme göstermektedir.

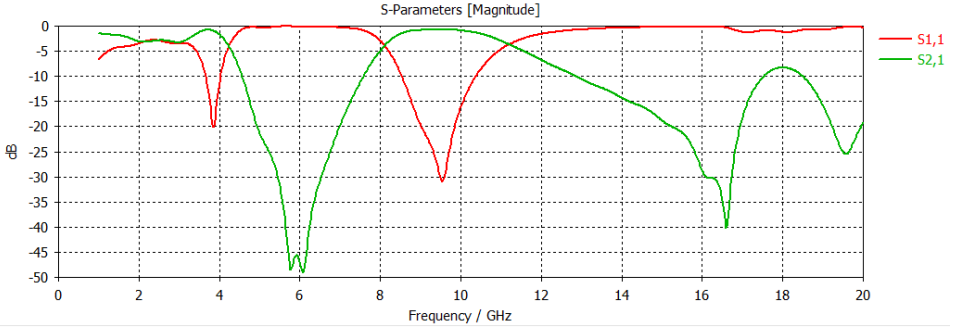
Çift Katlı Frekans Seçici Yüzey

Önerilen Frekans Seçici Yüzey (FSY) birim elemanı tasarımı, şekil 1'de gösterilen şematik çizim ve ilgili 3D elektromanyetik simülasyon modeli ile birlikte, elektromanyetik saçılma analizine yönelik iki portlu bir yapı olarak geliştirilmiştir. Şekil 8 de gösterilen iki katlı yapının periyodik olarak yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Buradaki amaç frekans seçici özelliklerin daha da hassaslaşmasına yardımcı olmak ve yü-

zeyin genel performansını iyileştirmek hedeflenmiştir. Şekil 9 da filtre karakteristiğinin keskinleştiği görülmektedir.



Şekil 8. FSY birim hücresinin çift katlı hali.

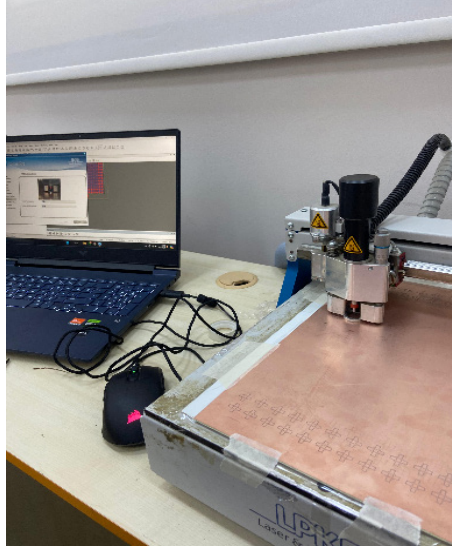


Şekil 9. Ele alınan çift katlı FSY hücresinin benzetim sonucu.

Üretim ve Ölçüm

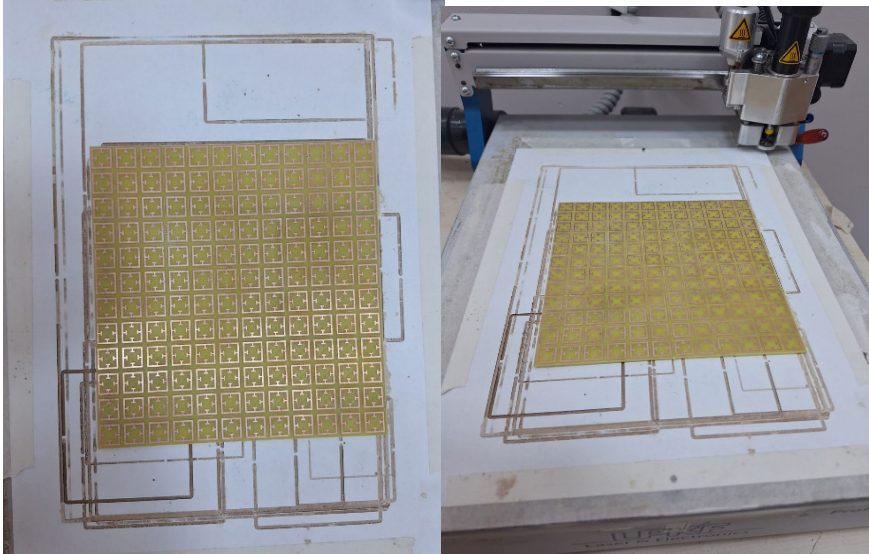
Frekans seçici yüzey (FSY) yapısının üretim sürecinde, dielektrik altlık olarak endüstride yaygın şekilde kullanılan FR4 malzemesi tercih edilmiştir. FR4, yaklaşık olarak $\epsilon_r \approx 4.4$ dielektrik sabiti ve 0.035 civarındaki kayıp tanjantı ile mikrodalga uygulamaları için uygun bir yapı sunmaktadır. Tasarlanan FSY geometrisi, tek yüzeyi bakır kaplı bu dielektrik malzeme üzerine uygulanmıştır. Üretim aşamasında kimyasal kazıma işlemleri kullanılmaksızın, tamamen mekanik frezeleme (kazıma) yöntemi tercih edilmiştir. Yüzey desenleri, LPKF Promat E33 baskı devre frezeleme cihazı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu cihaz, aynı zamanda hassas delme ve kesme işlemlerini de desteklemektedir [28]. Sonsuz periyodik bir FSY dizisini temsil edecek şekilde modellenen yapının fiziksel üretimi sırasında, cihazın üretim alanı sınırlamaları dikkate alınarak 15 cm × 15 cm boyutlarında, toplam 144 elemanlı (12×12) düzlemsel bir dizin oluşturulmuştur. Yapının simülasyonu CST Microwave Studio (MWS) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, alt ve üst yüzeylere ait geometrik bilgiler iki boyutlu vektör grafik dosyaları (Gerber formatı) şeklinde dışa aktarılmıştır. Elde edilen Gerber dosyaları, LPKF BoardMaster yazılımı aracılığıyla

işlenerek üretime uygun hale getirilmiş ve son aşamada LPKF Promat E33 cihazı kullanılarak fiziksel PCB yüzeyine kazınmıştır. Bu çok bantlı FSY yapısının üretim adımları, Şekil 10’da ayrıntılı olarak sunulmaktadır.



Şekil 10. FSY’nin baskı devre kazıma cihazı ile üretimi

Kazıma yöntemi ile FR4 PCB’si üzerine genel hatları işlenen FSY’nin son hali Şekil 11’ de gösterilmiştir.



Şekil 11. Üretimi yapılan FSY

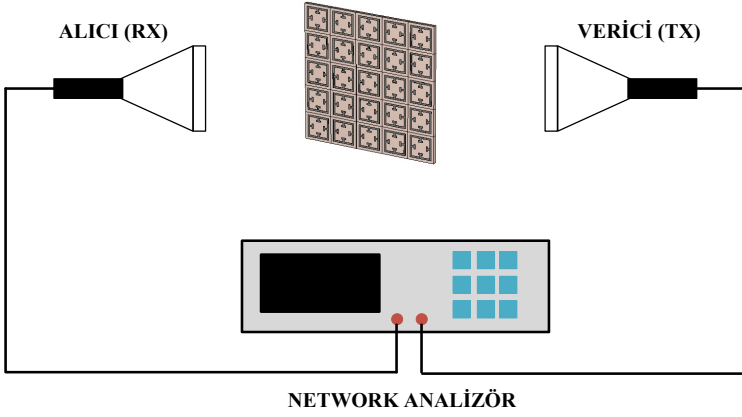
Önerilen frekans seçici yüzey (FSY) yapısının karakterizasyonu, elektromanyetik saçılmaları minimize edecek şekilde tasarlanmış bir ölçüm düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. DeneySEL ortamda, tüm çevre, ferrit tabanlı ve karbon katkılı, konik yapılı frekans emici sünger malzemeler ile kaplanmıştır. Kullanılan soğurucu malzemenin boyutları 6.73 cm $\times$ 2.85 cm $\times$ 2.60 cm olup, yüzey yansımalarını bastırmak ve parazitik etkileri azaltmak amacıyla yerleştirilmiştir. Ölçümler, 3–18 GHz frekans aralığında çalışan ve karşılıklı konumlandırılan bir verici ile bir alıcı geniş bantlı boynuz anten (GBHA) çifti kullanılarak gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 12). Her iki anten, Agilent Technologies PNA-L vektör ağ analizörüne (model N5134A) bağlanmış ve cihazın iki portlu yapısı sayesinde S-parametreleri (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}) ölçülebilmektedir. VNA cihazı, 9 kHz – 43 GHz frekans aralığında yüksek hassasiyetle çalışabilmektedir. Deney düzeneğinde, iki GBHA arasındaki mesafe 40 cm olarak ayarlanmış; test edilen FSY yapısı, antenlere eşit uzaklıkta olacak şekilde, 20 cm mesafede konumlandırılmıştır. FSY'nin ön yüzü alıcı antene, arka yüzü ise verici antene bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Kullanılan FR4 dielektrik alt tabaka, antenler arası mesafeye göre oldukça ince olduğundan ($P \gg h$) kalınlık etkisi ihmal edilmiştir.

Yapının kenarlarında meydana gelebilecek istenmeyen elektromanyetik yansımaları azaltmak amacıyla, FSY'nin çevresi emici sünger malzeme ile izole edilmiştir. FSY'nin ölçümü için kurulan deney düzeneği Şekil 13'de gösterilmektedir. Uygulanan ölçüm prosedürü **üç aşamadan** oluşmaktadır:

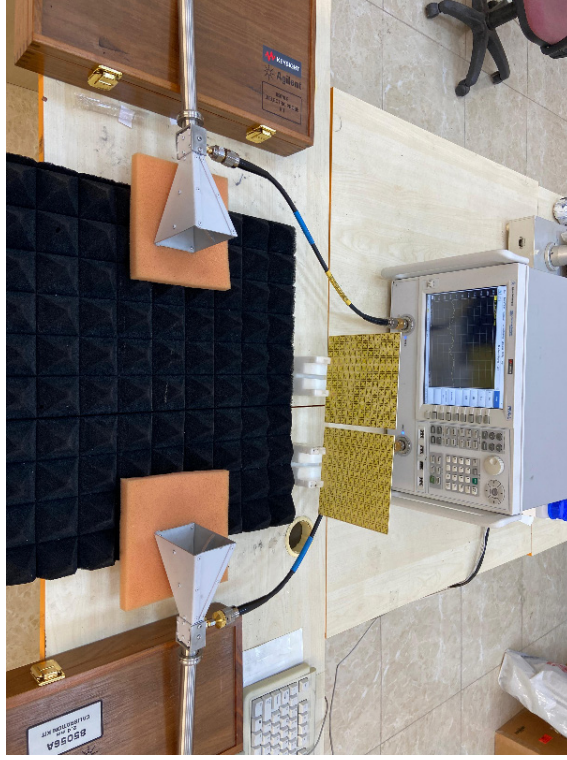
- İlk aşamada, referans ölçümü için FSY yapısı yerleştirilmeden, iki GBHA ile ortamın iletim karakteristiği ölçülmüştür (bkz. Şekil 14).
- İkinci aşamada, tek katlı ve çift katlı FSY'ler deney düzeneğine yerleştirilmiş ve saçılma parametreleri ölçülmüştür.
- Son aşamada, FSY2lerin açısal değişimi ve TM-TE mod ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12. Test anteni [29]



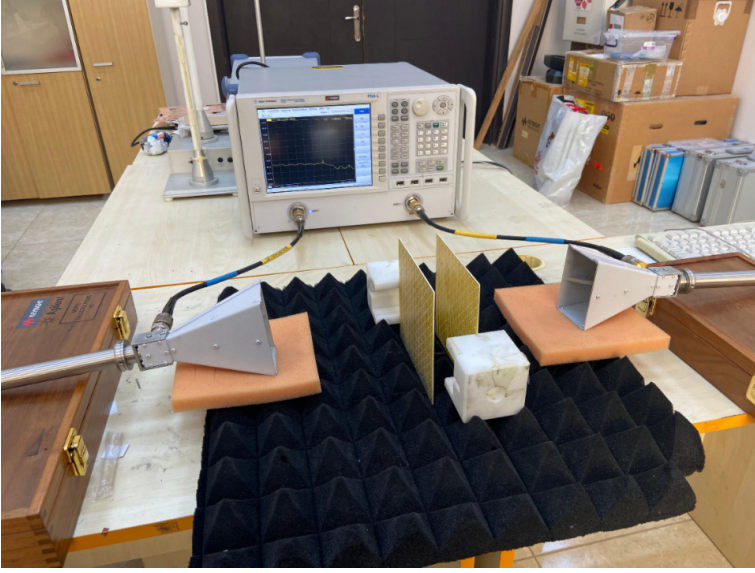
Şekil 13. FSY'nin ölçümü için kurulan deney düzeneği



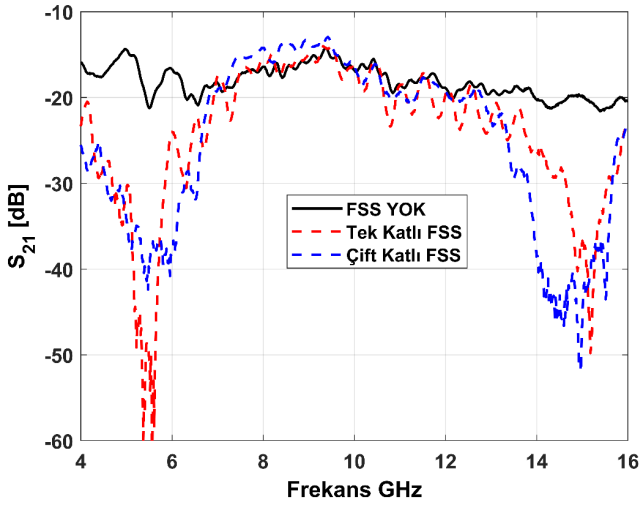
Şekil 14. İki GBHA arası ortamın iletim katsayısı ölçümü



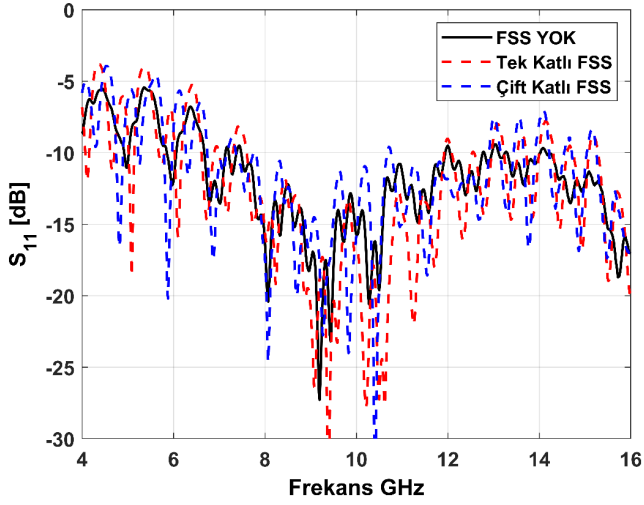
Şekil 15. FSY deney düzeneğine yerleştirilerek iletim katsayısı ölçümü



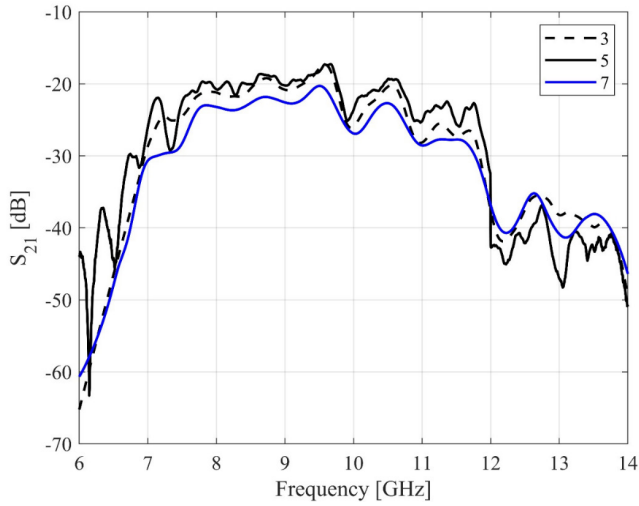
Şekil 16. Çift katlı FSY yerleştirilmiş ölçüm düzeneği



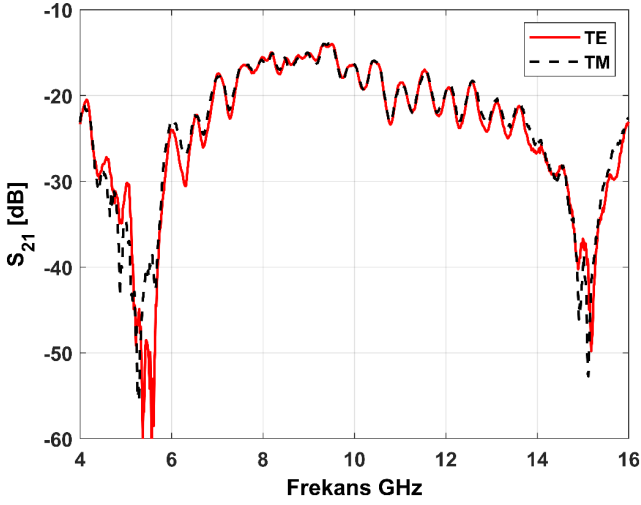
Şekil 17. Üretilen FSY hücresinin S_{21} katsayısı ölçümü



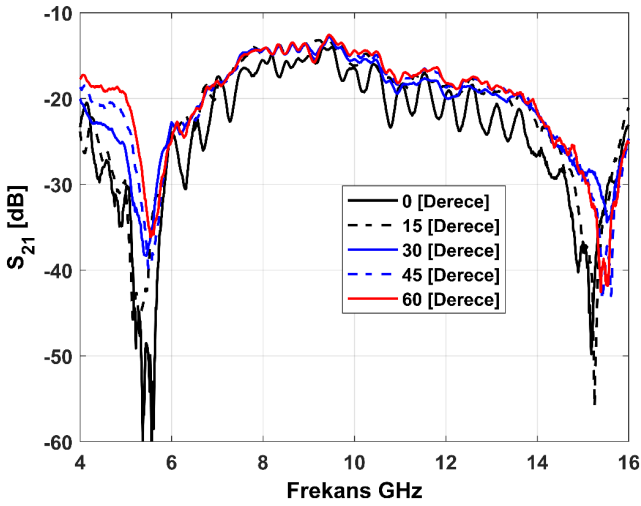
Şekil 18. Üretilen FSY hücresinin S_{11} katsayısı ölçümü



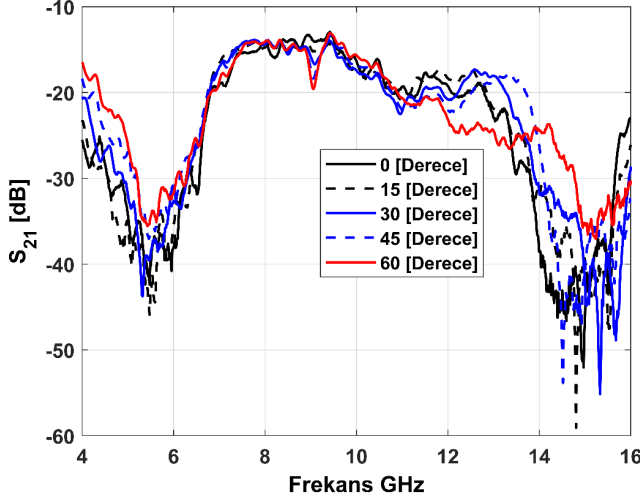
Şekil 19. FSY'nin S_{21} frekansında boşluk değişimi etkisi



Şekil 20. FSY'nin TE ve TM Mod ölçümü



Şekil 21. Tek Katlı FSY'nin Açısal Değişimi



Şekil 22. Çift Katlı FSY'nin Açısal Değişimi

Üretilen frekans seçici yüzey (FSY) yapısının karakteristik özelliklerini belirlemek ve performans analizini gerçekleştirmek amacıyla laboratuvar koşullarında deneysel ölçümler yapılmıştır. Elde edilen verilen ölçüm sonuçları Şekil 20 incelendiğinde, TE ve TM modunda yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen yapının, benzetim sonuçlarında olduğu gibi, BGF özelliği gösterdiği görülmektedir. Üretimi gerçekleştirilen FSY'nin S_{11} ve S_{21} değerleri şekil 17 ile şekil 20 arasında sunulmuştur. Frekans seçici yüzeyin açısal değişimi şekil 21 ve şekil 22 de sunulmuştur. Bu kapsamda, S_{21} parametresinin farklı geliş açılarındaki değişimi değerlendirilerek, yapının açısal hassasiyeti analiz edilmiştir.

Benzetim ortamları genellikle FSY yapılarının sonsuz periyodik dizilimlere sahip olduğu ve davranışlarının Floquet harmonikleri ile tanımlandığı varsayımına dayanır. Ancak, fiziksel üretimde ve deneysel ölçümlerde sonsuz elemanlı bir dizi oluşturmak teknik ve ekonomik açıdan mümkün değildir. Literatürde, benzetim ve ölçüm sonuçları arasındaki farkı minimize edebilmek için en az 15×15 elemanlı bir FSY dizisinin kullanılması önerilmektedir [27]. Bu çalışmada ise, LPKF Promat E33 baskı devre kazıma cihazının üretim alanının 15×15 cm² ile sınırlı olması ve üretim maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle, 12×12 elemanlı bir dizi tasarımı tercih edilmiştir.

FSY'nin üretimi sırasında, kullanılan baskı devre kazıma cihazı ile yapılan kazıma işlemi ve elle gerçekleştirilen soyma yöntemi sonucunda çok küçük boyutlarda üretim hataları meydana gelebilir. Benzetim ortamında kusursuz bir tasarıma sahip olan FSY ile üretim hataları içeren FSY karşı-

laştırıldığında, elde edilen sonuçların tam olarak aynı olamayacağı açıkça görülmektedir. Son olarak, benzetim ortamındaki varsayılan ölçüm alanı ile gerçek ortamdaki ölçüm alanı arasındaki sıcaklık, nem, saçınım miktarı ve sınır koşulları gibi faktörler, ölçüm sonuçları üzerinde etkili olabilir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada FSY'lerle ilgili literatür taraması yapılarak sık kullanılan geometrilere sahip yapıların karakteristik davranışları incelenmiş ve 8-12 GHz de bant geçiren filtre özelliği gösteren yapı tek katlı ve çift katlı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımların hem özgün olması hem de literatürde mevcut çalışmalara göre üstünlükleri olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda; literatür araştırması yapılmış, çeşitli geometrilerin bilgisayar destekli benzetim programı CST MW Studio ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, X-band radar frekans aralığında (8–12 GHz) bir Frekans Seçici Yüzey (FSY) birim hücresinin tasarımı ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, tasarlanan FSY'nin bu frekans aralığında bant geçiren bir filtre gibi çalıştığını ve 8–12 GHz frekansındaki sinyalleri iletirken bu aralık dışındaki sinyalleri bastırdığını göstermiştir. Yansıma katsayısı (S11) ve geçiş katsayısı (S21) analizleri, FSY'nin filtreleme performansını doğrulamıştır. Önerilen tasarım, askeri ve sivil uygulamalar için elektromanyetik filtreleme çözümleri sunmanın yanı sıra, X-band frekans spektrumunda çalışan diğer elektromanyetik cihazlar için de yol gösterici bir yaklaşım oluşturmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, geniş bant performansını artırmaya ve farklı açılardan gelen dalgalar için kararlılık sağlamaya odaklanabilir özellikle horn antenlerin ışıma karakteristik optimizasyonlarında ve/veya yüksek performanslı filtenna tasarımlarında kullanımı incelenecektir. FSY'nin üretimi için LPKF Promat E33 baskı devre kazıma cihazı kullanılmıştır. 15x15 cm² boyutlarında 144 elemanlı (12x12) düzlemsel bir dizinin üretimi yapılarak laboratuvar içerisinde hazırlanan deney düzeneğinde karakteristik özelliklerini belirlemek için ölçümü gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen FSY'nin çalışma frekansı 8-12 GHz'de olduğu görülmüştür. FSY'nin benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen verilerin uyum içerisinde olduğu, üretimi gerçekleştirilen yapıda X bantlarında en az -20 dB'lik bir zayıflamanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında prototip üretimi yapılan FSY'nin askeri ve sivil haberleşme sistemlerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında aktif FSY üretimi gerçekleştirilerek çok daha fonksiyonel hale dönüştürülmesi sağlanabilir Geliştirme çalışmaları kapsamında; birim hücre geometrilerinin daha yüksek geliş açılarında kararlı frekans tepkisi vermesi ve ihtiyaç duyulan bant genişliğini sağlaması için 32 geliştirilme-

si, üretim süreçlerinin iyileştirilerek üretimden kaynaklı hataların en aza indirilmesinin sağlanması yapılacak sonraki çalışmalar olarak sıralanabilir.

Kaynaklar

- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. Wiley.
- Liu, Y., & Geng, J. (2018). "Frequency Selective Surfaces: A Review". *Progress in Electromagnetics Research*, 165, 177-190.
- Jang, H. J., & Kim, S. H. (2020). "Recent Advances in Frequency Selective Surfaces for Radar Applications". *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 34(5), 607-628.
- Munk, B. A. (2000). *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. Wiley.
- Reddy, A. S., & Kaur, S. (2015). "An Overview of X-band Radar Systems and their Applications". *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(5), 4224-4230.
- Yang, Y., & Zhang, Y. (2019). "Design and Analysis of Frequency Selective Surfaces for Wireless Applications". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(8), 5151-5160.
- Geng, J., & Wang, Y. (2017). "Applications of Frequency Selective Surfaces in Energy Harvesting". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 655-661.
- Sharma, S., & Kumar, A. (2021). "Innovative Materials for Frequency Selective Surfaces". *Materials Science and Engineering: B*, 267, 115112.
- Zhang, T., et al. (2023). "Artificial Intelligence in Designing Frequency Selective Surfaces". *Journal of Applied Physics*, 134(2), 024901.
- Kheirandish, A., & Vafaei, S. (2021). "Design and Analysis of Frequency Selective Surfaces: A Comprehensive Review". *Electromagnetics*, 41(3), 192-212.
- Wu, T. K. (1995). *Frequency Selective Surface and Grid Array*. John Wiley & Sons.
- Iqbal, M., & Khan, M. (2022). "Advanced Techniques for Designing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication". *IEEE Access*, 10, 358-367.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th ed.). Wiley.
- Rahmat-Samii, Y., & Mittra, R. (Eds.). (1997). *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*. Cambridge University Press.
- Sievenpiper, D. F., et al. (1999). High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2059–2074.
- Sievenpiper, D. F., et al. (1999). High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2059–2074.
- Knott, E. F., Schaeffer, J. F., & Tuley, M. T. (2004). *Radar Cross Section* (2nd ed.). SciTech Publishing.



BÖLÜM

4

YAPAY ZEKA TABANLI VEKİL MODELLER KULLANILARAK 6 GHZ ALTI 5G FREKANS BANDI UYGULAMALARI İÇİN FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN TASARIMI

Özlem TARİ¹

Aysu BELEN²

Tarlan MAHOUTİ³

¹ Prof. Dr., İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl., İstanbul <https://orcid.org/0000-0001-7127-5915>, ozlemilgin@arel.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksek Okulu, Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Teknolojisi, Hatay, <https://orcid.org/0000-0001-5038-424X>, aysu.belen@iste.edu.tr

³ Yüksek Müh., , Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği İstanbul, <https://orcid.org/0000-0001-5178-4878>, tarlan.mahouti@gmail.com

Giriş

Frekans Seçici Yüzeyler (FSS), genellikle bir dielektrik alt tabaka üzerine basılmış iletken elemanlardan oluşan iki boyutlu periyodik dizilimlerdir ve belirli frekanslardaki elektromanyetik dalgaları seçici olarak iletmek, yansıtmak veya soğurmak üzere tasarlanmıştır. Bu yüzeyler, belirli frekans bantlarının geçişine izin verirken diğerlerini engelleyen uzaysal filtreler gibi çalışırlar. FSS'nin davranışı; birim hücrenin geometrisi, dizilim periyoditesi, malzeme özellikleri ve geliş açısı gibi faktörlere bağlıdır. Doğalarındaki rezonans özellikleri sayesinde, FSS yapıları; elemanlarının şekli ve konfigürasyonu ayarlanarak istenilen frekans tepkisini gösterecek şekilde mühendislik tasarımına uygun hale getirilebilir. Bu çok yönlülükleri, özellikle spektral özellikler üzerinde kontrolün gerekli olduğu elektromanyetik uygulamalarda onları temel bir bileşen hâline getirmektedir.

FSS'ler, antenler, radomlar, yansıtıcı diziler (reflectarray), elektromanyetik kalkanlama sistemleri ve görünmezlik (stealth) teknolojileri gibi birçok alanda vazgeçilmez bir unsur hâline gelmiştir. Dalgaların frekansa bağlı şekilde yayılımını yönlendirme kabiliyetleri, mikrodalga sistemlerinin performansını ve işlevselliğini artırma olanağı sağlar. Örneğin, FSS katmanları anten sistemlerine entegre edilerek istenmeyen frekans bantlarının bastırılması veya kazanç ve bant genişliğinin artırılması sağlanabilir. Ayrıca, düzlemsel yapıları ve standart üretim süreçleriyle uyumlulukları sayesinde FSS'ler, kompakt ve düşük profilli sistemler için uygundur ve bu yönüyle modern iletişim cihazlarındaki miniatürleştirme eğilimleriyle örtüşmektedir. [1] numaralı çalışmada da görüldüğü gibi, son gelişmeler FSS'lerin ışın yönlendirme ağırları ve yeniden yapılandırılabilir metasurfaces gibi sistemlerde uzaysal filtre olarak kullanıma potansiyelini ortaya koyarak ileri düzey mikrodalga uygulamalarındaki faydalarını genişletmiştir.

FSS davranışının doğru analiz edilebilmesi, özellikle karmaşık veya eğik geliş açılarının söz konusu olduğu ortamlarda, tam dalga elektromanyetik simülasyon gerektirir. Bir FSS'in performansı, gelen elektromanyetik alanlarla üç boyutlu etkileşimiyle belirlendiğinden, basitleştirilmiş analitik yöntemler veya eşdeğer devre modelleri genellikle yeterli öngörü doğruluğu sunmaz. [2] numaralı çalışmada görüldüğü üzere, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Sonlu Farklar Zaman Alanı (FDTD) veya Momentler Yöntemi (MoM) gibi tekniklere dayanan 3B elektromanyetik simülasyon araçları; saçılma parametrelerinin ve alan dağılımlarının yüksek doğrulukla değerlendirilmesinde vazgeçilmezdir. Bu araçlar, yüksek performanslı FSS yapılarının tasarımı ve doğrulanması açısından kritik olan karmaşık bağlaşım etkilerini, polarizasyon bağımlılıklarını ve alt tabaka etkileşimlerini doğru bir şekilde yakalayabilmektedir.

3B tam dalga simülasyon araçları yüksek doğruluk sağlasa da, özellikle yinelemeli tasarım optimizasyonlarında kullanıldığında hesaplama açısından oldukça maliyetlidir. FSS yapıları için parametre uzayı genellikle yüksek boyutludur ve birden fazla geometrik ve malzeme değişkenini içerir. Her bir simülasyon çalışması, karmaşıklığa bağlı olarak birkaç dakikadan birkaç saate kadar sürebilir. [3] numaralı çalışmada belirtildiği üzere, bu yüksek hesaplama maliyeti, özellikle genetik algoritmalar veya kapsamlı parametre taramaları gibi geleneksel yöntemlerin kullanıldığı optimizasyon süreçlerinde ciddi bir darboğaz oluşturmaktadır. Bu durum, doğruluktan ödün vermeden simülasyon süresini azaltacak etkili, doğru ve ölçeklenebilir optimizasyon yaklaşımlarına olan ihtiyacı artırmış; bu da vekil modelleme tekniklerinin ve makine öğrenmesi destekli tasarım stratejilerinin araştırılmasını teşvik etmiştir.

Son yıllarda, yapay zekânın (YZ) elektromanyetik tasarım süreçlerine entegrasyonu, özellikle yüksek doğruluklu simülasyonların getirdiği hesaplama zorluklarını aşma konusunda önemli bir ivme kazanmıştır. Veri odaklı öğrenmeye dayalı YZ tabanlı modeller, simülasyon süreçlerini hızlandırmak amacıyla benimsenmiş ve doğruluktan ciddi şekilde ödün vermeden çözümler sunmuştur. Bu yöntemler, antenler gibi karmaşık mikrodalga yapıların tasarımında giderek daha fazla kullanılmaktadır; çünkü Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) veya Sonlu Farklar Zaman Alanı (FDTD) gibi geleneksel elektromanyetik çözücüler, tasarım optimizasyon döngülerinde çok uzun süreler gerektirebilir. [4] numaralı çalışmada görüldüğü üzere, tam dalga simülasyonlarının eğitilmiş vekil modellerle değiştirilmesi, tasarımın daha hızlı sonuç vermesini sağlamakta ve daha geniş tasarım alanlarının keşfedilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca, [5] numaralı çalışmada gösterildiği gibi, makine öğrenmesi teknikleri, geleneksel analitik veya deneysel yöntemlerin karmaşık, doğrusal olmayan elektromanyetik davranışları açıklamakta yetersiz kaldığı durumlarda kara kutu modelleme yaklaşımı sunarak etkili bir çözüm sağlamaktadır.

Veri odaklı vekil modeller, yüksek doğruluklu simülasyon modellerinin hesaplama açısından verimli yaklaşık çözümlerini sunar. Bu modeller, sınırlı sayıda tam dalga simülasyon verisiyle eğitilir ve görülmemiş yapı konfigürasyonları için genelleme yapma kapasitesine sahiptir; böylece tekrar tekrar pahalı simülasyonlar yapılmasına gerek kalmaz. Genellikle sınır ağları, destek vektör makineleri veya Gauss süreçleri kullanılarak oluşturulan bu vekil modeller, giriş parametrelerinden (örneğin geometrik boyutlar) çıkış performans ölçütlerine (örneğin S-parametreleri, kazanç veya verimlilik) olan ilişkileri yaklaşık olarak tahmin eder. [6] numaralı çalışmada da görüldüğü gibi, bu modeller, tasarım uzayındaki performans açısından en kritik bölgeleri hedefleyen alanlara özgü örnekleme teknikleriyle birleştirildiğinde özellikle etkili olmaktadır. Mikrodalga anten tasarımında, vekil

modelleme gerçek zamanlı değerlendirmelere olanak tanıdığı için özellikle güçlüdür; bu, yalnızca tam dalga yöntemleri kullanılarak pratikte mümkün değildir.

Son yıllarda yapılan birçok çalışma, mikrodalga anten optimizasyonunda vekil modellemenin artan başarısını ortaya koymaktadır. [7] numaralı çalışmada, çok bantlı bir antenin tasarımı için geliştirilen derin öğrenme destekli bir vekil model, geleneksel yaklaşımlara kıyasla %40 oranında daha düşük hesaplama maliyeti sağlamıştır. [8] numaralı çalışmada ise, ışın tarama uygulamaları için seyahat dalgası antenini optimize etmek amacıyla 3B veri odaklı bir vekil modele dayalı yöntem geliştirilmiş ve klasik modellerden daha üstün performans gösteren bir sinir ağı çerçevesi kullanılmıştır. Benzer şekilde, [9] numaralı çalışmada, ISM bandı için düşük gürültülü bir yükselteç tasarımı vekil modellerle optimize edilmiş ve veri odaklı modellerin karmaşık devre aşamalarındaki etkinliği vurgulanmıştır. [5] numaralı çalışmada ele alındığı gibi, bu yöntemlerin etkinliği, performans odaklı alan daraltma ve manifold örnekleme gibi yöntemsel ilerlemelerle daha da desteklenmiştir. Ayrıca [8] ve [10] numaralı çalışmalarda, akıllı vekil modelleme çerçevelerinin çeşitli frekans bantlarında yüksek performanslı anten optimizasyonuna nasıl uyarlanabileceği gösterilmiştir.

Gelişmekte olan kablosuz teknolojilerde verimli ve yüksek performanslı elektromanyetik yapılara duyulan artan talep doğrultusunda, bu çalışma, 6 GHz altı 5G uygulamaları için özel olarak tasarlanmış frekans seçici yüzeylerin (FSS) tasarım optimizasyonuna yönelik, yapay zekâ tabanlı ve veri odaklı bir vekil modelleme yaklaşımı önermektedir. Tasarım süreci, hesaplama verimliliği ve üretim pratikliği açısından ele alınmış olup, özellikle 3B yazdırılabilir bir FSS mimarisine odaklanılmıştır. 6 GHz altı frekanslar, kapsama alanı ile kapasite arasında sağladığı avantajlı denge nedeniyle günümüz 5G ağlarında hâlâ kritik bir çalışma bandı olarak kabul edilmektedir. Ancak, bu frekans bandında elektromanyetik davranış üzerinde hassas kontrol sağlamak, özellikle 3B yazıcı gibi üretim kısıtlamalarıyla birlikte düşünüldüğünde, simülasyon doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasında denge kuran bir optimizasyon çerçevesini zorunlu kılmaktadır.

Bu hedef doğrultusunda önerilen yöntem, 3B tam dalga elektromanyetik simülasyon aracı kullanılarak kapsamlı bir veri kümesi oluşturulmasıyla başlamaktadır. Veri kümesi, FSS geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki geniş parametre varyasyonlarını kapsayarak gerçekçi performans senaryolarını yansıtacak şekilde yapılandırılmıştır. Her bir simülasyon, ayrıntılı saçılma parametresi (S-parametresi) yanıtları üretmekte ve bu çıktılar sonraki model eğitimi için referans verileri (gerçek değerler) olarak kullanılmaktadır. Bu tür elektromanyetik yapılar içerisindeki giriş-çıkış ilişkilerinin yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan doğası göz

önüne alınarak, toplanan veriler otomatik makine öğrenmesi (AutoML) süreciyle bir dizi vekil modelin eğitilmesinde kullanılmaktadır. Bu süreç, çeşitli regresyona dayalı makine öğrenmesi algoritmalarını ve hiperparametre yapılandırmalarını sistematik olarak araştırarak, FSS tasarımının S-parametre davranışlarını en doğru ve genellenebilir biçimde tahmin edebilecek vekil modeli belirlemektedir.

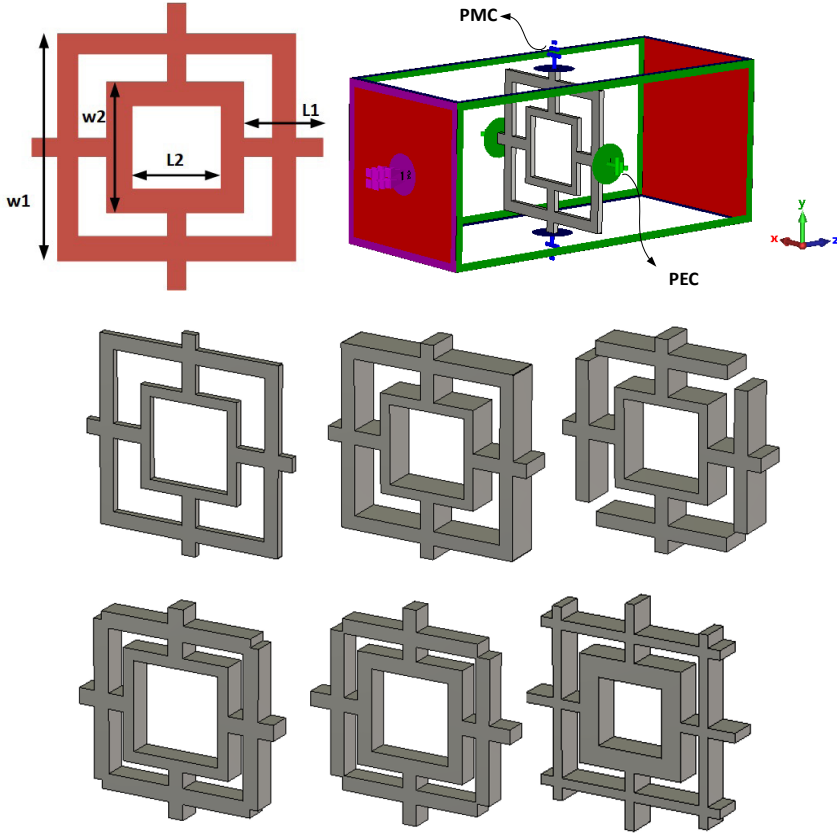
Vekil model, 3B EM simülatörünün hesaplama açısından maliyetsiz bir yaklaşık modeli olarak işlev görerek, her yinelemede tam dalga simülasyon çalıştırmaya gerek kalmadan hızlı performans değerlendirmeleri yapılmasına olanak tanır. Vekil modele dayalı oluşturulan optimizasyon döngüsü, rezonans frekansı, iletim/yansıma katsayıları ve bant genişliği gibi belirli elektromanyetik performans kriterlerini hedeflemektedir. Bu modele dayalı yaklaşım sayesinde, tasarım süreci yalnızca ciddi anlamda hızlanmakla kalmaz, aynı zamanda hızlı prototipleme ve yinelemeli iyileştirme süreçleri için daha ölçeklenebilir ve erişilebilir hâle gelir. Benzer bağlamlarda yapılmış önceki çalışmaların da desteklediği üzere [4]–[10], vekil model destekli optimizasyon stratejileri, model doğruluğundan ödün vermeden tasarım döngüsü süresini azaltma potansiyeli açısından güçlü bir seçenek sunmaktadır. Bu durum, özellikle pazara sunma süresi ve donanım prototipleme sınırlamalarının kritik olduğu uygulamalarda büyük önem taşır.

Bunun yanında, AutoML'nin entegrasyonu, vekil modelleme sürecine uyarlanabilirlik ve nesnellik kazandırarak manuel ayarlamalara ve uzman müdahalesine olan bağımlılığı azaltmaktadır. Modellerin otomatik olarak seçilmesi ve eğitilmesi, tekrarlanabilirliği artırmakta ve yapay zekâ destekli optimizasyon rutinlerinin daha geniş sanayi süreçlerine entegre edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmayı farklılaştıran önemli bir yön ise, vekil modellemenin, eklemeli imalat (additive manufacturing) teknikleriyle uyumlu FSS yapıları için özel olarak uyarlanmış olmasıdır. Bu pratik tasarım kısıtı, yalnızca yüksek elektromanyetik performans gerekliliğini değil, aynı zamanda üretilebilirliği ve geometrik toleranslara karşı dayanıklılığı da zorunlu kılarak sürece ek bir karmaşıklık katmaktadır.

Özetle, bu çalışmanın temel katkısı, 6 GHz altı 5G uygulamaları için tasarlanmış FSS yapıların optimizasyonunu hızlandıran, ölçeklenebilir ve verimli bir vekil model tabanlı tasarım çerçevesinin geliştirilmesidir. Yüksek doğruluklu simülasyon verileri ile otomatik makine öğrenmesinin birleşimi sayesinde, önerilen yöntem hem hesaplama kaynaklarının kullanımını azaltmakta hem de zorlu elektromanyetik performans hedeflerini karşılamaktadır. Ayrıca bu çerçeve, benzer yapay zekâ temelli optimizasyon stratejilerinin, özellikle eklemeli imalatla sınırlandırılmış ya da gerçek zamanlı çalışmaya uygun olması gereken mikrodalga ve anten bileşenlerine genişletilmesi için bir yol haritası sunmaktadır.

Problemin Modellenmesi

Bu çalışmada ele alınan birim eleman, eklemeli imalat (additive manufacturing) kısıtları göz önünde bulundurularak tasarlanmış, geometrik olarak yeniden yapılandırılabilir bir frekans seçici yüzeydir (FSS). Bu birim elemanın çeşitli geometrik varyasyonlarına ait 3B görselleştirmeler Şekil 1’de sunulmaktadır. Tasarım, düzlem üzerinde simetrik olarak yerleştirilmiş, kesişen dikdörtgen elemanlardan oluşan iç içe geçmiş, ızgara benzeri bir kare topolojiye dayanmaktadır. Bu yapı, yapısal sadeliği, 3B yazıcıyla kolay üretilebilirliği ve elektromanyetik tepki karakteristiklerinin yüksek oranda ayarlanabilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Sunulan varyasyonlar, yapının belirli geometrik özelliklerini kontrol eden dört temel tasarım parametresinin etkisini göstermektedir—örneğin çizgi kalınlıkları, boşluklar, çerçeve kalınlığı veya eleman aralıkları gibi.

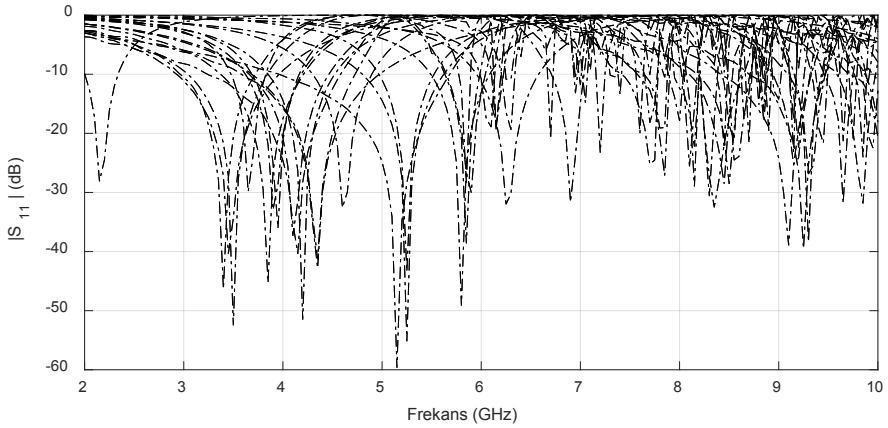


Şekil 1. Dört tasarım değişkeninin çeşitli kombinasyonları için frekans seçici yüzey (FSS) birim elemanın 3B perspektif görüntüleri. Varyasyonlar, yapıdaki geometrik esnekliği göstermekte olup; eleman genişlikleri, boşlukları ve aralıklarının

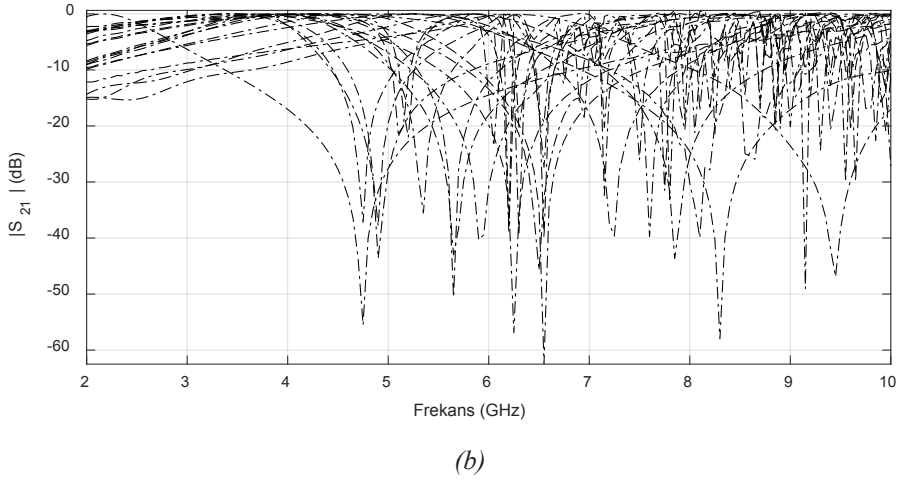
kontrollü bir şekilde değiştirilmesiyle elektromanyetik tepkinin önemli ölçüde ayarlanabildiğini ortaya koymaktadır.

Bu dört tasarım parametresi yalnızca birim hücrenin görsel ve yapısal görünümünü değiştirmekle kalmayıp, aynı zamanda elektromanyetik davranışı üzerinde doğrudan ve önemli bir etki yaratmaktadır. Özellikle bu parametreler, iletim katsayısı (S_{21}) ve yansıma katsayısı (S_{11}) ile temsil edilen saçılma karakteristiklerini etkilemektedir. Her bir değişken, rezonans frekansını, bant genişliğini ve bu saçılma parametrelerinin genliğini doğrusal olmayan ve yüksek derecede bağlaışık bir şekilde etkiler. Bu nedenle, geometride yapılan küçük değişiklikler dahi frekans tepkisinde ciddi kaymalara ya da geçiş bandı reddetme karakteristiklerinde önemli değişimlere neden olabilir.

FSS'in elektromanyetik davranışının geometrik parametrelere olan duyarlılığını göstermek amacıyla, Şekil 2'de parametre uzayından rastgele seçilen on farklı tasarım varyantına ait S_{11} ve S_{21} tam dalga simülasyon sonuçları sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi, örnekler arasında saçılma profilleri belirgin şekilde farklılık göstermektedir ve rezonans frekansları ile bant genişliklerinde açık bir çeşitlilik bulunmaktadır. Bazı konfigürasyonlar, güçlü bir bant durdurucu (band-stop) davranışa işaret eden S_{21} 'de keskin çöküntüler sergilerken, diğerleri daha geniş veya frekansı kaymış iletim pencerelerine izin vermektedir. Benzer şekilde, S_{11} yansıma piklerinin genliği ve konumu da kayda değer ölçüde farklılık göstermektedir. Bu elektromanyetik davranış çeşitliliği, önerilen birim hücre tasarımının esnekliğini ve 6 GHz altı 5G frekanslarının geniş bir spektrumunu kapsama potansiyelini vurgulamaktadır.



(a)



Şekil 2. Rastgele seçilmiş on farklı FSS birim eleman tasarımına ait simüle edilmiş saçılma parametreleri (S_{11} ve S_{21}). Sonuçlar, rezonans frekanslarında ve iletim/yansıma davranışlarında önemli çeşitliliği ortaya koyarak, önerilen parametrik yapının elde edebileceği geniş elektromanyetik özellik yelpazesini gözler önüne sermektedir.

Bu yapının doğasında bulunan ayarlanabilirlik, onu veri odaklı optimizasyon stratejileri için son derece uygun kılmaktadır. Saçılma parametrelerinin geometrik özelliklere olan güçlü ve karmaşık bağımlılığı, bu ilişkinin basit analitik modellerle kolayca açıklanamaması nedeniyle vekil modellemenin kullanımını haklı kılmaktadır. Dolayısıyla, önerilen tasarım; makine öğrenmesi tekniklerinin FSS'in frekans tepkisini yüksek verimlilik ve hassasiyetle modellemek, tahmin etmek ve optimize etmek amacıyla kullanılabileceği zengin ve anlamlı bir parametrik tasarım alanı sunmaktadır.

Deney Tasarımı Noktalarının Oluşturulması

Dört geometrik değişkenle tanımlanan önerilen FSS tasarımının karmaşıklığı, klasik kaba kuvvet (brute-force) veya kapsamlı simülasyon yöntemleriyle etkili şekilde araştırılamayacak yüksek boyutlu bir optimizasyon alanı ortaya çıkarmaktadır. Bu değişkenlerin her bir kombinasyonu, farklı elektromanyetik davranışlar ortaya çıkarabilir; bu da, rezonans frekansı ve iletim/yansıma karakteristikleri gibi hedeflenen performans ölçütlerini karşılayan optimum konfigürasyonları belirlemek için çok sayıda değerlendirme yapılmasını gerektirir. Ancak her bir değerlendirme, hesaplama açısından maliyetli bir 3B elektromanyetik simülasyon içerdiğinden, yalnızca bu çözücülere (solver) dayanarak optimizasyon

yapmak özellikle tasarım alanının yüksek çözünürlükte taranması gerektiğinde pratik değildir.

Bu sorunun üstesinden gelmek için, FSS birim hücresinin elektromanyetik davranışını çok daha düşük hesaplama maliyetiyle yaklaşık olarak tahmin etmek amacıyla veri odaklı bir vekil modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Vekil model, tasarım değişkenlerine dayalı olarak saçılma parametrelerini (S11 ve S21) tahmin edebilen, tam dalga simülasyon çalıştırmaya gerek duymayan hesaplama açısından verimli bir araç olarak görev yapmaktadır. Ancak vekil modelin doğruluğu ve genelleme yeteneği, büyük ölçüde eğitim verisinin kalitesine ve tasarım alanındaki dağılımına bağlıdır. Giriş tasarım uzayının temsil gücü yüksek bir şekilde kapsanmasını sağlamak için Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling - LHS) yöntemi kullanılmıştır.

LHS, özellikle yüksek boyutlu tasarım uzaylarında sahip olduğu üstün alan kapsama özelliğiyle bilinen tabakalı bir örnekleme yöntemidir. Her bir değişkenin tüm aralığını eşit aralıklarla örnekleyerek, modelin sağlamlığını artırır ve gerekli simülasyon sayısını azaltır. Bu çalışmada, tasarım uzayından 1000 eğitim örneği ve 100 test örneğinden oluşan bir veri kümesi oluşturmak için LHS yöntemi kullanılmıştır. Bu örnekler daha sonra makine öğrenmesi tabanlı vekil modellerin eğitimi ve değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Burada tasarım değişkenleri $h=1-5$ [mm], $w_1=20-40$ [mm], $w_2=10-20$ [mm], $l_1=5-20$ [mm] arasında değişmektedir.

LHS'nin elektromanyetik uygulamalarda vekil modelleme için etkinliği önceki çalışmalarda kapsamlı biçimde doğrulanmıştır. Örneğin, LHS'nin geleneksel rastgele örnekleme veya Monte Carlo tekniklerine kıyasla doğru model geliştirme sürecinde gereken simülasyon sayısını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [11], [12]. Anten ve mikrodalga bileşen tasarımı bağlamında, LHS kullanımı, daha az örneklemeyle yüksek model doğruluğu elde edilmesini sağlayarak genel hesaplama verimliliğini artırmıştır [13], [14]. LHS'nin uyarlamalı (adaptive) türevleri, örnekleme-yi çıkış değişkenliğinin yüksek olduğu bölgelere odaklayarak performansı daha da artırmaktadır [15]. Ayrıca LHS, yapay sinir ağlarıyla birlikte kullanılarak karmaşık rezonans davranışlarına sahip antenler için yüksek doğrulukta ve ölçeklenebilir tahmin modelleri oluşturmak amacıyla başarıyla uygulanmıştır [16].

Teknik avantajlarının ötesinde, LHS aynı zamanda yinelemeli tasarım çerçeveleri için kritik olan tekrarlanabilirlik ve tutarlılık sunmaktadır. Mühendislikte deney tasarımı üzerine yakın zamanda yayımlanan eğitimler ve derlemelerde de vurgulandığı gibi, vekil modellerin yer aldığı simülasyon tabanlı optimizasyon süreçlerinde tercih edilen standart hâline gelmiştir

[17], [18]. Bu nedenle, önerilen vekil model destekli tasarım sürecinde veri üretiminin temeli olarak LHS yöntemi tercih edilmiştir.

Vekil Modellerin Kıyaslanması (Benchmarking)

Vekil model destekli optimizasyon bağlamında, kullanılacak regresyon modelinin seçimi, öngörü sisteminin genel doğruluğu ve verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Yapay sinir ağları (ANN), destek vektör regresyonu (SVR), Gauss süreç regresyonu (GPR) ve topluluk yöntemleri (ensemble methods) gibi birçok yapay zekâ tabanlı regresyon modeli mevcuttur ve her biri farklı varsayımlar, genelleme davranışları ve hesaplama maliyetleri sunar. Bu modellerin performansı, yalnızca eğitim veri kümesinin özelliklerine değil, aynı zamanda yaklaşık olarak modellenmeye çalışılan elektromanyetik tepkinin karmaşıklığına da bağlı olarak değişir. Yapılan çeşitli çalışmalarda da gösterildiği gibi, tüm vekil modelleme görevleri için evrensel olarak en iyi olan tek bir model yoktur [19], [20].

Bu nedenle, önerilen FSS optimizasyon problemi için en uygun modelin seçilebilmesi adına birden fazla regresyon modeli arasında kıyaslama yapılması kritik öneme sahiptir. Karşılaştırmalı kıyaslama; tahmin hatası, eğitim süresi ve daha önce görülmemiş geometrilere genelleme kabiliyeti açısından modellerin performansının titizlikle değerlendirilmesini sağlar. Simülasyon odaklı elektromanyetik uygulamalarda, bu adım giriş-çıkış ilişkilerinin doğrusal olmayan ve yüksek derecede bağlaşıklık yapısı nedeniyle özellikle önemlidir. Örneğin, bazı kıyaslama çalışmaları, belirli konfigürasyonlar altında anten tasarımı görevlerinde sinirsel topluluk yöntemlerinin standart regresyon modellerine göre üstün olduğunu göstermiştir [21]; öte yandan başka çalışmalar, sınırlı veri ile eğitildiğinde kernel tabanlı SVR modellerinin, yapay sinir ağlarına göre daha kararlı performans sergilediğini ortaya koymuştur [22].

Yüksek tahmin doğruluğu elde etmekte ikinci önemli unsur ise, her regresyon modeline özgü hiperparametrelerin doğru bir şekilde ayarlanmasıdır. Bu hiperparametreler—örneğin SVR'deki kernel genişliği, sinir ağlarındaki katman boyutları veya GPR'deki kernel fonksiyonları—modelin giriş-çıkış ilişkisini öğrenme yeteneğini önemli ölçüde etkiler. Hatalı hiperparametre ayarları, aşırı öğrenme (overfitting), yetersiz öğrenme (underfitting) veya zayıf yakınsama ile sonuçlanabilir. Bu nedenle hiperparametre seçimi, genellikle Bayes optimizasyonu, genetik algoritmalar veya çapraz doğrulamalı ızgara tarama (grid search) gibi tekniklerle ele alınan iç içe geçmiş (nested) bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilir [23], [24].

Son dönem literatüründe, hiperparametre optimizasyonunun vekil modelleme sürecine entegre edilmesinin, hem tahmin doğruluğu hem de hesaplama verimliliği açısından önemli kazanımlar sağlayabileceği vurgulanmaktadır. Örneğin, vekil model destekli hiperparametre ayarlaması, anten yapılarını optimize etmek için başarıyla uygulanmış ve yüksek performanslı tasarımlara daha hızlı yakınsama sağlamıştır [25]. Benzer şekilde, yüksek boyutlu elektromanyetik (EM) problemlerde otomatik hiperparametre ayarlama yöntemlerinin kullanımı, vekil modellerin oluşturulmasında etkili olmuş ve gerekli örneklem sayısında kayda değer azalmalar sağlamıştır [26]. Ayrıca, model karmaşıklığının yorumlanabilirlik ve hızla dengelenmesi gereken durumlarda, özellik tekrar kullanımı (feature reuse) ve bağlam farkındalığı (context-awareness) içeren uyarlanabilir öğrenme çerçevelerinin yakınsama davranışını iyileştirdiği gösterilmiştir [27].

Alanın ortaya koyduğu üzere, kıyaslama ve hiperparametre optimizasyonunun birleştirilmesi, özellikle simülasyon maliyetinin sınırlayıcı bir etken olduğu elektromanyetik uygulamalarda, sağlam model geliştirme stratejileri oluşturulmasına imkân tanımaktadır [28]. Bu çalışmada, önerilen FSS veri kümesi üzerinde çeşitli yapay zekâ regresyon modelleri kırıyaslanacak ve değerlendirme sürecine otomatik hiperparametre optimizasyonu entegre edilecektir. Böylece yalnızca en yüksek performans gösteren model değil, aynı zamanda eğitim maliyeti ve tahmin hızı açısından pratik kısıtları karşılayan bir modelin seçilmesi sağlanacaktır.

Bu çalışmada, önerilen FSS birim elemanın elektromanyetik saçılma davranışını tahmin etmek amacıyla vekil regresyon modelleri geliştirmek için çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmaktadır. Bunlar arasında Destek Vektör Regresyonu (SVR), Yapay Sinir Ağları (ANN), Topluluk Öğrenme (Ensemble Learning) modelleri, Gauss Süreç Regresyonu (GPR) ve Piramidal Derin Regresyon Ağları (PDRN) yer almaktadır. Bu yaklaşımların her biri, tahmin doğruluğu, hesaplama yükü ve genelleme yeteneği üzerinde önemli etkiler yaratabilecek farklı modelleme özellikleri sunar. Bu nedenle, bu modellerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir.

Destek Vektör Regresyonu (SVR), küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde sağlamlığıyla tanınan kernel tabanlı bir yöntemdir. SVR, gerçek çıktılarından belirli bir tolerans aralığında kalan bir fonksiyon bulmaya çalışır; bu da genellikle yüksek boyutluluk ve düşük gürültü içeren problemlerde üstün performans elde edilmesini sağlar. Uygun kernel seçimi ve düzenleme (regularization) parametreleriyle yapılan ayarlamalarla birlikte, özellikle kararlı yapısıyla öne çıkar [19].

Yapay Sinir Ağları (ANN), giriş ve çıkış verileri arasında karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilen esnek model sınıflarını temsil eder.

Mimarileri, çok çeşitli elektromanyetik modelleme görevlerine uyacak şekilde kolayca uyarlanabilir; ancak genellikle daha fazla eğitim verisi gerektirirler ve öğrenme oranı ile aktivasyon fonksiyonu gibi hiperparametre ayarlarına duyarlıdırlar [20].

Topluluk Öğrenme (Ensemble Learning) modelleri—örneğin Rastgele Ormanlar (Random Forests) veya Artırılmış Karar Ağaçları (Gradient Boosted Trees)—birden fazla zayıf öğreniciyi bir araya getirerek güçlü bir tahmin modeli oluşturur. Bu modeller, birden çok tahminin ortalamasını alarak aşırı öğrenmeye (overfitting) karşı daha dirençli olur ve genellikle daha iyi genelleme performansı sunar. Vekil modellemede, topluluk yöntemleri doğrusal olmayan eğilimleri ve aykırı değer davranışlarını yakalama konusunda özellikle geometrik açıdan zengin elektromanyetik uygulamalarda başarılı sonuçlar vermiştir [21].

Gauss Süreç Regresyonu (GPR), diğer adıyla Kriging, yalnızca tahmin yapmakla kalmayıp aynı zamanda bu tahminlere ilişkin belirsizliği de nicel olarak değerlendirebilen olasılıksal bir modeldir. GPR, seyrek veri içeren problemler için idealdir ve çekirdek (kernel) fonksiyonları üzerinden yorumlanabilir modelleme sunar. Düzgün yüzeyleri modelleyebilme yeteneği ve güçlü teorik temelleri sayesinde mikrodalga ve anten tasarımı-nda yaygın olarak kullanılmaktadır [23].

Piramidal Derin Regresyon Ağları (PDRN), son zamanlarda karmaşık elektromanyetik tepkileri modellemek için sağlam bir araç olarak dikkat çekmektedir. PDRN'ler, katman genişliği kademeli olarak artan hiyerarşik derin öğrenme yapıları kullanarak yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan problemleri verimli bir şekilde temsil edebilmektedir. [29] numaralı çalışmada, PDRN yaklaşımı, vekil model doğruluğunu önemli ölçüde artırmak amacıyla alan daraltma (domain confinement) tekniğiyle birleştirilmiş ve anten uygulamalarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma, eğitim örneği sayısını artırmadan, geleneksel kriging tabanlı vekil modellere kıyasla tahmin hatasında iki kat iyileşme sağlandığını göstermiştir.

Tüm modeller için hiperparametre ayarlamaları, yüksek boyutlu EM problemlerinde modelin genelleme yeteneğini ve tahmin güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığı kanıtlanmış olan k-katlı çapraz doğrulama ($K=3$) ile birlikte Bayes optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir [25], [26]. Bayes yöntemleri, hiperparametre alanını verimli şekilde tarayarak vekil modellerin ne yetersiz ne de aşırı öğrenmiş olmasını garanti eder.

Tablo 1. Test veri kümesi için vekil modellerin karşılaştırmalı kıyaslama sonuçları, bağıl mutlak hata.

Model	Optimize Hiper-parametreler	Test
ANN	# hidden-layers: 3; # Neurons: 15-20-35; Activation-function: logsig; training method: Levenberg-Marquardt backpropagation	9.33
SVRM	Kernel-Gaussian; Scale: 0.77	8.71
Ensemble Learning	Method=Bag; NumLearningCycles= 599; MinLeafSize=12	
GPR	Fit-exact; Kerner- ardmatern32; Predict: bcd; Block Size BCD: 1500	6.78
PDRN	#neurons for the last layer= 32; layer number=5; layer factor=2.25 Leakage Ratio=0.03	3.45

Kapsamlı kıyaslama sonuçlarına göre (Tablo 1), PDRN modeli, çalışılan FSS tasarım problemi için en doğru ve hesaplama açısından en verimli vekil model olarak öne çıkmıştır. Özellikle test (ayrılmış) veri kümesi üzerinde S-parametrelerinin tahmininde üstün performans göstermiştir. Bu nedenle, 6 GHz altı 5G uygulamaları için FSS tasarımının sonraki aşamalarında optimizasyon sürecini yönlendirmek amacıyla bu model kullanılacaktır.

Örnek Çalışma: 6GHz Altı 5G Uygulamaları için FSS Birim Elemanlarının Tasarım Optimizasyonu

Bu bölümde, önceki bölümde geliştirilen Piramidal Derin Regresyon Ağı (PDRN) tabanlı vekil model, önerilen frekans seçici yüzey (FSS) birim elemanının tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Hedef, 6 GHz altı 5G uygulamaları için uygun bir saçılma profili elde etmek ve aynı zamanda hesaplama açısından yoğun olan 3B elektromanyetik (EM) simülasyonlara olan bağımlılığı en aza indirmektir.

Optimizasyonu gerçekleştirmek için, doğadan ilham alan sezgisel bir meta-sezgisel yöntem olan Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (Honey Bee Mating Optimization – HBMO) algoritması kullanılmıştır. HBMO, bal arısı kraliçesi ile erkek arıların çiftleşme sürecini taklit eder ve bu süreçte kullanılan seçim ve yeniden kombinasyon işlemleri, çok boyutlu ve karmaşık arama alanlarını etkili bir şekilde keşfetmek üzere tasarlanmıştır. Bu algoritma daha önce elektromanyetik yapılar ve çizelgeleme görevleri gibi yüksek boyutlu mühendislik optimizasyon problemlerinde rekabetçi performans göstermesiyle literatürde yer bulmuştur [30], [31].

Optimizasyon algoritmasının seçimi genellikle yakınsama hızı ve çözüm kalitesini etkileyen kritik bir faktör olsa da, bu etki vekil model destekli bu çerçevede büyük ölçüde azaltılmıştır. Geleneksel iş akışlarında, her bir fonksiyon değerlendirmesi tam dalga 3B EM simülasyonlarıyla gerçekleştirildiğinde genellikle birkaç dakika sürebilir. Bu da popülasyon boyutu, yineleme derinliği ve algoritma karmaşıklığı üzerinde ciddi sınırlamalar getirir. Ancak mevcut durumda, vekil model (PDRN) maliyet fonksiyonunu bir milisaneyeden kısa sürede değerlendirebilmektedir. Bu sayede, binlerce yineleme içeren veya büyük popülasyon boyutlarına sahip optimizasyon stratejileri dahi pratik zaman aralıklarında uygulanabilir hâle gelmektedir.

Bu hesaplama süresinde sağlanan büyük ölçüdeki azalma, simülasyon odaklı tasarım süreçlerindeki temel darboğazlardan birini ortadan kaldırmakta ve optimizasyon döngüsünün tüm tasarım alanını kapsamlı biçimde araştırmasına olanak tanımaktadır. Doğrudan simülasyona dayalı iş akışlarında bu denli ayrıntılı bir araştırma pratikte mümkün değilken, HBMO algoritması artık hesaplama yükü endişesi olmadan kapsamlı şekilde çalıştırılabilmektedir. Yapılan çalışmalar, vekil modellerin HBMO gibi sürü zekâsı algoritmalarıyla birleştirilmesinin, anten ve FSS tasarımlarında küresel optimum çözümlere ulaşma olasılığını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [32]–[35].

Bu nedenle, önerilen yöntemde PDRN ve HBMO'nun entegrasyonu, yalnızca yüksek doğruluklu modelleme sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda en uygun tasarımları bulmak için verimli ve kapsamlı bir arama gerçekleştirmeyi mümkün kılmaktadır. Bu sinerji, özellikle 5G haberleşme sistemlerinin dinamik ve zorlu tasarım ortamlarında frekans seçici yüzeylerin geliştirilmesi açısından büyük değer taşımaktadır.

FSS birim elemanının optimizasyon sürecini yönlendirmek amacıyla, her bir tasarım adayının istenen elektromanyetik performansa uygunluğunu değerlendiren bir maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır. Denklem (1)'de sunulan bu maliyet fonksiyonu, özellikle 5.4–5.8 GHz hedef frekans aralığında bant geçiren (band-pass) bir davranışı teşvik edecek şekilde kurgulanmıştır; bu aralık, 6 GHz altı 5G uygulamaları için özel öneme sahiptir. Bu amaç fonksiyonunun formülasyonu, çalışma bandı içinde yansımanın ($|S_{11}|$) en aza indirilmesi ve iletimin ($|S_{21}|$) en üst düzeye çıkarılması şeklindeki kritik performans kriterini yansıtmaktadır.

$$\text{Cost} = \alpha \cdot (1/N_p) \cdot \sum_{i=1}^{n_p} (1 - |S_{21}(f_i)|)^2 + \beta \cdot (1/N_p) \cdot \sum_{i=1}^{n_p} |S_{11}(f_i)|^2 + \gamma \cdot (1/N_s) \cdot \sum_{j=1}^{n_s} |S_{21}(f_j)|^2$$

$f_i \in [5.4, 5.8]$ GHz: İstenen geçiş bandı (passband) içerisindeki frekanslar

$f_j \notin [5.4, 5.8]$ GHz: Geçiş bandı dışındaki frekanslar (durdurma bandı / stopband)

N_p : Geçiş bandı içindeki frekans noktalarının sayısı

N_s : Durdurma bandındaki frekans noktalarının sayısı

$|S_{21}(f)|$: f frekansındaki iletim genliği

$|S_{11}(f)|$: f frekansındaki yansımaya genliği

α , β , γ : İletim, yansımaya ve durdurma bandı zayıflamasının önem derecelerini dengelemek için kullanılan ağırlık katsayıları (örneğin: $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.3$, $\gamma = 0.2$)

Maliyet fonksiyonu, hedef frekans bandı içindeki ideal saçılma parametrelerinden sapma gösteren tasarımları cezalandırırken, aynı zamanda bu bandın dışında yüksek iletim veya yansımaya değerlerini de engellemeye çalışır. Bu çift amaçlı yapı, elde edilen FSS birim elemanının yalnızca istenen frekans aralığında verimli çalışmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bant dışı sinyalleri bastırarak tayfsal seçiciliği de korur.

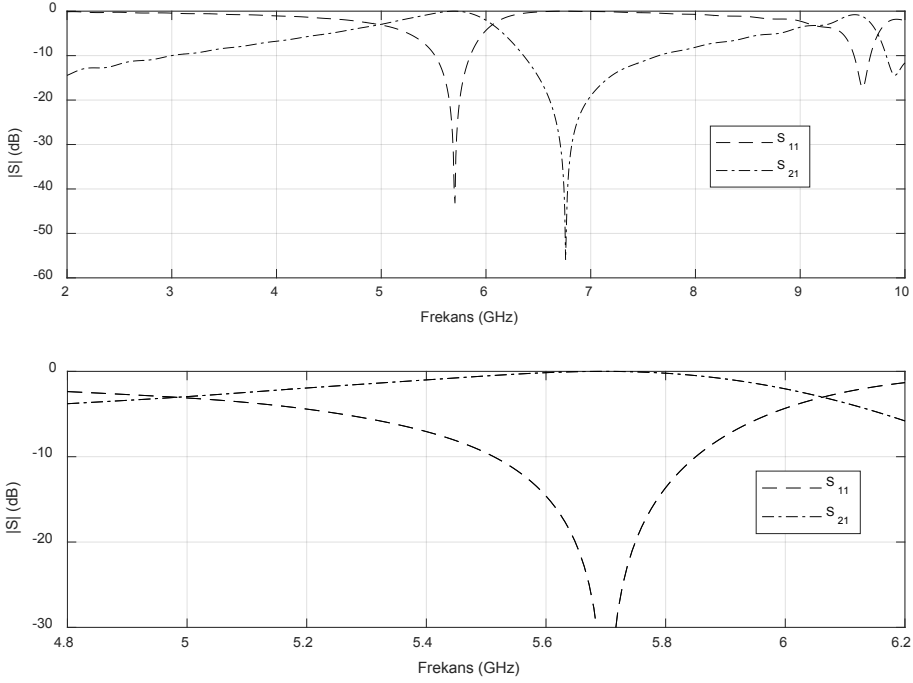
Eğitilmiş PDRN vekil modelinin kullanılması sayesinde, maliyet fonksiyonu değerlendirmeleri yüksek doğrulukla ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu durum, HBMO optimizasyonu sırasında parametre uzayının kapsamlı bir şekilde araştırılmasını mümkün kılar. Maliyet fonksiyonu döngüsüne vekil modelin entegre edilmesi, tasarım değişkenlerinin yinelemeli olarak iyileştirilmesine imkân tanırken, tam dalga EM simülasyonlarına özgü yüksek hesaplama maliyetini en aza indirir.

Genel olarak, maliyet fonksiyonu, elektromanyetik performans gereksinimleri ile optimizasyon motoru arasında nicel bir köprü görevi görerek, modern kablosuz iletişim sistemlerine özel, yüksek etkili FSS tasarımlarının otomatik keşfini mümkün kılar.

Optimizasyon sürecinin nihai çıktısı Tablo 2’de sunulmuştur; bu tabloda, en iyi şekilde tasarlanmış FSS birim elemanının geometrik parametreleri detaylandırılmıştır. Bu yapılandırma, önceki bölümlerde açıklanan HBMO–PDRN çerçevesiyle elde edilmiş olup, 5.4–5.8 GHz aralığında hedeflenen bant geçiren davranışı karşılayan bir tasarımı temsil etmektedir.

Tablo 2. Vekil model destekli HBMO optimizasyonu ile elde edilen en uygun FSS birim elemanının geometrik parametreleri. Tasarım, 5.4–5.8 GHz aralığında hedeflenen bant geçiren çalışma koşulunu karşılamaktadır. Tüm değerler [mm] cinsindendir.

Değişken	Değeri	Değişken	Değeri
L1	8.1	W1	19.9
H1	1.1	W2	6.75



Şekil 3. Optimize edilmiş FSS birim elemanına ait $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ yansıma katsayısının, eğitilmiş PDRN vekil modeli tarafından tahmin edilen değerleri ile tam dalga 3B elektromanyetik simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması. Yüksek düzeydeki uyum, vekil modelin tahmin doğruluğunu doğrulamaktadır.

Optimize edilmiş yapının elektromanyetik performansı Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilde, saçılma tepkisi—özellikle yansıma katsayısı $|S_{11}|$ —gösterilmektedir. Şekilde, eğitilmiş PDRN vekil model tarafından tahmin edilen tepki ile tam dalga 3B elektromanyetik simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki eğri de rezonans frekansı hizalaması ve frekans spektrumu boyunca yansıma genişliği açısından dikkate değer bir uyum sergilemektedir. Bu yüksek düzeydeki eşleşme, FSS birim elemanının doğrusal olmayan davranışını yakalamada vekil modelin yüksek doğruluğunu kanıtlamakta ve onun etkili bir tahmin aracı olarak geçerliliğini pekiştirmektedir.

Bu sonuçlar, önerilen yöntemin iki temel başarısını ortaya koymaktadır. Birincisi, vekil modelleme yoluyla elde edilen hesaplama verimliliği, her adımda tam dalga simülasyonun getirdiği yüksek maliyete katlanma-

dan hızlı tasarım yinelemeleri ve yüksek çözünürlüklü optimizasyon gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. İkincisi ise, PDRN vekil modelinin sağladığı modelleme doğruluğu sayesinde bu hızlandırılmış iş akışından elde edilen tasarımlar hâlâ yüksek hassasiyetli elektromanyetik analizlerle tutarlılık göstermektedir. Dolayısıyla bu yaklaşım, mikrodalga bileşen tasarımında sıklıkla birbirine zıt iki hedef olan hız ve güvenilirliği aynı anda sağlamaktadır.

Sonuç olarak, optimize edilmiş FSS yapısı yalnızca hedeflenen elektromanyetik gereksinimleri karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki iş akışlarına kıyasla kat kat daha hızlı bir tasarım süreciyle elde edilmiştir. Vekil modelin tahminlerinin tam dalga simülasyonla başarıyla doğrulanması, bu stratejinin gelecekteki 6 GHz altı 5G filtre ve yüzey yapıları uygulamaları için pratik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, 6 GHz altı 5G uygulamaları için uygun bir frekans seçici yüzey (FSS) birim elemanının tasarım optimizasyonuna yönelik kapsamlı ve disiplinler arası bir çerçeve sunmuştur. Önerilen metodoloji, 3B elektromanyetik (EM) simülasyon araçlarının sağladığı doğruluğu, yapay zekâ destekli vekil modelleme ve sezgisel optimizasyon yöntemlerinin sağladığı hesaplama verimliliğiyle birleştirmektedir. Dört geometrik tasarım değişkeni tarafından kontrol edilen FSS yapısının, oldukça değişken saçılma karakteristikleri sergilediği gösterilmiş ve bu durum, sağlam ve ölçeklenebilir bir optimizasyon stratejisine olan ihtiyacı ortaya koymuştur. Tam dalga simülasyonlara bağlı yüksek hesaplama maliyetini azaltmak için veri odaklı bir vekil modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Latin Hiperküp Örnekleme yöntemi kullanılarak iyi dağılmış bir eğitim ve test veri kümesi oluşturulmuş ve bu veri seti, bir dizi yapay zekâ regresyon modelinin eğitimi için kullanılmıştır.

SVR, ANN, GPR, Ensemble Learning ve PDRN dâhil olmak üzere çeşitli vekil modeller arasında gerçekleştirilen kapsamlı bir kıyaslama çalışması, Piramidal Derin Regresyon Ağı'nın (PDRN), doğruluk ve genelleme yeteneği arasında en iyi dengeyi sunduğunu ortaya koymuştur. 3 katlı çarpaz doğrulama ile Bayes optimizasyonu kullanılarak yapılan hiperparametre ayarlamaları, model performansını daha da artırmıştır. Seçilen PDRN modeli, daha sonra vekil model destekli bir optimizasyon hattına entegre edilerek, Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (HBMO) algoritması ile birlikte kullanılmıştır. 5.4–5.8 GHz aralığında bant geçiren davranışı zorunlu kılacak şekilde özel bir maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır. Vekil modelin son derece hızlı değerlendirme kabiliyeti sayesinde, optimizasyon algorit-

ması tasarım alanını minimum hesaplama yükü ile tarayabilmiş; tam dalga simülasyonlarla dakikalar sürecektir yinelemeler, milisaniyeler içinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de sunulan ve Şekil 3’te doğrulanan nihai tasarım, vekil modelin tahminleri ile 3B EM simülasyonları arasında mükemmel bir uyum olduğunu ortaya koymuş; böylece önerilen iş akışının yalnızca hesaplama açısından verimli değil, aynı zamanda yüksek doğrulukta olduğu da doğrulanmıştır. Bu hız ve hassasiyet dengesi, gerçek zamanlı veya yinelemeli tasarım uygulamalarını mümkün kılarak, modern RF ve anten mühendisliği bağlamında önemli bir pratik değer sunmaktadır.

Sonuç olarak, önerilen yapay zekâ destekli tasarım çerçevesi, FSS optimizasyonu için güçlü ve esnek bir yaklaşım sunmakta ve yeniden yapılandırılabilir ya da geniş bantlı 5G sistemlerde daha geniş uygulamalara yönelik potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu yaklaşımı çok hedefli optimizasyona, üretim toleransı analizine ve deneysel doğrulamaya genişletmeyi amaçlayabilir.

Kaynaklar

- [1] P. Mei, X. Lin, J. Yu, P. Zhang, and A. Boukarkar, "A low radar cross section and low profile antenna co-designed with absorbent frequency selective radome," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 409–413, 2018.
- [2] S. Kono and T. Kudou, "3D-FDTD analysis of electromagnetic shielding by using single-square-loop frequency selective surface," in *Proc. 2019 Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP)*, pp. 146–149.
- [3] C. Zhang, Y. He, H. Gao, Y. Wang, and Q. Ren, "Deep learning enabled inverse design and optimization of the frequency selective surface (FSS)," in *Proc. 2022 Int. Applied Computational Electromagnetics Society Symp. (ACES-China)*, pp. 1–3.
- [4] S. Koziel and Q. Cheng, "Reduced-cost data-driven modeling of antenna structures," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Conf. Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, 2016, pp. 1–2.
- [5] S. Koziel and A. Pietrenko-Dabrowska, "Recent advances in performance-driven surrogate modeling of high-frequency structures," *Int. J. Numer. Model.: Electron. Netw.*, vol. 33, 2020.
- [6] L. Kouhalvandi and L. Matekovits, "Surrogate modeling for designing and optimizing MIMO antennas," in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation (AP-S/URSI)*, 2022, pp. 1540–1541.
- [7] M. Palandöken, A. Belen, O. Tari, P. Mahouti, T. Mahouti, and M. A. Belen, "Computationally efficient design optimization of multiband antenna using deep learning-based surrogate models," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, 2024.
- [8] A. Belen, F. Güneş, M. Palandoken, O. Tari, M. A. Belen, and P. Mahouti, "3D EM data driven surrogate based design optimization of traveling wave antennas for beam scanning in X-band: an application example," *Wireless Netw.*, vol. 28, pp. 1827–1834, 2022.
- [9] M. A. Belen, "Surrogate based design optimization of low noise amplifier for ISM band," *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, vol. 40, no. 3, pp. 490–498, 2022.
- [10] Slawomir Koziel, A. Pietrenko-Dabrowska and Leifur Þ. Leifsson. "Antenna optimization using machine learning with reduced-dimensionality surrogates." *Scientific Reports*, 14 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72478-w>.
- [11] X. Chen, X. Guo, and J. M. Pei, "Efficient surrogate-based antenna design optimization using novel sampling methods," *2016 IEEE Int. Conf. on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 1732–1735, 2016.
- [12] Y. Yin, W. Lu, X. Xin, and Z. Lei, "Application of Monte Carlo sampling and Latin Hypercube sampling methods in pumping schedule design during

- establishing surrogate model,” *2011 Int. Symp. on Water Resource and Environmental Protection*, vol. 1, pp. 212–215, 2011.
- [13] Chen, Xiao Hui, Xin Xin Guo, and Jin Ming Pei. “Efficient surrogate-based antenna design optimization using novel sampling methods.” *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, 2016.
- [14] Nanda, Satyasai Jagannath, and Rajendra Prasad Yadav. “Multi-objective DOA estimation in automotive radar using a Sailfish optimizer with Latin hypercube sampling.” *Soft Computing* 29.5 (2025): 2433–2461.
- [15] P. Borisut and A. Nuchitprasittichai, “Adaptive Latin Hypercube Sampling for a surrogate-based optimization with artificial neural network,” *Processes*, 2023.
- [16] M. Ibrahim, S. A. Al-Sobhi, R. Mukherjee, and A. AlNouss, “Impact of sampling technique on the performance of surrogate models generated with artificial neural network (ANN),” *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019.
- [17] F. Viana, “A tutorial on Latin hypercube design of experiments,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 32, pp. 1975–1985, 2016.
- [18] C. Bogoclu, D. Roos, and T. Nestorović, “Local Latin hypercube refinement for multi-objective design uncertainty optimization,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 112, p. 107807, 2021.
- [19] K. Eggensperger, M. Lindauer, H. Hoos, F. Hutter, and K. Leyton-Brown, “Efficient benchmarking of algorithm configurators via model-based surrogates,” *Machine Learning*, vol. 107, pp. 15–41, 2017.
- [20] J. I. C. F. Neto and A. Britto, “Surrogate methods applied to hyperparameter optimization problem,” *Anais do XIX Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional (ENIAC 2022)*, 2022.
- [21] A. S. Khazi, S. P. Arango, and J. Grabocka, “Deep ranking ensembles for hyperparameter optimization,” *arXiv preprint arXiv:2303.15212*, 2023.
- [22] P. Tsirikoglou et al., “A hyperparameters selection technique for support vector regression models,” *Applied Soft Computing*, vol. 61, pp. 139–148, 2017.
- [23] M. Wistuba, N. Schilling, and L. Schmidt-Thieme, “Scalable Gaussian process-based transfer surrogates for hyperparameter optimization,” *Machine Learning*, vol. 107, pp. 43–78, 2017.
- [24] K. Eggensperger et al., “Surrogate benchmarks for hyperparameter optimization,” *Proceedings of the Workshop on Bayesian Optimization*, pp. 24–31, 2014.
- [25] Yang, Wendong, Shengzhuo Liu, and Jianyi Yang. “An optimized surrogate model and algorithm with rapid multi-parameter processing capability for antenna design.” *Measurement* 241 (2025): 115719.

- [26] S. Koziel and L. Leifsson, "Surrogate-assisted design optimization using response features," in *Simulation-Driven Modeling and Optimization*, Springer, pp. 147–163, 2016.
- [27] W. Ding, F. Meng, Y.-B. Tian, and H. Yuan, "Antenna optimization based on auto-context broad learning system," *Int. J. Antennas and Propagation*, 2022.
- [28] S. Koziel, L. Leifsson, and S. Ogurtsov, *Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering*, Springer, 2013.
- [29] S. Koziel, N. Çalık, P. Mahouti, and M. A. Belen, "Accurate Modeling of Antenna Structures by Means of Domain Confinement and Pyramidal Deep Neural Networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 3, pp. 2174–2188, 2022.
- [30] Güneş, Filiz, Salih Demirel, and Peyman Mahouti. "Design of a front-end amplifier for the maximum power delivery and required noise by HBMO with support vector microstrip model." *Radioengineering* 23, no. 1 (2014): 134-143.
- [31] Güneş, F., Demirel, S., & Mahouti, P. (2016). A simple and efficient honey bee mating optimization approach to performance characterization of a microwave transistor for the maximum power delivery and required noise. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 29(1), 4-20.
- [32] B. Dokmetas, S. S. Shinde, and M. A. Belen, "Artificial Intelligence Based Deep Learning Surrogate Model for Design Optimization of Microstrip Frequency Selective Surface," *2024 Int. Conf. Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, pp. 1–4, 2024.
- [33] A. Çalışkan and F. Güneş, "3D EM Data-Driven Artificial Network-Based Design Optimization of Circular Reflectarray Antenna with Semi-Elliptic Rings for X-Band Applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 64, pp. 537–543, 2022.
- [34] T. Zeng, H. Wang, W. Wang, T. Ye, and L. Zhang, "Surrogate-Assisted Artificial Bee Colony Algorithm," in *Advances in Nature-Inspired Computing and Applications*, pp. 262–271, 2021.
- [35] M. Sebai, E. Fatnassi, and L. Rejeb, "A Honeybee Mating Optimization Algorithm for Solving the Static Bike Rebalancing Problem," *Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, 2019.

