



İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**YAPAY ZEKÂ KULLANILARAK
X BAND UYGULAMALARI
İÇİN YANSITICI DİZİ
ANTEN TASARIMI**

Mehmet BEREKET

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2024





**YAPAY ZEKÂ KULLANILARAK X BAND UYGULAMALARI İÇİN
YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI**

Mehmet BEREKET

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

Mehmet BEREKET tarafından hazırlanan “YAPAY ZEKÂ KULLANILARAK X BAND UYGULAMALARI İÇİN YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Peyman MAHOUTİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 29/01/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Mehmet BEREKET

/ /2024

YAPAY ZEKÂ KULLANILARAK X BANDI UYGULAMALARI İÇİN
YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet BEREKET

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bu tez, yapay zekâ (YZ) ve vekil modelleme yeteneklerini kullanarak, özellikle X-bandı uygulamaları için yansıtıcı dizi antenlerinin tasarımında yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Yansıtıcı dizi antenleri, elektromanyetik dalgaların faz kaymasını ayarlamak suretiyle etkileyebilme kapasiteleri sayesinde, özellikle uydu ve radar uygulamaları gibi çağdaş iletişim sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Ancak, bu antenlerin tasarımında, çok sayıda fiziksel parametrenin karmaşık etkileşimi, yüksek doğrulukta benzetim ve optimizasyon için gereken yüksek bilgisayar kaynakları gibi nedenlerle birtakım kısıtlarla karşılaşmaktadır. Yansıtıcı dizi antenlerinin tasarımındaki karmaşıklık, yansıtılan dalgaların fazını doğru bir şekilde etkileme gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Bu etki, istenilen yayılım desenlerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Geleneksel tasarım ve optimizasyon yaklaşımları genellikle yoğun emek ve önemli hesaplama kaynakları gerektirir. Bunun ana nedeni optimizasyon sürecinin yinelemeli doğası ve tasarım alanındaki değişken sayısının fazlalığıdır.

Bu tez, YZ destekli vekil modelleri yenilikçi bir yaklaşım olarak sunarak belirtilen zorluklarla başa çıkmayı amaçlamaktadır. YZ vekil modellerinin belirli durumlarda kullanımı birçok önemli avantaj sağlar. İlk olarak, bu modeller yansıtıcı dizi antenlerinin davranışına benzeyerek hesaplama yükünü büyük ölçüde azaltır. Böylece, daha hızlı ve daha verimli tasarım döngüleri sağlar. Ayrıca, YZ modelleri, tasarım öğeleri ve anten performansı arasındaki karmaşık bağlantıları daha net bir şekilde çözümlenmeyi sağlar. Böylece, en verimli yapılandırmanın belirlenmesini kolaylaştırır. YZ'nin bu alanda uygulanması, dinamik işletim ortamlarında kritik olan anten özelliklerinin gerçek zamanlı ayarlanmasına olanak tanır.

Özet olarak, bu tez çalışmasında, X bandı uygulamaları için yansıtıcı dizi antenlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesinde YZ vekil modellerinin pratikliği ve verimliliği sergilenmektedir.

Anahtar Kelimeler : Yansıtıcı dizi, mikroşerit, yapay zekâ, x bandı, vekil model, anten

Sayfa Adedi : 52

Danışman : Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN

REFLECTARRAY ANTENNA DESIGN FOR X BAND APPLICATIONS
USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

(Master's Thesis)

Mehmet BEREKET

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2024

ABSTRACT

This thesis introduces an innovative method for designing reflectarray antennas specifically for X-band applications, utilizing the capabilities of artificial intelligence (AI) and surrogate modeling. Reflectarray antennas are crucial in contemporary communication systems, especially in satellite and radar applications, due to their capacity to influence electromagnetic waves by adjusting phase shifts. However, their design presents substantial hurdles due to the complex interaction of multiple physical parameters and the high computer resources required for precise simulation and optimization.

The intricacy in the design of reflectarray antennas stems from the requirement to accurately manipulate the phase of the reflected waves, which is crucial for attaining the required emission patterns. Conventional approaches to design and optimization are frequently laborious and require significant computational resources, mainly because of the iterative nature of the optimization process and the large number of variables in the design space. This thesis tackles these difficulties by providing AI-powered surrogate models as an innovative approach.

The utilization of AI surrogate models in this particular situation has numerous innovative benefits. Firstly, these models greatly decrease the computational burden by approximating the behavior of reflectarray antennas, hence facilitating quicker and more efficient design cycles. Furthermore, AI models offer a clearer comprehension of the complex connections between design elements and antenna performance, making it easier to identify the most efficient configurations. The implementation of AI in this field allows for the real-time adjustment of antenna properties, which is crucial in dynamic operating settings.

To summarize, this thesis showcases the practicality and efficiency of AI surrogate models in the development and enhancement of reflectarray antennas for X-band applications.

Key Words : Reflectarray, microstript, artificial intelligence, x-band, surrogate model, antenna

Page Number : 52

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mehmet Ali BELEN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana inanan, güvenen, yardımını ve desteğini esirgemeyen kıymetli danışmanım sayın Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN'e, seminer ve tez önerisi süreçlerinde değerli görüş ve tavsiyeleri ile katkı sunan Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT'a, yüksek lisans eğitimi konusunda beni teşvik eden ve yönlendiren Prof. Dr. Yakup HAMEŐ'e, tez savunma jürimde yer alarak değerli görüşlerini paylaşma inceliğı gösteren saygıdeğer hocalarım Sn. Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL ve Doç. Dr. Peyman MAHOUTI'ye, ilk kayıt işleminden mezuniyete kadar her aşamada gerekli yönlendirmeleri yapıp desteğini eksik etmeyen İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ ile enstitü çalışanlarına ve son olarak beni her alanda olduğu gibi bu alanda da teşvik edip destekleyen kıymetli eşim Yeşim BEREKET ile kızlarım Ayşe ve Zeynep'e;
Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. YANSITICI DİZİ ANTENLER.....	9
2.1. Uygun Yansıma Fazı (Faz Gecikmesi) Elde Etme Yöntemleri	10
2.2. Yansıtıcı Dizi Çeşitleri	12
2.2.1. Dielektrik yansıtıcı dizi.....	12
2.2.2. Tamamen metal yansıtıcı dizi.....	13
2.2.3. Dalga kılavuzu yansıtıcı dizi	13
2.2.4. Mikroşerit yansıtıcı dizi	13
2.3. Yansıtıcı Dizinin Band Genişliğinin Arttırılması	13
3. ANTEN MODELLEME.....	17
3.1. Modelleme.....	17
3.2. Elektromanyetik Benzetim.....	18
3.3. Optimizasyon	19
4. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	22
4.1. YSA Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	25

4.2. YSA Sistemlerinin Temel Öğeleri ve Temel Ağ Yapıları	26
5. YAPAY ZEKÂ TABANLI YANSITICI DİZİ UYGULAMALARI.....	28
5.1. Mikroşerit Yansıtıcı Dizi Anten Birim Hücre Tasarımı.....	29
5.1.1. Birim hücrenin tasarımı	29
5.1.2. YDA birim hücresinin YSA aracılığı ile modellenmesi	30
5.2. Dielektrik Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı	33
5.2.1. Yansıtıcı dizi tasarımı ve veri setlerinin oluşturulması.....	36
5.2.2. Tasarımın optimizasyonu.....	40
5.2.3. Deneysel sonuçlar.....	41
5.2.4. Sonuç.....	45
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	47
DİZİN	50

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Birim hücre parametrelerinin aralığı.....	30
Çizelge 5.2. ÇKA tasarım parametreleri.....	31
Çizelge 5.3. 5 Nöronlu tek katlı YSA modelinin performans sonucu.....	31
Çizelge 5.4. 5-10 Nöronlu YSA modelinin performans sonucu	32
Çizelge 5.5. 5-10-15 Nöronlu YSA modelinin performans sonucu.....	32
Çizelge 5.6. Birim hücre performans karşılaştırma tablosu	33
Çizelge 5.7. 9 GHz için faz ihtiyaç tablosu.....	35
Çizelge 5.8. 14 GHz için faz ihtiyaç tablosu	36
Çizelge 5.9. Tasarım değişkenleri ve bunların sınır değerleri	39
Çizelge 5.10. 10 farklı çalıştırma için vekil modeller ve performansları.....	40
Çizelge 5.11. Sunulan antenin karşılaştırmalı performansı.....	45

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. YDA birim elemanının kara kutu modeli	31
Şekil 5.2. Örnek tasarımlar için tahminleme sonuç kıyaslaması	32
Şekil 5.3. Veriye dayalı vekil modelleme yaklaşımının akış şeması.....	34
Şekil 5.4. Birim hücrenin yansıma fazı parametrik analizi.....	39
Şekil 5.5. YD'nin ölçülen performans sonuçları	43



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Yansıtıcı dizi antende yol uzunluk farkı.....	3
Resim 1.2. Cam katman üzerine bakır birim hücre	4
Resim 1.3. Dielektrik tabanlı birim hücre.....	4
Resim 1.4. Dikdörtgen yamalara eklenti yapılan mikroşerit yansıtıcı dizi.....	5
Resim 1.5. Yapılandırılabilir yansıtıcı dizi birim elemanı.....	6
Resim 1.6. Döner kutuplamalı birim eleman yapısı	6
Resim 1.7. Çok katmanlı tekdüze olmayan yansıtıcı dizi.....	6
Resim 1.8. Esnek silindirik dielektrik üzerine esnek mikroşerit yamalı anten.....	7
Resim 1.9. Çift kare halka şekilli birim hücre	7
Resim 2.1. Yansıtıcı dizi anten yapısı.....	9
Resim 2.2. Eş faz yüzeyi elde etme yöntemleri	11
Resim 2.3. Bazı birim hücre yapıları ve bu yapılara ait faz değişim grafikleri	11
Resim 2.4. Yansıtıcı dizi çeşitleri	12
Resim 2.5. Geniş band birim hücreler	15
Resim 4.1. Yapay sinir ağ mimarisi.....	23
Resim 4.2. YSA'da her bir elemanın ağırlığı ve giriş/çıkış.....	23
Resim 4.3. İleri beslemeli YSA mimarisi.....	24
Resim 4.4. Geri beslemeli YSA mimarisi	25
Resim 5.1. Malta Çarmıhı birim hücrelerinin 3 boyutlu görünümü	29
Resim 5.2. Birim hücrenin farklı parametrik değerlerdeki görünümü.....	30
Resim 5.3. Çarmıh şekilli 3B basılı birim hücrenin şematik ve 3B görünümü, farklı tasarım değerleri için birim hücrenin çeşitli formları, yansıtıcı dizi yerleşimi, yansıtıcı dizi anten	38
Resim 5.4. Benzetim ışınma örüntüleri.....	39

Resim 5.5. Basılmış 20x20 dizi ve kesiti ve YD'nin boynuz anten ile beslenmesi	44
Resim 5.6. 3B basımda kullanılan yazıcı.....	44



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dB	Desibel
dB_i	İzotropik Desibel
ε_r	Dielektrik Sabiti
GHz	Gigahertz
<i>k</i>	Boşluktaki Dalga Sayısı
mm	Milimetre
P_{Req<i>i,j</i>}	İstenen Yansıma Fazı

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	3 Boyutlu
AA	Alternatif Akım
BTO	Benzetim Tabanlı Optimizasyon
ÇKA	Çok Katmanlı Algılayıcı
DVM	Destek Vektör Makinası
EM	Elektromanyetik
FDFD	Sonlu Farklar Frekans Uzayı
FDTD	Sonlu Farklar Zaman Uzayı
GP	Genetik Programlama
GS	Gauss Süreci
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
MÇKA	Modifiyeli Çok Katmanlı Algılayıcı
MEİ	Mükemmel Elektrik İletken
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
MMİ	Mükemmel Manyetik İletken
MÖ	Makine Öğrenmesi

MYDA	Mikroşerit Yansıtıcı Dizi Anten
OMH	Ortalama Mutlak Hata
PLA	Polilaktik Asit
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
SR	Sembolik Regresyon
TÖ	Topluluk Öğrenmesi
YD	Yansıtıcı Dizi
YDA	Yansıtıcı Dizi Anten
YSA	Yapay Sinir Ağı
YZ	Yapay Zekâ



1. GİRİŞ

Anten, verici veya alıcı sistemin elektromanyetik dalgaları yaymak veya almak üzere tasarlanmış kısmı olarak tanımlanır. Boşluktaki elektromanyetik dalgaları toplayarak bu dalgaların iletim hatları içerisinde yayılmasını sağlayan antene "alıcı anten", iletim hatlarından gelen sinyalleri boşluğa dalga olarak yayan antene ise "verici anten" denir [1]. Alıcı ve verici anten, karşılıklılık ilkesine göre aynı özelliklere sahiptir ve iki biçimde de kullanılabilir. Kullanım amaçlarına göre çok sayıda anten çeşidi bulunmaktadır ve bunlar birbirinden farklı karakteristik özelliklere sahiptir.

Uzak mesafe veri haberleşmesinin kablolar ile sağlanması zor ve pahalıdır. Kurulum maliyetinin yüksek olmasının yanı sıra bakımı da hem zor hem de maliyetlidir. Bu nedenle, kablosuz veri iletişimi her geçen gün daha da yaygınlaşmakta ve buna bağlı olarak da kablosuz haberleşmenin en temel yapı taşı olan antenlerin önemi de günden güne artmaktadır [2]. Haberleşme teknolojisinde antenlerin artan önemine paralel olarak yüksek performans, küçük boyut, daha geniş band ve düşük maliyet gibi talepler de artarak devam etmektedir.

Anten dizileri, modern iletişim sistemlerinde önemli bir gelişme süreci içerisinde olup bireysel anten yapılandırmalarına göre önemli iyileştirmeler sunmaktadır [2]. Temel olarak anten dizileri, birlikte çalışmak üzere bir düzen içerisinde bir araya getirilmiş birden fazla bireysel antenden oluşur. Bu birliktelik, tek bir antenle elde edilemeyen gelişmiş performans özelliklerini elde etmeyi sağlar. Anten dizisi tasarımının temel ilkesi, istenen ışınım özellikleri ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, bireysel anten elemanlarının stratejik olarak belirlenmiş bir geometride yerleştirilmesi üzerinedir. Bu geometri doğrusal, düzlemsel veya dairesel tasarımlar şeklinde olabilir. Antenin her bir birim elemanındaki sinyalin fazı ve genliği kontrol edilerek, anten dizilerinin çeşitli işletim taleplerine dinamik olarak cevap vermesi sağlanabilir. Antenlerin bir dizi olarak kullanılması, bireysel bir antene göre birçok avantaj sağlar. İlk olarak, anten dizileri, belirli yönlerde enerjiyi odaklama yeteneği olan kazançta önemli bir iyileşme sağlar. Daha yüksek kazanç ise daha iyi yönlendirme ve daha verimli güç kullanımına yol açar. İkincisi, anten dizileri, çeşitlilik yoluyla sistemin güvenilirliğini artırır. Dizinin bir elemanının arızalanması durumunda, dizinin diğer elemanları bu durumu telafi edebilir. Böylece sistemin tek nokta arızalarına karşı savunma yeteneği artmış olur. Ayrıca diziler, gürültülü ortamlarda iletişim kalitesini sürdürmek için kritik olan sinyal-gürültü oranını (SNR) artırır. Anten dizilerinin en önemli yeteneklerinden biri de hüzmeye oluşturmaktır. Hüzmeye oluşturma, anten dizisinde yer alan her

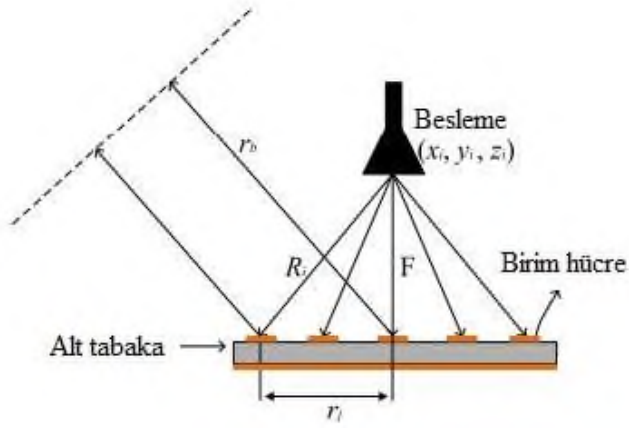
bir elemandaki sinyalin fazını ve genliğini etkileyerek yönlendirilebilir bir ışıma modeli oluşturma tekniğidir. Bu yetenek, istenen yöne doğru hüzmelerin dinamik olarak yönlendirilmesini sağlar. Bu yönlendirme, anteni fiziksel olarak hareket ettirmeksizin elde edilir. Hüzme oluşturma, kullanıcı yoğunluğu bulunan ortamlarda performansı artırmanın yanında radar, kablosuz iletişim ve uydu sistemleri gibi uygulamalarda kritik olan mekânsal seçiciliği sağlamada etkilidir. Anten dizileri, hüzme oluşturma yanısıra, hüzme tarama, çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) işlemleri ve mekânsal seçicilik gibi ileri fonksiyonları kolaylaştırır.

Sonuç olarak anten dizileri, modern iletişim ve radar sistemlerinin gelişiminde bir köşe taşıdır. Çoklu anten elemanlarını bir dizi formunda kullanmanın doğal avantajlarıyla birleşen yapılandırılabilir doğaları, çeşitli uygulamalarda yüksek performans, güvenilirlik ve çok yönlülük elde etmede anten dizilerini önemli bir seçenek haline getirir. Anten dizisi teknolojisindeki gelişimin sürekliliği ve bu alanda yapılan çalışmalar, daha fazla yeteneklerin önünü açmaya devam edecek ve kablosuz iletişimin geleceğinde dizi antenlerin rolünü daha da pekiştirecektir.

Anten dizilerini birçok açıdan sınıflandırmak mümkün olmakla birlikte yaygın olarak geometrik şekillerine göre sınıflandırılırlar. Dizi antenler doğrusal, dairesel, düzlemsel veya örneğin bir uçağın kanat yüzeyinde yer alacak şekilde yüzey uyumlu olarak üretilebilirler.

Yansıtıcı dizi antenler (YDA), temel olarak gelen dalgayı istenilen noktaya doğru yönlendirme prensibine dayanılarak tasarlanırlar. Antenin yüzeyi, antene göre tam merkezde veya farklı bir noktada konumlandırılmış bir kaynak ile beslenir. Yansıtıcı dizi antenlerde besleme hatlarından kaynaklı kayıplar oluşmaz. Bu anten yapıları çoğunlukla iki boyutludurlar. Dolayısıyla yapıları basit ve buna bağlı olarak da imalatları kolaydır. Parabolik yansıtıcı metal antenlerde, odaklama işlemi için metal yansıtıcının oval olarak tasarlanması ve odaklanma mesafesinin kürenin merkezine göre sabit olması gerekir. Yansıtıcı dizi antenler ise iki boyutlu bir yapıya sahiptirler ve kaynağa göre istenilen ışıma noktası kolaylıkla ayarlanabilir.

Parabolik yansıtıcı antenlerin yapısı gereği kaynak ile yüzey arasındaki yollar eşit uzunlukta olduğundan eş faz yüzeyi elde edilir. Ancak, YDA'larda kaynak ile yüzey arasındaki yollar eşit uzunlukta olmadığından eş faz yüzeyi sağlanamaz (Resim 1.1) [3].



Resim 1.1. Yansıtıcı dizi antende yol uzunluk farkı [3]

Eşit uzunlukta yollar elde etmek için uygun bir düzeltme işlemi yapılmalıdır. Düzeltme işlemi faz kaydırma ile sağlanabilir. Faz kaydırma için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en bilineni ise mikroşerit yapıların kullanımudur. Yamaların geometrik parametrelerinin değişimi ile yüzeye gelen EM sinyallerin davranışı, dolayısı ile yansıma fazının değişimi sağlanmaktadır. Burada, her bir frekans değeri için 360° faz kaydırma işlemi temin edebilecek birim hücre modeli ve değişkenleri tercih edilmelidir. Bu nedenle, yansıtıcı dizinin performansını doğrudan etkileyecek olan birim hücrenin tasarımı oldukça önemlidir.

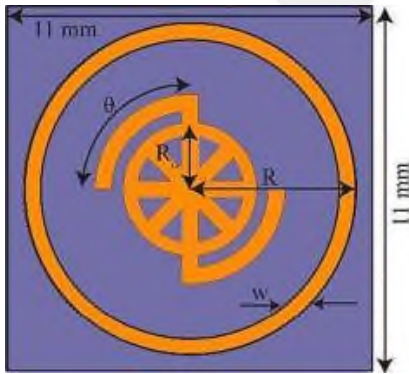
Yansıtıcı dizi antenlerle ilgili bilinen ilk çalışma Berry ve arkadaşlarınca yapılmıştır [4]. Yansıtıcı dizi anten (YDA) yaklaşımının önerildiği bu çalışmada boynuz antenlerden oluşan yansıtıcı dizi başka bir boynuz anten ile beslenmiştir. Yansıyan sinyalin faz değişikliği, dizide yer alan dalga kılavuzlarının sonları kısa devre edilerek sağlanmıştır. Bu YDA'nın temel avantajı karmaşık besleme ağına ihtiyaç duymamasıdır.

Ancak, dalga kılavuzları ile oluşturulan dizi hantal ve ağırdır. Bu olumsuzluk, yansıtıcı dizi birim elamanı olarak mikroşerit yamalar üzerine yoğunlaşılmasına neden olmuştur. Malagisi, 1978 yılında yansıtıcı dizi anten tasarımında mikroşerit yapıların kullanımını içeren ilk çalışmayı yapmıştır [5]. Bu çalışmada 61 elemanlı mikroşerit disk yansıtıcı dizinin deneysel sonuçları sunulmuştur.

1980'li yıllardan itibaren bu alanda yapılan çalışmalar yaygınlaşmaya başlamıştır. Kelkar, FLAPS adını verdiği düzlemsel yansıtıcı yüzey tekniği ile düşük maliyet, polarizasyon kontrolü ve esnek yüzeylere uyumluluk sağlayan çalışmasıyla herhangi bir geometrik yapıya bağlı kalmadan geniş kullanım alanı hedeflemiştir [6]. Metzler, eklentili mikroşerit yama

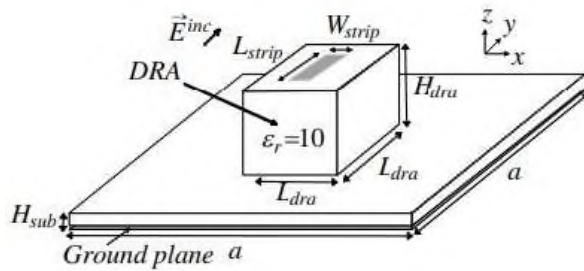
birim hücre kullanımı ile faz değişimi sağlamayı önermiştir. Mikroşerit yansıtıcı dizilerin tasarımı için teorik bir çerçeve sunmanın yanında yansıtıcı dizinin performansının tahmin edilmesine de olanak tanımıştır [7]. Teng ve arkadaşları tarafından C-band ve X-bandda (5.8 GHz ve 10 GHz) çalışan, çift band hüzme yönlendirebilen, yüksekliği ayarlanabilen ve yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı dizi tasarlanmıştır. Dizinin her bir elemanının yüksekliği değiştirilerek her iki frekansta 0-360° faz kayması elde edilmiştir. Dizinin maksimum kazancı 5.8 GHz’de 14.4 dBi ve 10 GHz’de 21 dBi olarak ölçülmüştür [8].

Bir başka çalışmada, bir nano uydunun dış yüzeyine doğrudan uygulanabilen geniş band bir yansıtıcı dizi tasarlanmıştır (Resim 1.2) [9]. Üretim, 2 mm kalınlığındaki düz cam üzerine bakır folyoların uygulanmasıyla yapılmıştır. Birim hücre olarak iç içe geçmiş eş merkezli halkalar kullanılarak faz gecikmeleri elde edilmiştir. X-bandında 576°'lik bir faz değişiminin yanı sıra 26,6 dBi'lık bir kazanç ölçülmüştür. Ayrıca, 1 dB kazanç bant genişliği %31,5 olarak elde edilmiştir.



Resim 1.2. Cam katman üzerine bakır birim hücre [9]

İletken rezonatör kayıplarını azaltmak amacıyla Jamaluddin ve arkadaşları tarafından dielektrik taban kullanılan anten tasarlanmıştır. 30 GHz için tasarlanan antende gerekli faz aralığı, dielektrik taban üzerindeki değişken çaplı hava delikleri ile sağlanmıştır (Resim 1.3) [10].

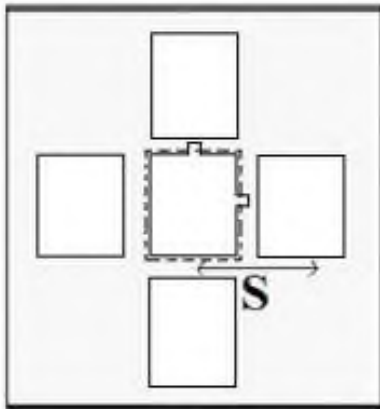


Resim 1.3. Dielektrik tabanlı birim hücre [10]

Başka bir çalışmada Kim ve arkadaşları, RF anahtar (PIN diyot) kullanarak kıyafet üzerine konumlandırılabilir hüzme yönlendirme yöntemi önerilmiştir. Ölçüm sonuçları yüksek yönlendiricilik ile birlikte maksimum hüzme yönlendirmenin kıyafet üzerine uyumlu olarak elde edildiğini göstermiş ve buna uygun bir anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Taban malzemesi olarak kumaş kullanılmıştır. Hedeflenen ışın yönlendirme özelliği için antende iki PIN adet diyot yer almıştır [11]. Bir başka çalışmada Ahmed ve arkadaşları çift band meta ekran faz düzeltici ile çift band yüksek kazanç anteni geliştirmiştir. Çift band meta ekran, çift frekanslı bantlarda gerekli faz kaymalarını bağımsız olarak kontrol etmek için 14x14 faz kaydırma hücrelerinden oluşmuştur. 11,9 Ghz'de 20,3 dBi ve 14,4 Ghz'de 18,8 dBi yönlülük elde edilmiştir [12].

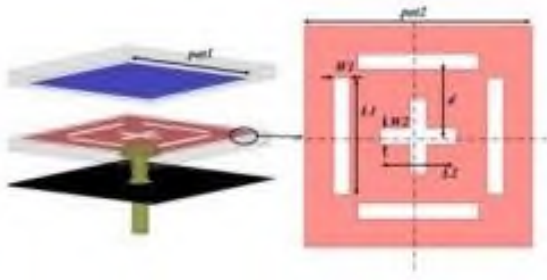
Nayeri ve arkadaşları, yüksek kazançlı hüzme taraması yapabilen yansıtıcı dizi üzerine çalışmıştır [13]. Tarama alanını genişletmek için çift odaklı açıklık faz dağılımı önerilmiştir. Hüzme tarama performansını artırmak için optimizasyon yapılmış ve Ka-band hüzme tarama yansıtıcı dizi anten için 60 derece tarama alanı ile 30 dB kazanç elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada dikdörtgen yama yansıtıcılara küçük eklentiler yapılarak anten kazancında önemli oranda artış sağlanmış ve çift polarizasyon yeteneği elde edilmiştir (Resim 1.4) [14].



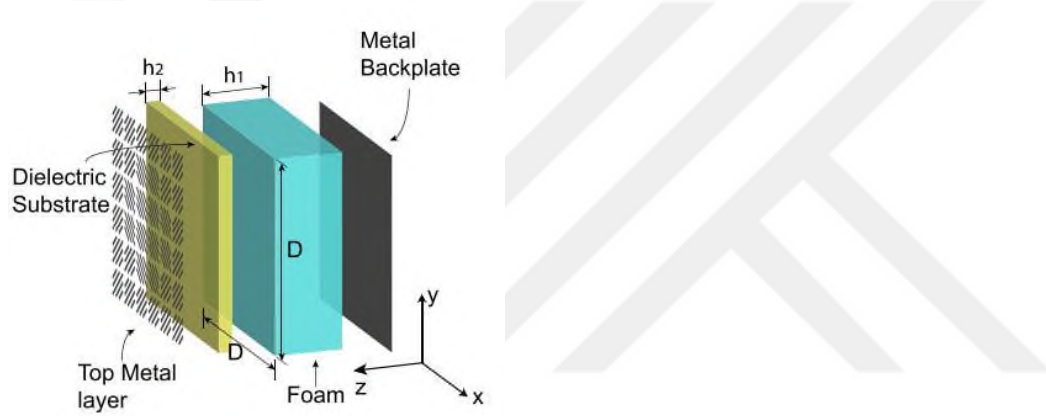
Resim 1.4. Dikdörtgen yamalara eklenti yapılan mikroşerit yansıtıcı dizi [14]

Başka bir çalışmada Yang ve arkadaşları tarafından C-band yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizi sunulmuştur [15]. Çalışmada, sabit bir üst yama ve yüksekliği ayarlanabilen yarıklı yama yer almaktadır (Resim 1.5). Bu birim eleman ile faz kayması aralığı 324°'ye kadar sağlanabilmiştir. 408 elmandan oluşan dizi üretilerek 20° hüzme taramasında 25.7 dB kazanç ölçülmüştür.



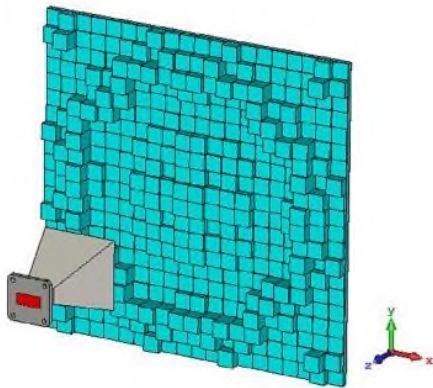
Resim 1.5. Yapılandırılabilir yansıtıcı dizi birim elemanı [15]

Luyen ve arkadaşları tarafından sunulan çalışmada önerilen yansıtıcı dizide (Resim 1.6), yansıyan dalganın kutuplamasını gelen dalgaya göre 90° döndüren geniş bantlı, döner kutuplamalı bir birim hücre yer alır [16]. Bu çalışmada 3 dB kazanç band genişliği yaklaşık olarak % 37.4 ve gerçekleşen maksimum kazanç 24.2 dBi olarak elde edilmiştir.



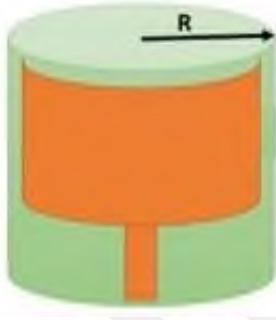
Resim 1.6. Döner kutuplamalı birim eleman yapısı [16]

Çok katmanlı algılayıcı sinir ağı tabanlı geliştirilen bir başka modelde [17] yansıma fazı, çok katmanlı tekdüze olmayan yansıtıcı dizi birim hücrenin geometrik tasarım parametreleri ve dielektrik katsayısının değişimi ile elde edilmiştir. Yansıtıcı dizi 3B yazıcı ile polilaktik asit (PLA) maddeden üretilmiştir (Resim 1.7). Toplam 300x300 mm olarak üretilen dizi ile 23.2 dBi düz kazanç elde edilmiştir.



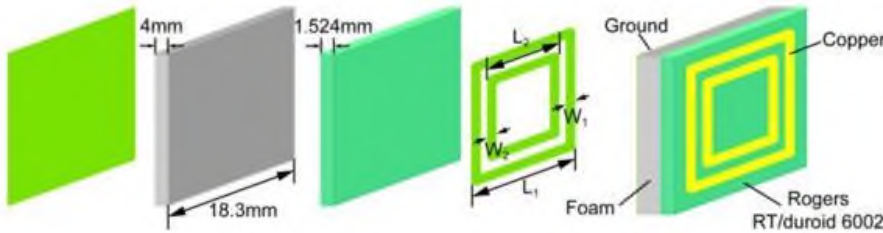
Resim 1.7. Çok katmanlı tekdüze olmayan yansıtıcı dizi [17]

Mikroşerit yamalı bir silindirik anten çalışması Mitra ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Çalışmada 3B yazıcı kullanılarak dielektrik katsayısı 2.6 olan esnek NinjaFlex malzemeden üretilen silindir üzerine yine esneyebilen mikroşerit yama konumlandırılmıştır (Resim 1.8). Ölçüm sonuçları esnek antenin 2.4 GHz rezonans frekansında çok iyi bir empedans uyumuna sahip olduğunu ve maksimum anten kazancının -2.78 dBi olduğunu göstermiştir [18].



Resim 1.8. Esnek silindirik dielektrik üzerine esnek mikroşerit yamalı anten [18]

16x12 çift kare halka şekilli birim hücre kullanılarak elde edilen X-band yansıtıcı dizi anten (Resim 1.9) [19]'de sunulmuştur. Kazanç ve ışınma deseni olarak iyi performans elde edilmiştir. 8-8.84 GHz için üretilmiş ve test edilmiştir. Tüm dizinin kazancı 8.2 GHz'de 23.9 dBi ve açıklık verimliliği % 40.7 olarak ölçülmüştür.



Resim 1.9. Çift kare halka şekilli birim hücre [19]

Anten dünyasında çok önemli bir yer edinen yansıtıcı dizi anten teknolojisinin tanıtımına ve bu konuda yapılan çalışmalara katkı sunmayı amaçlayan bu tez çalışmasında, geometrik parametrelere ve frekansa bağlı olarak X-band (8-12 GHz) yansıtıcı dizi antenin birim hücresinin yansıma açısının hızlı, doğru ve düşük maliyetli tasarımı ve optimizasyonu için hızlı ve doğru bir modelin yapay sinir ağı kullanılarak oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada iki farklı tasarım üzerinde çalışılmıştır. İlk tasarımda Malta Çarmıhı şekilli mikroşerit yama birim hücre modellenirken, ikinci tasarımda çarmıh şekilli 3B dielektrik birim hücre modellenmiştir.

Modelleme işleminde, 3B elektromanyetik benzetim yazılımı ile elde edilen yansıma fazı değerleri kullanılarak bir veri seti oluşturulmuş, bu veri seti ile yapay sinir ağı eğitilmiş ve bu YSA kullanılarak X-bandı içindeki birim hücreler, 3B benzetim araçları ile modellenmiştir. Bu modeller aracılığı ile değişkenlerin faz karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir. Hesaplanan faz ihtiyaç değeri YSA'ya giriş olarak verilip birim hücrenin gerekli faz ihtiyaını sağlayacak parametreleri elde edilmiştir. Böylece, istenen koordinatlar için gerekli faz ihtiyaç matrisi ve bunun karşılığındaki uygun parametre matrisi oluşturulmuştur.

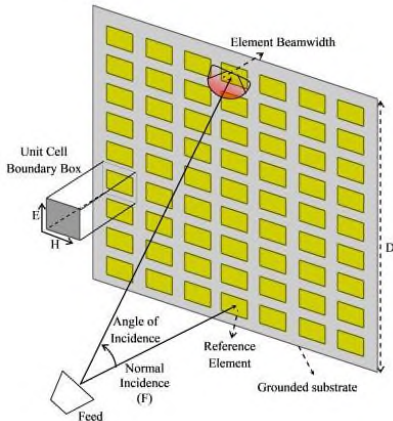


2. YANSITICI DİZİ ANTENLER

Yansıtıcı dizi antenler, besleme kaynağından gelen sinyalleri yansıtmak üzere düz bir yüzey üzerinde bir araya getirilmiş bir dizi yansıtıcı birim elemandan oluşur ve genellikle yüzeye belirli bir düzen içerisinde yerleştirilirler. Yansıyan sinyaller tıpkı parabolik yansıtıcıda olduğu gibi yönlendirilebilirler. Birim elemanların yapıları ve konumlanmaları, antenin çalışma frekansına, yönlendirme özelliklerine ve genel performansına göre tasarlanır.

Yansıtıcı dizi antenleri diğer antenlerden avantajlı kılan bazı özellikleri vardır. Yönlendirilebilirlik, yüksek kazanç, küçük boyutluluk, esneklik-özelleştirilebilirlik ve düşük maliyet avantaj sağlayan özellikler olarak sıralanabilir. Bu özellikler, yansıtıcı dizi antenlerin birçok endüstriyel, askeri ve iletişim alanında tercih edilmesini sağlar. Ancak, diğer birçok anten türünde olduğu gibi yansıtıcı dizi antenlerin de belirli frekans aralıklarında performans dalgalanmaları veya yapılarının karmaşık olması gibi bazı olumsuz yönleri de bulunabilmektedir. Bununla birlikte, genellikle sağladıkları yönlendirme kabiliyeti, geniş band özellikleri ve yüksek kazanç gibi avantajlar, bu antenleri birçok uygulama için tercih edilebilir kılar.

Yansıtıcı dizi antenlerin düzlemsel ve hafif yüzeyleri de avantaj sağlar. Bunun yanında yansıtıcı diziler, herhangi bir güç bölücü veya faz kaydırıcıya ihtiyaç duymadan faz dizisi antenlerde olduğu gibi hüzmeye taraması da yapabilir. Bu antenler özellikle hüzmeye tarama uygulamalarında fiyat etkililerdir. Parabolik antenler, hantal ve kavisli yapıları nedeniyle yüksek frekanslı uygulamalar için pek uygun değildirler. Yansıtıcı dizilerse, mikrodalgadan terahertz frekansa kadar tasarlanabilirler. Bu nedenle, yüksek kazanç ve yüksek band genişliği sağlayabilirler [2]. Resim 2.1’de dikdörtgen şekilli yamalardan oluşan bir yansıtıcı dizi antenin temel yapısı görülmektedir [20].



Resim 2.1. Yansıtıcı dizi anten yapısı [20]

Yansıma kaybı, yansıma fazı ve hüzme genişliği yansıtıcı dizi birim hücrelerinin temel karakteristikleridir. Düşük yansıma kaybı ve geniş yansıma fazı geniş band bir yansıtıcı dizi için önemlidir. Fiziksel boyut, yansıtıcı dizinin kazanç performansını doğrudan etkiler. Fiziksel boyutun belirlenmesinde ise birim hücre hüzme genişliği etkindir. Yansıtıcı dizinin köşesinde bulunan bir birim hücrenin, uzak mesafeden gelen bir sinyali alabilmesi için hüzme genişliğinin yüksek olması gerekir. Yansıtıcı dizi birim hücrelerinin yansıma fazı, yüzeyin normalinde bulunan birim hücrenin yansıma fazından farklıdır. Bu nedenle, yansıtıcı dizinin her birim hücresi, istenen doğrultuda yüksek kazanç sağlamak için, uygun yansıma fazı elde edecek şekilde tasarlanmalıdır.

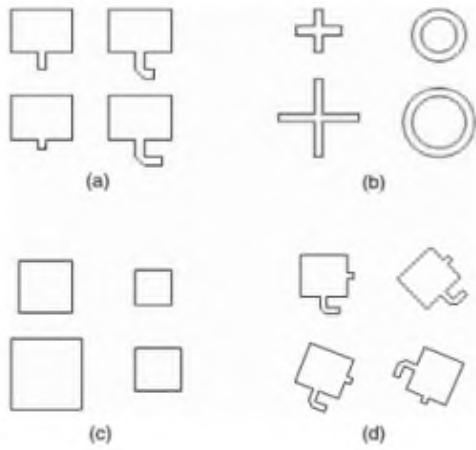
2.1. Uygun Yansıma Fazı (Faz Gecikmesi) Elde Etme Yöntemleri

Faz gecikmesi, anten dizisinin farklı konumlarında bulunan birbirinden farklı birim hücrelerin yansımasının birbirinden farklı olmasını sağlar. Böylece, istenen yönde bir faz hedefine ulaşılması sağlanır.

Yansıtıcı dizilerde uygun yansıma fazı elde etmek için kullanılacak birçok yöntem bulunmaktadır. Yansıtıcı dizideki her bir elemanın fiziksel boyutu veya geometrisi, elemanın ışınmasını etkiler. Bu geometrik özellikler değiştirilerek elemanların faz gecikmesi kontrol edilebilir. Elemanların konumları ve düzeni de yansıtıcı yüzey üzerindeki her bir elemanın ışınmasında etkilidir. Elemanların düzeni değiştirilerek faz ayarlaması yapılabilir. Anten elemanlarının üzerine yerleştirilen özel yamalar faz değiştirme özelliğine sahiptir. Bu yamalarla da elemanların faz gecikmesi kontrol edilebilir. Frekans seçici yansıtıcı diziler ve optik teknikler de yansıtıcı dizinin faz kontrolünde kullanılan yöntemlerdendir.

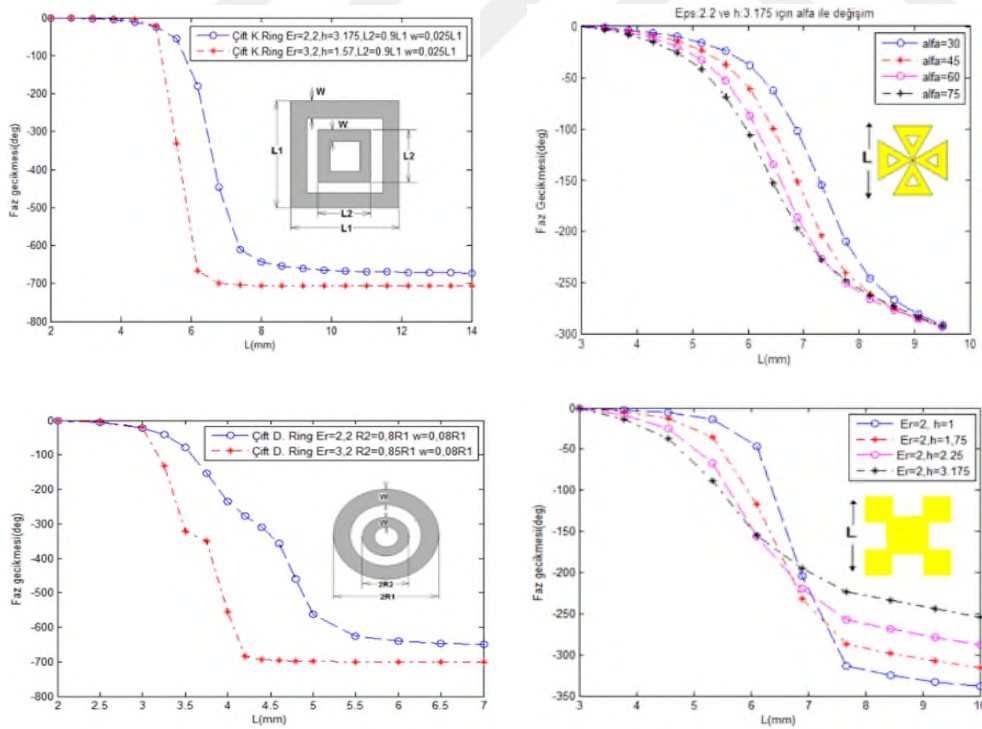
Bu yöntemler, yansıtıcı dizilerin faz gecikmesini kontrol etmek için kullanılan çeşitli stratejilerdir. Faz gecikmesi kontrolü, antenin yönlendirilebilirliği ve ışınma karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tasarım ve optimizasyon sürecinde, genellikle elektromanyetik benzetim ve optimizasyon araçları kullanılarak bu parametrelerin optimize edilmesi sağlanır.

Resim 2.2’de eş faz yüzeyi elde etmede kullanılan bazı yöntem örnekleri görülmektedir [21]. Mikroşerit yamalara değişken uzunlukta faz geciktirici hatlar eklenerek besleme antenine farklı uzaklıklarda bulunan elemanların faz değerleri dengelenir. Yama, halka ya da dipol gibi farklı geometriler ile faz değişimi elde edilebilir. Birim elemanların boyutları değiştirilerek faz değerleri dengelenebilir. Birim hücreler kendi ekseninde farklı açılarda döndürülerek de faz değişimleri elde edilebilir.



Resim 2.2. Eş faz yüzeyi elde etme yöntemleri [21]

Birim hücre yapısının seçilmesi ve faz karakteristiğinin çıkartılması yansıtıcı dizi anten tasarımında kritik önem taşımaktadır. Farklı geometriler farklı faz geciktirme karakteristiğine sahiptir. Tasarımda kullanılacak birim hücrenin belirlenebilmesi için her bir birim hücrenin analiz edilmesi gerekir. Resim 2.3’de bazı birim hücre yapıları ve bu yapılara ait faz değişim grafikleri yer almaktadır.



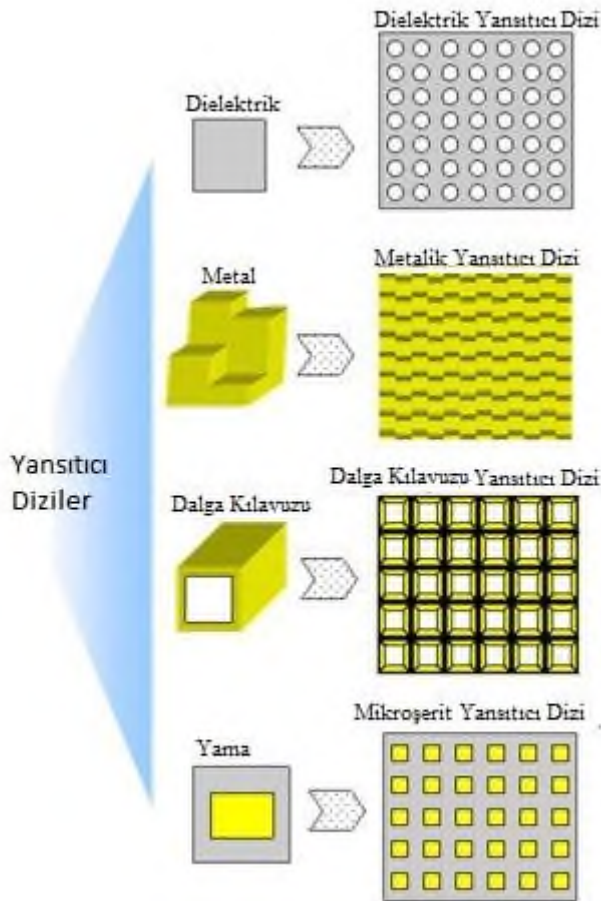
Resim 2.3. Bazı birim hücre yapıları ve bu yapılara ait faz değişim grafikleri [22]

Kaynaktan gelen sinyal ile birim hücrenin oluşturduğu açı, kaynak ile anten arasındaki mesafeye bağlıdır. Mesafenin uzun olması, köşedeki hücrelerin de etkin olmasını sağlar. Ancak, bu durum yüksek yayılma kayıplarına neden olur. Kaynağın antenle arasındaki

normal mesafe f/D oranı ile belirlenir. Burada “D” yansıtıcı dizinin uzun kenarının uzunluğudur. Aynı anten için daha yüksek f/D oranı birim elemanların daha az faz gecikmesine ihtiyacı olmasını sağlar. f/D oranı sabit tutularak anten boyutlarında küçültme yapılması da köşe noktalar ile merkez nokta arasındaki faz farkını azaltır. Faz ihtiyacının yüksek olması MYD antenin dar bantlı olması sonucunu doğurmaktadır [22].

2.2. Yansıtıcı Dizi Çeşitleri

Yansıtıcı dizinin performansı birim hücrenin şekline ve materyaline de bağlıdır. Birim hücre karakteristikleri ve geliştirilen materyal, antenin cevabını doğrudan etkiler. Çeşitli senaryolara bağlı olarak yaygın olarak geliştirilebilecek dört çeşit yansıtıcı dizi vardır. Resim 2.4’te yansıtıcı dizi çeşitleri yer almaktadır.



Resim 2.4. Yansıtıcı dizi çeşitleri [20]

2.2.1. Dielektrik yansıtıcı dizi

Bu yansıtıcı dizide yansıtma işlemi tamamen dielektrik katman ile sağlanır. Rezonans amacıyla herhangi bir iletken yapıya ihtiyaç duyulmaz. En genel kullanımı Dielektrik

Rezonatör Anten (DRA) yansıtıcı dizisidir [20]. Çeşitli büyüklükte hava boşluğu içeren dielektrik katman gibi uygulamaları da bulunmaktadır. Bu anten yapısının temel amacı iletken yapıdan kaynaklanan kayıpları minimize ederek band genişliğini arttırmaktır [23]. Yine de bu anten tipinde zeminde iletken bir katman kullanılmaktadır.

Dielektrik yansıtıcı dizi antenler çeşitli şekil ve boyutlarda olabilirler. Genel olarak, bir dizi dielektrik malzemeden yapılmış elemanların belirli bir düzen içinde yerleştirilmesinden oluşurlar. Bu düzen, elemanların boyutları, konumları ve şekilleri, antenin tasarım hedefleri ve kullanılacağı frekans aralığı doğrultusunda şekillenir.

2.2.2. Tamamen metal yansıtıcı dizi

Metalik yansıtıcı dizilerde sadece metal malzeme kullanılır (Resim 2.4). Bundan dolayı herhangi bir dielektrik kaybı olmaz. Milimetrik dalga uygulamalarında çok az kayıp içermelerine karşın daha düşük frekanslarda hantaldırlar [24].

2.2.3. Dalga kılavuzu yansıtıcı dizi

Bir çeşit tamamen metal yansıtıcı dizidir. Dizinin yansıma amaçlı birim elemanları dalga kılavuzlarıdır (Resim 2.4). Gerekli yansıma açısını sağlamak amacıyla değişken derinlikteki dalga kılavuzları kullanılır.

2.2.4. Mikroşerit yansıtıcı dizi

Yansıtıcı dizinin en genel ve en yaygın kullanılan türüdür. Dielektrik alt katman üzerine mikroşerit yamalar dizisi konumlandırılarak elde edilir (Resim 2.4). Dielektrik ve iletkeni bir arada barındıran yapısından dolayı tasarımda çeşitlilik sağlar, dielektrik ve yansıtıcı dizilerin avantajlarını birleştirir. Diğer yapılara göre en belirgin avantajı elektronik hüzmeye yönlendirme yeteneğidir.

Farklı performans parametreleri için farklı davranışları olmakla birlikte, her bir yansıtıcı dizi türünün avantajlı ve dezavantajlı yönleri vardır.

2.3. Yansıtıcı Dizinin Band Genişliğinin Arttırılması

Yakın gelecekteki teknolojiler, çok sayıda kullanıcının yüksek tanımlı verisini eş zamanlı olarak iletmek için çok geniş bir frekans bandına ihtiyaç duyacaktır. Yansıtıcı dizilerse band genişliklerinin düşük olmasıyla bilinir. Dielektrik malzeme ile birlikte yama elemanı olarak kullanılan iletken malzemeler yüksek kayıp oranının başlıca sebebidir. Yüksek kayıp

oranının yanı sıra, diferansiyel uzaysal faz gecikmeleri ve yansıtıcı dizinin rezonans davranışı da dar band performansının nedenlerindedir. Yansıtıcı dizinin düzlemsel yapısından kaynaklı olarak, kaynak ile birim hücre arasındaki yolun uzunluğu dizinin merkezinden kenarlara doğru farklılık gösterir. Bu durum aynı frekanslı sinyaller için istenmeyen yansımalara neden olur ve yansıtıcı dizinin band genişliğini sınırlar. Yansıtıcı dizi bu sorunu çözmek amacıyla uygun faz dağılımı ve minimum faz hatası yapılacak şekilde tasarlanmalıdır.

Yansıtıcı dizi antenlerin band genişliğini arttırmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Band genişliğini arttırmak, antenin farklı frekans aralıklarında daha etkili ve verimli çalışmasını sağlayabilir. Yansıtıcı dizi antenin band genişliğini arttırmak için kullanılabilen bazı yöntemler aşağıda sıralanmıştır.

Elemanların geometrik yapısını değiştirme: Elemanların boyutları, şekilleri veya yapıları, genellikle antenin çalışma frekansını etkiler. Elemanların geometrik özelliklerini değiştirerek, birden fazla frekans aralığında daha iyi performans elde etmek mümkün olabilir.

Farklı dielektrik malzemelerin kullanımı: Dielektrik malzemeler, anten performansını etkileyebilir. Birden fazla dielektrik malzeme kullanarak veya dielektrik malzemenin özelliklerini değiştirerek, geniş band özellikleri elde etmek mümkündür.

Elemanların konumlandırılması ve düzeni: Elemanların birbirine olan mesafesi, konumu ve düzeni, antenin çalışma bandını etkileyebilir. Elemanların optimal konumları ve düzenleri seçilerek geniş band performansı artırılabilir.

Çoklu frekanslara uyumlu tasarım: Antenin tasarımı, birden fazla frekans aralığında çalışabilecek şekilde optimize edilebilir. Çoklu frekanslara uyumlu bir tasarım, geniş band performansını artırabilir.

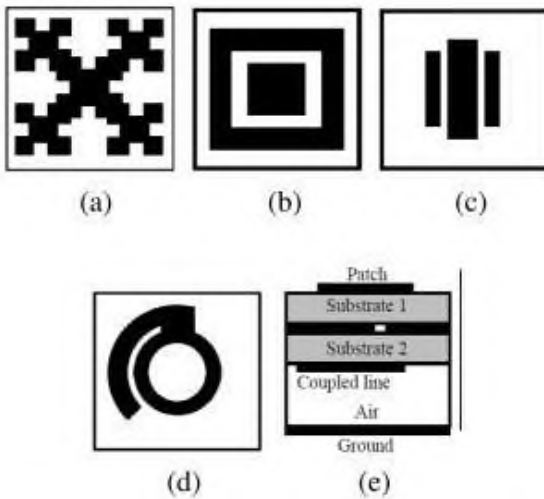
Yansıtıcı yüzeylerin optimizasyonu: Yansıtıcı yüzeylerin şekli, boyutu ve malzemesi, antenin band genişliğini etkileyebilir. Yansıtıcı yüzeylerin optimize edilmesi, geniş band özelliklerine katkıda bulunabilir.

Eş zamanlı işleme ve ileri teknolojilerin kullanımı: Günümüzde, daha gelişmiş benzetim ve modelleme teknikleri, anten tasarım sürecini optimize etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, gelişmiş üretim teknolojileri ve malzemeler, geniş band özelliklerini iyileştirebilmektedir.

Bu yöntemler, yansıtıcı dizi antenlerin band genişliğini arttırmak için kullanılabilir bazı temel stratejilerdir. Ancak, her bir anten tasarımı benzersiz olduğundan, geniş band performansını arttırmak için özel ihtiyaçlar ve tasarım değişiklikleri gerekebilir. Bu nedenle, geniş band özelliklerine sahip yansıtıcı dizi antenlerin tasarımı, dikkatlice yapılan benzetimler, deneyler ve optimizasyon süreçleriyle gerçekleştirilir.

Buna ek olarak, yansıtıcı dizilerde kullanılan birim hücreler tek rezonans frekansına uygun olarak tasarlanmakta ve bu da band genişliği performansını olumsuz etkilemektedir. Yansıtıcı dizilerin band genişliği birim hücrenin band genişliği ve tüm yansıtıcı dizinin band genişliği olarak iki kısımda incelenebilir. Birim hücrenin band genişliği yansıma faz eğrisinin eğimi olarak tanımlanırken tüm yansıtıcı dizinin band genişliği ise kazanç-frekans eğrisinde -1 dB veya -3 dB düşüş aralığı kabul edilir. Yansıtıcı dizinin temel yapısı birim hücredir ve yansıtıcı dizinin performansını doğrudan etkiler.

Yansıtıcı dizinin performansını arttırmak amacıyla birim hücreler üzerine çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Rezonansların kombinasyonu, zaman gecikmeli birim hücre, birim hücrede girinti-çıkıntı ve birden fazla band tasarımları band genişliğini arttırmak için kullanılan geleneksel tekniklerdendir. Farklı yama elemanları, çoklu alt katmanlar ve açıklık kuplajlı birim hücreler farklı tasarımlara kaynaklık ederler. Dielektrik alt katmanın değişken kalınlığı da band genişliğinin artmasını sağlar. Resim 2.5’de geniş band elde etmek üzere tasarlanmış olan bazı birim hücre örnekleri yer almaktadır [20].



Resim 2.5. Geniş band birim hücreler a) Tekli birim hücre b) Birleşik birim hücre c) Parazitik birim hücre d) Açık sonlu stub e) Açıklık kuplajlı [20]

Çoklu rezonans cevabı elde etmek amacıyla Resim 2.5. (a)’daki fraktal yapı kullanılmıştır. Bu fraktal yapı yansıma fazı aralığının ve dolayısıyla band genişliğinin artmasını sağlar.

Resim 2.5. (b)'de gösterilen kare yama ve halka ile band genişliği artışı sağlayacak ikili rezonans cevabının üretilmesi amaçlanır. Resim 2.5. (c)'de parazitik dipol elemanı görülmektedir. Parazitik dipoller, rezonans yapının bir parçası değildir, dipol yama elemanının yüzey kapasitansını ve endüktansını değiştirmek için kullanılır. Parazitik elemanların uzunluklarının değişimiyle yansıma fazı eğrisinde değişim elde edilerek band genişliği performansının artırılması amaçlanmaktadır. Resim 2.5. (d)'de bir halkaya açık uçlu bir faz ayarlama eklenti ilave edilmiştir. Eklenti, yansıyan sinyaller için zaman gecikmesi sağlar. Bu gecikme nedeniyle yansıma fazı eğrisi genişler ve band genişliği artar. Resim 2.5. (e)'de gösterilen açıklık kuplajlı eleman yaygın bir tasarım türüdür. Kuplajlı hat, yama ve metal zemin arasındaki kapasitansları değiştirmek suretiyle band genişliğini arttırmak amacıyla kullanılır [20].



3. ANTEN MODELLEME

3.1. Modelleme

Anten modelleme, elektromanyetik dalgaların yayılma ve alınma özelliklerini analiz etmek amacıyla yürütülen bir süreçtir. Elektronik devreler ile gönderilen ve alınan elektromanyetik dalgalar arasında bir ara yüz olup alternatif akım (AA) sinyal-EM dalga dönüşümü yaparlar. Anten modelleme, bir antenin davranışının matematiksel bir yaklaşımını içerir. Antenin modellenmesi ile farklı frekanslar, polarizasyonlar ve çeşitli koşullar altında anten performansı benzetimi yapılabilir. Bu anlamda, anten tasarımının ve geliştirmesinin en önemli ayaklarından birisidir [25].

Modellenen bir antenin kazanç, yönlendirme, polarizasyon, band genişliği ve verimlilik gibi parametrelerini içeren performansı öngörülebilir. Bunun yanında anten modelleme, antenin performansının optimizasyonuna yönelik iyileştirmeler yapılmasını sağlar. Böylece, belirli bir uygulama veya frekans bandı için en iyi performans elde edilebilir. Empedans uygunlaştırma ile antenin verici veya alıcı devre ile uyumlu olması sağlanarak kayıplar minimize edilebilir.

Antenin ışıma deseni incelenerek belirli bir yönde yaydığı veya aldığı güç değerlendirilebilir. Antenin yönlendirme yetenekleri ve kullanılması planlanan uygulamalara uygunluğu belirlenebilir. Tasarımın bilgisayar tabanlı benzetimler aracılığıyla değerlendirilmesi suretiyle prototip üretiminden önce tasarımın farklı parametreleri üzerinde tekrarlar yapılması ve optimize edilmesi sağlanabilir. Anten modelleme ile gerçek dünya prototip üretimi öncesinde tasarım hataları tespit edilip düzeltme işlemi yapılabilir. Bu da, maliyetleri düşürür ve tasarım sürecini hızlandırır.

Anten modelleme karmaşık bir süreçtir. Sürecin aşamaları tasarım gereksinimlerine ve hedeflere bağlı olarak değişebilmektedir. Öncelikle, çalışma frekansı, kazanç, yönlendirme, polarizasyon ve band genişliği gibi temel ihtiyaçlar belirlenir. Sonrasında, tasarımın boyutlarını, şeklini ve materyallerin seçimini içeren geometrik parametreler belirlenir. Daha sonra elektromanyetik (EM) benzetim gerçekleştirilir. Antenin elektromanyetik davranışını anlamak için bilgisayar tabanlı benzetim araçları kullanılır. Bu benzetimler, Maxwell denklemlerine dayanarak antenin elektromanyetik alan analizini yapar. Antenin mekanik yapısının değerlendirilmesi için modelleme işlemine sonlu eleman analizi ile devam edilir. Bu analizde, antenin malzeme özellikleri, mukavemeti ve termal davranışı gibi mekanik faktörler değerlendirilir. Sonraki aşamada antenin ışıma deseni elde edilir. Işıma deseni,

antenin performansını değerlendirmek için önemli bir faktör olup antenin belirli bir yönde ne kadar güç yaydığı veya aldığı gösterir. Antenin verici veya alıcı devreyle uyumlu olmasını sağlayan empedans eşleştirmesi işlemiyle antenin enerji transfer verimliliği optimizasyonu yapılır.

Tasarımın gerçek dünyadaki performansını görüp sonuçlarını değerlendirmek için bir anten prototipi oluşturulur ve test edilir. Bu adımda, benzetim sonuçlarının gerçek dünya uygulamasına ne kadar iyi uyduğunun kontrol edilmesi amaçlanır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, anten tasarımı optimize edilir. Optimizasyon, performansı artırmak, boyutları küçültmek veya diğer tasarım hedeflerini elde etmek için yapılır.

Anten modelleme sürecinde antenin tasarımını, elektromanyetik performansını ve davranışını analiz etmek için farklı teknikler ve araçlar kullanılmaktadır. Tasarlanacak antenin tipine göre geliştirilmiş olan analitik çözümler ve antenin mekanik dayanıklılık, titreşim analizi ve termal etkiler gibi yönlerini irdelemek için kullanılan sonlu elemanlar analizi bunlardan bazılarıdır.

Antenin iletken yüzeylerini kullanarak elektrik alanının analizi için Moment Metodu (MOM), elektromanyetik alanın zamana bağlı bir ızgara üzerinde sayısal olarak modellenmesi için sonlu farklar zaman uzayı yöntemi (FDTD), antenin yapısını 3B uzayda modelleyip benzetim yapmak için sonlu elemanlar yöntemi (FEM), frekans bağımlı elektromanyetik alan analizi için sonlu farklar frekans uzayı (FDFD) yöntemleri kullanılmaktadır [26]. Anten tasarım parametrelerini optimize etmek için parametrik tasarım ve optimizasyon amacıyla genetik algoritmalar, benzetim tabanlı optimizasyon (SBO) gibi araçlar kullanılır.

Geniş band antenlerin tasarımını kolaylaştırabilmek amacıyla, anten elemanlarının geniş bir yüzeye yerleştirilmesini sağlamak için yüzey entegrasyon teknikleri kullanılırken, gerçek dünya performansını değerlendirmek için laboratuvar testleri ve ölçümler yapılır. Bu ölçümler, benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulama imkânı sağlar.

Anten modelleme, genellikle bu tekniklerin bir birlikteliğinden oluşur ve tasarım süreci boyunca tekrar yapma olanağı sağlar.

3.2. Elektromanyetik Benzetim

Elektromanyetik benzetim araçları, yukarıda sıralanan tekniklerin uygulanmasını kolaylaştıran ve anten performansını optimize etmeye yardımcı olan temel ve güvenilir bir

araçtır. EM benzetimin yüksek doğrulukta hesaplamaya yeteneği sayesinde, antenin değişik çevresel ve çalışma koşulları altındaki ışınma deseni, kazanç, empedans gibi EM bileşenleri gözlemlenebilmektedir [25].

EM benzetim araçları anten performansının hesaplanmasında ve benzetiminde matematik modeller ve sayısal yöntemler kullanılırlar. Bu araçlar mühendislere üretim öncesi fiziksel bir test gerektirmeksizin antenin şekli, boyutları, malzemesi ve çevresel koşullarını düzenleme imkanı sağlarlar [25].

Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio, High-Frequency Simulation Software (HFSS) ve FEKO anten modellemede yaygın olarak kullanılan yazılımlardır [25].

EM benzetimi, zaman, depolama alanı ve ileri düzeyde EM bilgisi gibi çok fazla hesaplama kaynağına ihtiyaç duyarken geleneksel EM analiz yöntemleri ise çok daha fazla zaman gerektirir [25].

3.3. Optimizasyon

Optimizasyon, matematiksel, mühendislik veya iş problemlerinin en iyi veya en uygun çözümünü bulmayı amaçlayan bir süreçtir. Genel olarak, bir optimizasyon problemi, belirli kısıtlar altında bir hedef fonksiyonunu maksimize etme veya minimize etme amacını taşır. Optimizasyon, birçok farklı disiplinde kullanılan evrensel bir problemdir ve geniş bir uygulama alanı vardır.

Optimizasyon problemleri genellikle hedef fonksiyon, değişkenler ve kısıtları içerir. Problem formülasyonu, çözüm uzayının belirlenmesi, optimizasyon algoritmasının seçimi, optimizasyon algoritmasının çalıştırılması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşur.

Optimizasyon, mühendislik, ekonomi, finans, veri bilimi, yapay zekâ ve birçok başka alanda yaygın olarak kullanılan önemli bir araştırma ve uygulama alanıdır. Problemler, karmaşıklık düzeyine bağlı olarak farklı optimizasyon teknikleri ve yöntemleri gerektirebilir.

Anten optimizasyonu ise, bir anten sisteminin tasarım parametrelerini ve yapısal özelliklerini optimize etme sürecidir. Bu optimizasyon süreci, antenin performansını, verimliliğini ve diğer özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Anten optimizasyonu genellikle bir dizi parametre ve kısıtlar altında gerçekleştirilir ve genellikle matematiksel modeller, benzetimler ve deneysel testler kullanılarak gerçekleştirilir.

Yansıtıcı dizi antenin optimizasyonu, belirli hedeflere ulaşmak, anten performansını iyileştirmek veya belirli kısıtları karşılamak için tasarım parametrelerini optimize etmeyi amaçlar. Yansıtıcı dizi anten optimizasyonu genel olarak aşağıda kısaca açıklanan aşamalardan oluşur.

Problemin tanımlanması: Optimizasyon süreci başlamadan önce, belirli bir optimizasyon hedefi belirlenir. Bu hedef, genellikle antenin performansını tanımlayan bir hedef fonksiyon olabilir. Hedef, kazanç artırma, band genişliği artırma, yönlendirilebilir radyasyon deseni elde etme veya diğer belirli tasarım hedeflerini içerebilir.

Değişken ve kısıtların belirlenmesi: Tasarım parametreleri yani değişkenler belirlenir. Bu değişkenler, anten boyutları, eleman sayısı, aralıklar, yansıtıcı boyutları ve benzeri tasarım özellikleri olabilir. Kısıtlar ise, tasarım parametrelerinin alabileceği değerleri sınırlayan denklemler veya eşitsizlikler olabilir.

Çözüm uzayının tanımlanması: Tasarım parametrelerinin alabileceği değerler arasındaki çözüm uzayı belirlenir. Bu, tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırlarıdır.

Optimizasyon algoritmasının seçimi: Genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, benzetim tabanlı optimizasyon ve gradyan tabanlı yöntemler gibi çeşitli algoritmalar optimizasyon için kullanılabilir. Seçilen algoritma, problem türüne, tasarım parametrelerine ve hedeflere bağlı olarak değişir.

Optimizasyon algoritmasının uygulanması: Seçilen optimizasyon algoritması, belirlenen hedef fonksiyonu minimize veya maximize etmeye çalışarak tasarım parametrelerini optimize etmeye başlar. Algoritma, bir dizi tekrar işlemi boyunca tasarım parametrelerini günceller.

Benzetim ve analiz: Her optimizasyon tekrarı sonrasında, güncellenen tasarım parametreleri ile elektromanyetik benzetimler yapılır. Radyasyon deseni, kazanç, band genişliği ve diğer performans ölçümleri analiz edilir.

Sonuçların değerlendirilmesi: Optimizasyonun sonuçları değerlendirilir. Hedef fonksiyon ve tasarım parametrelerinin optimize edilmiş değerleri incelenir. Eğer hedeflere ulaşılmışsa veya kısıtlar sağlanmışsa, optimizasyon işlemi tamamlanır.

Deneysel Doğrulama: Optimizasyon sonuçları deneysel testlerle doğrulanır. Gerçek dünya testleri, benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak optimizasyonun gerçek dünya performansına uygunluğu kontrol edilir.

Yansıtıcı dizi anten optimizasyonu süreci, tekrarlanan bir yaklaşım gerektiren karmaşık bir tasarım sürecidir. Tasarım hedeflerini, kısıtları ve optimize edilecek parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilir. Belirli hedeflere ulaşmak için tasarım parametrelerini doğru bir şekilde ayarlamayı ve antenin performansını optimize etmeyi amaçlar. Benzetim araçları ve optimizasyon algoritmalarının etkili kullanımı, başarılı bir yansıtıcı dizi antenin tasarlanması açısından oldukça önemlidir.



4. YAPAY SINİR AĞLARI

Makine öğrenmesi ile bilgisayarlar ham veriden bilgi çıkarıp çıkardığı bilgiyi öğrenip kendini geliştirerek çıkarım yapabilirler. Makine öğrenmesinin anten modellemedeki yeri son yıllarda hızla artmaktadır. Makine öğrenmesi ile, benzetimli antenden ve ölçümlerden gelen bilgi ile tasarım ve optimizasyon süreci gerçekleştirilir. İyi çalışılmış bir MÖ modeli, antenin performansını saniyeler içerisinde ve yüksek doğrulukta belirleyebilir ve böylece tasarımcının anten performansını artırmasına önemli katkı sağlar [25].

Makina öğrenmesinin temelinde mevcut veriden ve ön alıştırmadan öğrenme, sonrasında ise en iyi performans elde etmek için algoritmayı düzeltme vardır. Algoritma, alıştırma ve performans makine öğrenmesinin üç temel unsurudur [25].

Yapay sinir ağları, en popüler makine öğrenmesi algoritmalarından birisi olup beyin nörobilimi temellerini baz alarak geliştirilmiştir. İnsan beyninin öğrenme, yeni bilgiler türetme ve keşfetme gibi yeteneklerini herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Bu yetenekleri geleneksel programlama mantığı içerisinde geliştirebilmek mümkün görünmemektedir. Yapay sinir ağları (YSA), insanlar tarafından gerçekleştirilmiş örnekleri kullanarak olayları öğrenir, çevreden gelen olaylara karşı geliştirilecek tepkileri belirleyebilir [27].

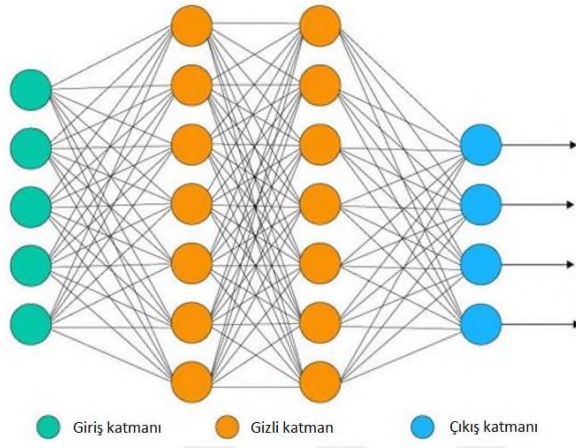
Yapay sinir ağları, birbirine hiyerarşik olarak bağlı olan çok sayıda birimi barındıran bir hesaplama yöntemidir. Bu ağ, girdi setini çıkışa bağlayan çeşitli sayıda hücre, düğüm, birim veya nörondan oluşur. Otonom araçlar, karakter tanıma, görüntü sıkıştırma, borsa tahmini, risk analiz sistemleri, kalite analizleri, petrol/gaz arama ve diğer çeşitli birçok uygulamada yapay sinir ağları kullanılır. Tüketici davranışını öngörme, daha özel alıcı pazarı yaratma ve anlama, pazarlama otomasyonu, içerik oluşturma ve satış tahmini, YSA sistemlerinin pazarlama alanındaki uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir [28].

Yapay sinir ağı (YSA), insan beyni gibi biyolojik sinir sistemlerinin verileri işleme biçimini örnek alan bir veri işleme modelidir. Örneklerden elde edilen bilgilerle kendi deneyimini oluşturduktan sonra benzer konularda benzer kararlar verir. Birçok yapay zekâ uzmanı, yapay sinir ağlarının akıllı bir makine tasarımı için en iyi ve belki de tek yol olduğuna inanmaktadır.

Yapay sinir ağları, insan beynine benzer şekilde tasarlanır ve nöron düğümleri ağ yapısı içerisinde birbirine bağlanır. Nöronlar, insan beynini oluşturan milyarlarca hücredir. Her

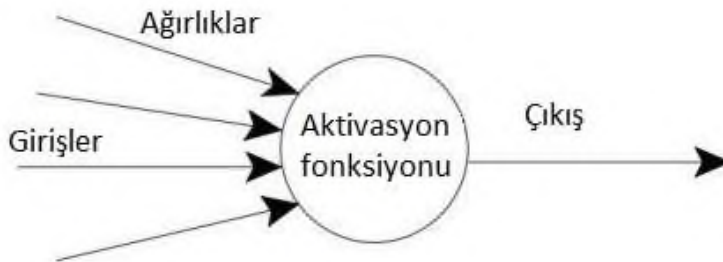
nöron, beyin ile bilgi alışverişi yaparak işleyen hücre yapısından oluşur. Bu ağlar, biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli, öğrenme, bilgiyi işleme ve üretme biçiminden esinlenmiştir. Resim 4.1’de yapay sinir ağları mimarisi görülmektedir.

Sistem, birbirine bağlı ve birlikte çalışan çok sayıda nörondan oluşur. Nöronlar birbirine yakından bağlıdır ve katmanlar halindedir. Giriş katmanı verileri alırken, çıkış katmanı nihai sonucu üretir. İkisi arasında, bir veya daha fazla gizli katman yer alır. Bu düzenlemede, veri akışının tahmini veya bilinmesi zordur.



Resim 4.1. Yapay sinir ağ mimarisi [28]

Her bağlantının bir bağlantı ağırlığı vardır. Her nöronun bir eşik değeri ve bir aktivasyon fonksiyonu vardır. Girdi ağırlığının işaretine göre her girdinin pozitif veya negatif ağırlığa sahip olup olmadığı hesaplanır. Ağırlık, bir bağlantıdaki sinyal yoğunluğunu etkiler. Nöronların eşik değeri vardır. Toplam sinyal eşik değeri aşarsa nöronlar tarafından iletilir. Aktivasyon değeri, toplama biriminin ağırlıklı toplamıdır. Çıktı, bu aktivasyon değerinden gelen sinyale göre üretilir. Her bir elemanın ağırlığı ile YSA sisteminin girdi ve çıktısı arasındaki ilişki Resim 4.2 'de gösterilmiştir.

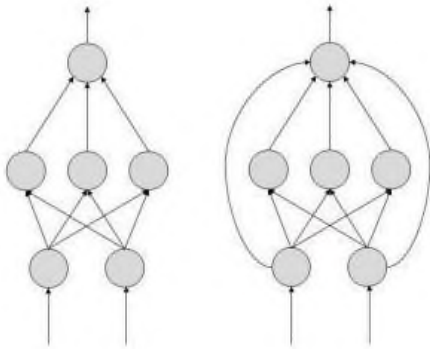


Resim 4.2. YSA'da her bir elemanın ağırlığı ve giriş/çıkış [28]

Bu ağlarda, bir hücrenin zarar görmesi durumunda, diğer hücreler onun yokluğunu telafi edebilir ve yenilenmesine katkıda bulunabilir. Bu ağlar öğrenme yeteneğine sahiptir. Temel olarak, öğrenme yeteneği akıllı bir sistemin en önemli özelliğidir. Bir öğrenme sistemi daha esnek ve programlanması daha kolaydır, dolayısıyla yeni problemlere ve denklemlere daha iyi yanıt verebilir. Yapay sinir ağları, insanlar gibi, farklı örnekleri kullanarak öğrenirler. Bir öğrenme sürecinde, kalıpları tanımlama ve bilgileri sınıflandırma gibi görevleri yerine getirmek için bir sinir ağı kurulur.

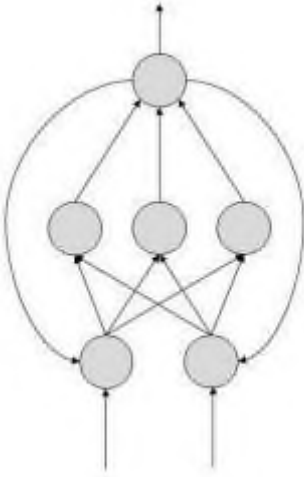
Yapay sinir ağları, bilinmeyen veya çok karmaşık içyapılara sahip sistemlerin kontrolünde veya modellenmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Örneğin, bir motorun girişini kontrol etmek için bir sinir ağı kullanılabilir, bu durumda sinir ağının kendisi kontrol fonksiyonunu öğrenecektir. Bir sinir ağı eğitilirken eğitim yöntemlerinden biri kullanılarak bir dizi girdi ve bunlara karşılık gelen çıktılar bulunur.

İleri beslemeli ve geri beslemeli olmak üzere iki temel yapay sinir ağ topolojisi bulunmaktadır. İleri beslemeli sistemlerde geri besleme döngüleri bulunmaz (Resim 4.3). Bir birim başka bir birime bilgi gönderir fakat ondan bilgi almaz. Her birim önceki birimlerden girdi bilgisi alır, girdiler her bir bağlantının ağırlığı ile çarpılır. Böylece, her bir bağlantının ağırlığına ilişkin çıktı sonuçları elde edilir. Görüntü işleme gibi birçok ticari uygulama bu temel yöntem üzerine kuruludur [28].



Resim 4.3. İleri beslemeli YSA mimarisi [28]

Geri beslemeli YSA sistemlerinde içerik adreslenebilir bellekler kullanılmaktadır. Geri beslemeli süreci kullanarak öğrenme, ağın çıktısının ağın beklenen çıktısıyla karşılaştırılması ile olur. Bu iki çıktı arasındaki fark, ağ birimleri arasındaki bağlantıların ağırlıklarını değiştirmek için kullanılır. Geri beslemeli YSA sistemlerinin mimarisi Resim 4.4'te gösterilmiştir.



Resim 4.4. Geri beslemeli YSA mimarisi [28]

4.1. YSA Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Yapay sinir ağlarının doğrusal olmama, paralel çalışma, öğrenme, genelleme, hata toleransı ve esneklik, eksik verilerle çalışma, çok sayıda değişken ve parametre kullanma, uyarlanabilirlik gibi bir takım temel özellikleri vardır.

Uyarlanabilir öğrenme, YSA sistemlerinin en önemli avantajıdır. Görevlerin nasıl yerine getirileceğini öğrenme becerisi, uygulama ve giriş deneyimleri için verilen bilgilere bağlıdır. YSA kullanmanın bir temel avantajı da küçük bozulmalar karşısındaki kararlılığıdır. Örneğin, bir insan el yazısını algılamak için normal yöntemler kullanırsak, bu yöntemler elin hafif bir titreşimiyle yanlış teşhis edilebilirken, uygun şekilde eğitilmiş bir sinir ağı böyle bir bozulma durumunda bile yanıt verebilir. Yapay sinir ağları, öğrenilen bilgileri benzer ancak öncesinde hiç görülmemiş veri setlerine genelleme yeteneğine sahiptir. Bu, ağın öğrenme sürecindeki genelleme yeteneği olarak bilinir. Birçok işlemi aynı anda çalıştırabilme yeteneği olan paralel işleme sayesinde büyük veri setlerinde hızlı öğrenme ve çözümleme sağlayabilir. Çevresel değişikliklere uyum sağlayabilme yeteneği sayesinde, eğitildikten sonra değişen koşullara adapte olabilir. Giriş verilerindeki örüntüleri algılayabilme ve öğrenebilme yeteneği ile karmaşık veri setlerini anlayabilir [22].

Yapay sinir ağlarını kullanmanın birtakım dezavantajları da vardır. Yapay sinir ağları, genellikle büyük ve çeşitli eğitim veri setlerine ihtiyaç duyar. Sınırlı eğitim verisi, ağın performansını olumsuz etkileyebilir [22]. Büyük ve karmaşık yapılara sahip sinir ağları, ağın eğitilmesi, anlaşılması ve yönetilmesi açısından zorlu olabilir. Derin öğrenme modelleri ve büyük veri setleri ile çalışan ağların genellikle yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duymaları

da başka bir dezavantaj olarak sayılabilir. İçsel işleyişleri açısından genellikle karmaşık ve anlaşılması zor olmalarından dolayı açıklanabilirlik sorunu meydana gelebilir. Ağın, eğitim verilerine çok fazla uyum sağlayarak aşırı öğrenmeye neden olabilmesi de söz konusudur. Aşırı öğrenme, ağın yeni verilere karşı yeteneğini olumsuz etkileyebilir. Dengesiz veya yanlış etiketlenmiş veri setleri, ağın doğru bir şekilde öğrenmesini engelleyebilir ve yanıltıcı sonuçlara yol açabilir.

Yapay sinir ağları, avantajları ve dezavantajları itibariyle belirli uygulama gereksinimlerine ve problemlere göre dikkatlice seçilmelidir.

Ağdaki geniş çaplı hatalarda ağın geneli performansını koruyabilmekte iken kısmi hatalar performansın azalmasına yol açabilmektedir. Optimum yapıyı yakalamak için gereken sürenin kısa olması, sinir ağlarının veri işleme ve analizdeki yüksek hızının sonucudur.

4.2. YSA Sistemlerinin Temel Öğeleri ve Temel Ağ Yapıları

Yapay sinir ağı algoritmalarında bazı temel öğeler bulunur. Yapay sinir ağlarının temel öğesi nöronlardır. Her bir nöron, verileri veya diğer nöronlardan gelen çıkışları içeren girişleri alır, bu girişleri ağırlıklarla çarpar, bir toplam alır ve ardından bir aktivasyon fonksiyonu tarafından işlenir. Her nöronun girişlerini çarptığı ağırlıklar, yapay sinir ağlarının öğrenme sürecinde adapte edilen parametrelerdir. Bu ağırlıklar, öğrenme algoritmaları tarafından belirlenen bir süreçte güncellenir. Her nöronun çıkışını belirleyen aktivasyon fonksiyonları, genellikle nöronun çıkışını bir eşik değeri üzerinden belirlemek veya daha karmaşık işlemleri gerçekleştirmek için kullanılır. Bir başka öğe ise katmanlardır. Yapay sinir ağları genellikle katmanlar halinde düzenlenir. Giriş katmanı, bir veya birden fazla gizli katman ve çıkış katmanı gibi katmanlar, modelin karmaşıklığını ve öğrenme yeteneğini etkiler. Bağlantılar nöronlar arasında olup ağırlıkları temsil eder. Bu bağlantılar, verinin ağ içinde nasıl iletilip işleneceğini belirler [29]. Bu öğeler, yapay sinir ağlarına dayanan çeşitli modellerin temelini oluşturur. Bu modeller, sınıflandırma, regresyon, desen tanıma, doğal dil işleme ve diğer birçok uygulama alanında başarıyla kullanılmaktadır.

Nöronlar, bağlantılar ve transfer fonksiyonları YSA yöntemlerinin hepsinde mevcuttur. Bu nedenle, tüm yöntemler birbirine benzer. Yöntemlerin öğrenme kuralları ve bu kuralların ağın mimarisindeki yeri yöntemler arasındaki temel farklılıklardır. Aşağıda bazı ağlar ve bunların kullanım amacına yönelik bilgiler yer almaktadır.

Geri Yayılım, Delta Bar Delta, Genişletilmiş Delta Bar Delta, Yönlendirilmiş Rastgele Arama, Yüksek Dereceli Sinir Ağları ve Kendi Kendini Organize Eden Haritalar daha çok tahmin amaçlı kullanılırken, Doğrusal Vektör Parçalama, Karşı Yayılma ve Olasılıklı Sinir Ağları sınıflandırma amaçlı kullanılmaktadır. Veri ilişkilendirme uygulamalarında Hopfield, Boltzmann Makinesi, Hamming Ağları, Çift Yönlü İlişkisel Bellek ve Uzay-Zamansal Desen Tanıma ön plana çıkarken, veri kavramsallaştırma uygulamalarında Adaptif Rezonans Ağı ve Kendi Kendini Organize Eden Haritalar tercih edilmektedir. Veri Filtreleme uygulamalarında ise Yeniden Dolaşım kullanılmaktadır [29].

Kullanım amacına göre en çok tercih edilen ağı yapıları yukarıda belirtilmiş olup herhangi bir ağı birden fazla problemin çözümlü için uygun olabilmektedir [29].



5. YAPAY ZEKÂ TABANLI YANSITICI DİZİ UYGULAMALARI

Yansıtıcı diziler uygulama alanları açısından geniş bir yelpazeye sahiptirler. Bu antenlerle ilgili çok çeşitli tasarımlar çalışılmıştır. Bu tasarımların tamamındaki amaç yansıtıcı dizinin işlevselliğini arttırmaktır.

Yansıtıcı dizi model tasarımı çok yüksek ölçekte karmaşık analizler ile mümkündür. Böyle bir tasarım için optimizasyon yöntemi son derece önemlidir. Büyük ölçekli bir yansıtıcı dizi tasarımının optimizasyonu çok sayıda örgülü yapısından dolayı çok fazla zaman alır. Bu nedenle, yansıtıcı dizi tasarımını optimize eden tasarımcılar basitleştirilmiş bir model kullanıp doğruluktan ödün vermek ile optimizasyon süreci için çok uzun zaman harcamak karşılığında detaylı bir model kullanıp yüksek doğruluğa ulaşma arasında bir tercih yapma durumundadır. Bu problemin çözümü için efektif ve hesaplama verimli yaklaşım, yansıtıcı antenin birim hücrelerinin doğru seçilmesidir. Bu model, birim hücrenin geometrik tasarım parametreleri ve birim hücre-besleme kaynağı arasındaki mesafeye göre her bir birim hücrenin yansıma fazı karakteristiğine yöneliktir.

Mikrodalga devre tasarımında elektromanyetik davranışı yüksek doğrulukta öngörecektir yapay zekâ regresyon teknikleri geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, Yapay Sinir Ağları (YSA), Genetik Programlama (GP) ve Sembolik Regresyon (SR) yöntemlerinin kullanımı üzerinedir. Tipik olarak yapay zekâ tabanlı mikrodalga tasarımları, 3 boyutlu elektromanyetik modellere dayalı olarak ölçülen veya benzetimi yapılan veriler kullanılarak oluşturulur. Yapay zekâ tabanlı modellemede eğitim ve test veri setlerinin derlenmesi zor olsa da, özellikle yinelemeli tasarım analizi sırasında tasarım sürecinin hesaplama verimliliği önemli ölçüde artar. Yapay zekâ modelleri, tasarımın optimizasyonu için etkili bir çözümdür. Çünkü tasarım parametreleri, frekans ve malzeme seçimi gibi giriş değişkenleri ile empedans, faz, kazanç ve $[S]$ parametreleri gibi istenen çıktılar arasında bir ilişki kurabilirler. Verimli ve hassas sayısal modeller geliştirmek için yenilikçi yapay zekâ algoritmalarından yararlanılır. Bu modeller, geometrik tasarım parametreleri ve çalışma frekansı dikkate alınarak, yansıtıcı dizi birim elemanın yansıma fazı özelliklerini tahmin etmek için kullanılır. Bu hedefi gerçekleştirmek için, 3B EM benzetim programı kullanılarak yansıtıcı dizinin birbirinden farklı birim elemanları tasarlanır. Sonrasında bu tasarım, yapay zekâ tabanlı algoritmaların performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için gereken eğitim ve test veri setlerini oluşturmak için kullanılır.

Bu bölümde yansıtıcı dizi için YSA kullanılarak iki farklı birim hücre tasarımı yapılacaktır. Birinci tasarımda Malta-Çarmıhı şekilli mikroşerit birim hücre modellenmiştir. İkinci tasarımda ise çarmıh şekilli değişken yükseklikte dielektrik birim hücre modellenip 20x20 dizinin EM benzetimi yapılmıştır. İkinci tasarımın optimizasyonda vekil modelleme kullanılmıştır.

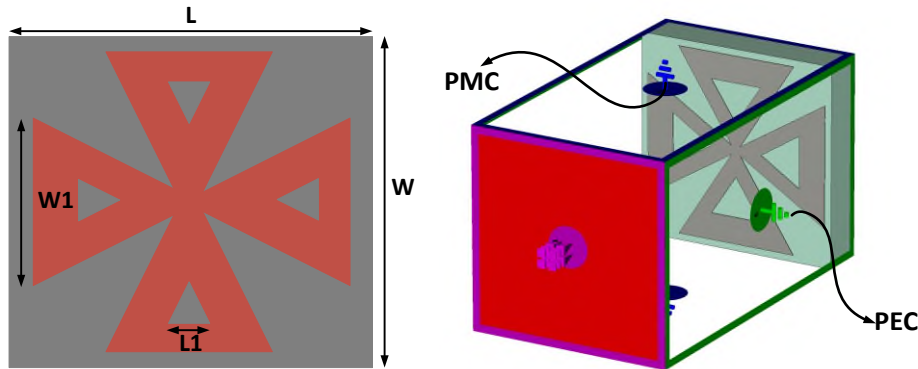
5.1. Mikroşerit Yansıtıcı Dizi Anten Birim Hücre Tasarımı

Mikroşerit yansıtıcı dizi antenler (MYDA), küçük boyutları, düşük profilleri, hafiflikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilirler. Genellikle bir dielektrik katman üzerine konumlandırılmış bir dizi mikroşerit yama antenden oluşur. Dielektrik malzeme seramik, FR-4 veya başka tür bir malzeme olabilir. Bu malzeme, antenin performansını doğrudan etkiler. Yansıtıcı dizisi, mikroşerit yama antenlerin performansını artırmak ve yönlendirmek için oluşturulur. MYDA'lar çok geniş frekans aralıklarında kullanılabilirler. Mobil iletişim, uydu haberleşmesi, radar sistemleri ve diğer RF/mikrodalga uygulamalarında tercih edilen bir teknolojidir.

MYDA'yı oluşturacak dizinin temel bileşeni olan birim hücre seçimi, antenin belirli bir uygulama için optimize edilmiş genel performansını göstermesini sağlaması açısından önemlidir. Birim hücreler çok farklı geometrilerde tasarlanabilirler. EM benzetim araçları, bu tasarımların optimize edilmesi ve analiz edilmesi için kullanılır.

5.1.1. Birim hücrenin tasarımı

Bu çalışmada yer alan iki farklı tasarımdan ilki olan MYDA'nın birim hücresi YSA kullanılarak elde edilmiştir. YDA'nın Malta-Çarmıhı şekilli birim hücresi Resim 5.1'de sunulmuştur.



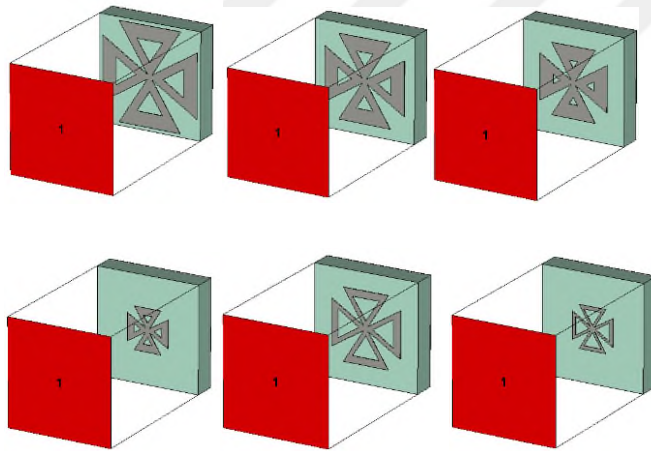
Resim 5.1. Malta Çarmıhı birim hücresinin 3 boyutlu görünümü [30]

Sunulan geometrinin 3B benzetim modeli tasarlanmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen geometrik parametrelere yönelik veriler, yapay zekâ modelleme sürecinde eğitim-test verilerine ayrılacaktır. Değişken listeleri ve değişkenlere yönelik fiziksel sınırlar Çizelge 5.1'de yer almaktadır ($W=L=15$ mm alınmıştır).

Çizelge 5.1. Birim hücre parametrelerinin aralığı [30]

Parametre	Aralık	Adım aralığı
W1	2-7	0.1
L1	0.2-2	0.1
f (GHz)	8-12	0.5
Veri sayısı	8721	

Parametrelerin farklı değerlerine göre farklı geometriye sahip bazı hücrelerin görünüşleri ise Resim 5.2'de verilmiştir. Dielektrik malzemenin yüksekliği 1.52 ve 6.15 [mm] (Rogers 3006) olarak çalışılmıştır [30] .

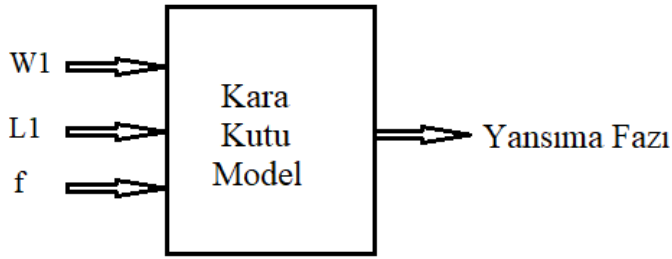


Resim 5.2. Birim hücrenin farklı parametrik değerlerdeki görünümü [30]

5.1.2. YDA birim hücrenin YSA aracılığı ile modellenmesi

EM benzetim sürecinde, YDA'nın Malta-Çarmıhı şekilli birim elemanının parametrik taramasından elde edilen veriler YSA ile modellenmek üzere eğitim ve test verilerine ayrılmıştır. Bu aşamada çapraz doğrulama kullanılmıştır ($K=2$).

YSA modeli için Şekil 5.1'de modeli verilen Çok-Katmanlı-Algılayıcının (ÇKA) tasarım parametreleri Çizelge 5.2'de yer almaktadır.



Şekil 5.1. YDA birim elemanın kara kutu modeli [30]

Çizelge 5.2. ÇKA tasarım parametreleri [30]

Gizli Katmandaki Nöron sayısı (N)	5, 10, 15
Aktivasyon Fonksiyonu	Tangent Sigmoid
Eğitim Algoritması	Levenberg–Marquardt
Maksimum epoch	2 x (örnek sayısı)

Modelin performans değerlendirmesi için 10 defa birbirinden bağımsız olmak üzere model eğitilmiştir. Performans değerlendirmesi için ise Ortalama-Mutlak-Hata (OMH) kullanılmıştır (Eş. 5.1) [30].

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_i - P_i| \quad (5.1)$$

K değeri 2 alınmış çapraz doğrulama analizine ait performans sonuçları aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur. 5 nöron için sonuçlar Çizelge 5.3'te, 5-10 nöron için sonuçlar Çizelge 5.4'de ve 5-10-15 nöron için sonuçlar Çizelge 5.5'de yer almaktadır.

Çizelge 5.3. 5 Nöronlu tek katlı YSA modelinin performans sonucu [30]

Performans		OMH
K-Fold 1	En iyi	26.3
	En kötü	115.6
	Ortalama	75.8
K-Fold 2	En iyi	36.3
	En kötü	94.2
	Ortalama	55.1
Ortalama performans	65.5	

Çizelge 5.4. 5-10 nöronlu YSA modelinin performans sonucu [30]

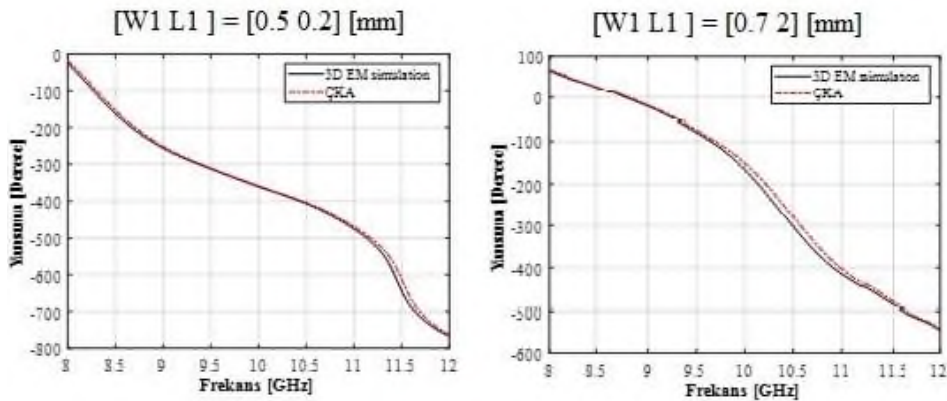
Performans		OMH
K-Fold 1	En iyi	14.7
	En kötü	60.3
	Ortalama	33.7
K-Fold 2	En iyi	18.4
	En kötü	55.2
	Ortalama	29.7
Ortalama performans		31.7

Çizelge 5.5. 5-10-15 nöronlu YSA modelinin performans sonucu [30]

Performans		OMH
K-Fold 1	En iyi	4.1
	En kötü	9.8
	Ortalama	5.4
K-Fold 2	En iyi	4.8
	En kötü	10.7
	Ortalama	6.1
Ortalama performans		5.8

Yukarıdaki çizelgelerden de görüleceği üzere, modellere ait nöron ve katmanların sayısı, YSA model performansında ciddi bir etki yaratmaktadır. Çalışmamızda nöron sayısı $N=5-10-15$ ve gizli katman sayısı ise 3 olarak seçilmiştir [30].

Sonuçlardan da görüleceği üzere (Şekil 5.2), önerilen yapay zekâ tabanlı yaklaşım ile bir YDA anten tasarım optimizasyon süreci hem yüksek doğrulukta hem de çok kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.2. Örnek tasarımlar için tahminleme sonuç kıyaslaması [30].

Bu çalışmada yer alan MYDA birim hücrenin benzetim sonuçları ile diğer bazı çalışmalarda elde edilen sonuçların performans karşılaştırması ise Çizelge 5.6'da yer almaktadır.

Çizelge 5.6. Birim hücre performans karşılaştırma tablosu [30]

	Frekans [GHz]	Faz Aralığı [Derece]	Boyut [mm]	Malzeme
Bu Çalışma	8-12	360	15x15	FR4
[31]	8-12	203	---	---
[32]	9.1-12	420	17x17	Arlon AD300
[17]	8-12	400	15x15	PLA

5.2. Dielektrik Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı

Mikroşerit antenlerin band genişlikleri doğaları gereği düşüktür. Bunun yanında, sıradan mikroşerit dizilerde çeşitli iletken kayıpları ve yüzey dalgaları söz konusudur. Yansıtıcı dizi tasarımında mükemmel iletken zemin kullanımından dolayı yansıma genliği 0 dB'ye yakındır. Bu da sadece her bir birim hücrenin yansıma fazını ayarlayarak yüksek performans elde edilebilmesini sağlar [3]. Birim hücre olarak değişken kalınlıkta dielektrik katman kullanılarak yansıma fazı ayarlanabilir. Bundan hareketle, tez çalışmasının ikinci tasarımında X-bandı uygulamaları için 3B baskı teknolojisini kullanarak dielektrik yansıtıcı dizi anteni tasarlanmıştır. İhtiyaç duyulan faz aralığı dielektrik katmanın yüksekliği değiştirilerek elde edilmiştir. Birim hücrenin optimizasyonunda veriye dayalı vekil modelleme kullanılmıştır.

Vekil modelleme, karmaşık olan fiziksel modelin yerine kullanılacak, aynı zamanda davranışını yüksek doğrulukta temsil edebilecek, daha basit ve hesaplama verimli bir model sağlar. Bir vekil model oluşturma süreci genellikle eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç adımdan oluşur. Eğitim aşamasında, yedek modeli oluşturmak için bir dizi girdi ve çıktı verisi kullanılır. Bu veriler, sistemin benzetimlerinden elde edilir. Vekil model oluşturulduktan sonra, eğitim aşamasında kullanılmayan bir girdi verisi kümesi için oluşan tahminler orijinal modelin çıktısıyla karşılaştırılarak doğrulanır. Son olarak vekil model, eğitim veya doğrulama aşamalarında kullanılmayan bir dizi girdi parametresi için tahminler yapmak üzere test edilir.

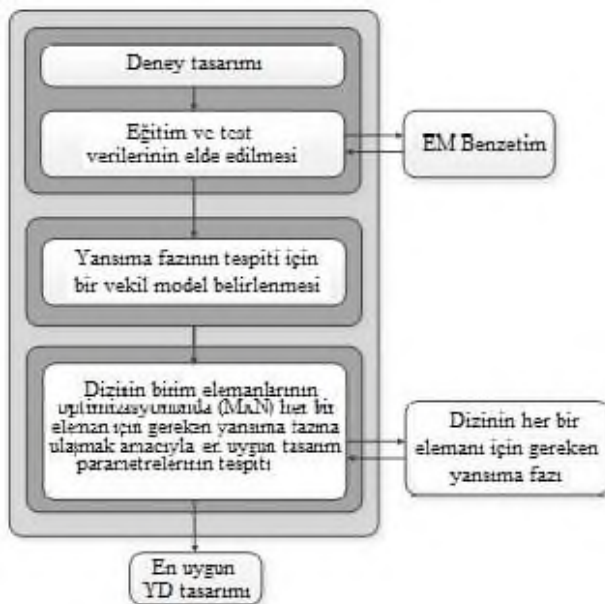
Vekil modelleme, düşük hesaplama maliyeti, benzetim süresini azaltma ve daha geniş yelpazedeki giriş parametrelerini yorumlama yeteneği gibi birtakım avantajlar sağlasa da, vekil modellerin orijinal fiziksel sistemin tüm detaylarını yakalayamayabileceğini unutmamak gerekir.

Dielektrik birim hücrenin tasarımında tekdüze olmayan dielektrik katman kullanılmıştır. Odaklanmış bir hüzme elde etmek amacıyla birim hücreye karşılık gelen faz ihtiyacını karşılamak için her bir birim hücrenin fiziksel parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplama işleminde optimizasyon süreci uygulanmıştır.

Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen optimizasyon işlemi çok fazla zaman aldığı için hesaplama verimli olmaz. Düşük hassasiyetli işlemler uzun zaman almasa da yüksek doğrulukta sonuçlar verememekte, yüksek hassasiyetli işlemler ise yüksek doğrulukta sonuçlar vermesine karşın çok fazla zaman almaktadır. Hem yüksek doğrulukta sonuçlar veren hem de hesaplama verimli bir yaklaşım bu ikilemi gidermede önemli rol oynar.

Mikrodalga devre tasarımlarında yüksek doğrulukta EM davranış tahmini için çeşitli YZ teknikleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle Yapay Sinir Ağı (YSA), Genetik Programlama (GP) ve Sembolik Regresyon (SR) üzerinedir.

Tasarımda uygulanan modellemeye ait yaklaşımın akış şeması Şekil 5.3'te yer almaktadır. Bu modellemede, antenin birim elemanının parametrelerinin faz geciktirme özelliklerini modellemek için yapay zekâ vekil modelleme kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Veriye dayalı vekil modelleme yaklaşımının akış şeması

Bu modellemenin iki ana hedefi vardır. İlk olarak, uzun elektromanyetik benzetimlerin yerine daha hızlı tasarım yapılması hedeflenmektedir. Belirli uzunluktaki birimler için bir benzetim yapılarak, diğer uzunluklar için istenen faz kaydırma ihtiyacına karşılık gelen eleman özelliklerini belirlemek mümkündür. İkinci hedef ise, bu modelleme yoluyla anten tasarımının hızlı ve basit olmasını sağlamaktır. Anten tasarımının ilk aşamasında matematiksel yöntemler kullanılarak, antenin merkezine göre faz gecikmesi gereken koordinatlar belirlenir. İkinci aşama, birim hücre yapısının değişkenlerinin istenilen fazı oluşturması için yapay zekâ modeli tarafından ayarlanmasıdır. Algoritma, öncelikle faz ihtiyacını hesaplamaktadır.

Merkezden beslenen ve 20x20 birim hücreden oluşan yansıtıcı dizi, yatayda ve dikeyde simetrik olduğundan, dizinin 10x10 elemandan oluşan dörtte bir yansıtıcı dizinin faz ihtiyacının hesaplanması yeterlidir. Hesaplama aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır [3].

$$P_{Req_{i,j}}(f) = k \cdot (|\vec{r}_{i,j} - \vec{r}_f| - \hat{u}_0 \cdot \vec{r}_{i,j}) \quad (5.2)$$

Burada k seçilen çalışma frekansının boşluktaki dalga sayısı, $\vec{r}_{i,j}$ hesaplanacak birim hücrenin konum vektörü, \vec{r}_f beslemenin konum vektörü ve \hat{u}_0 ana hüzme doğrultusunun birim vektörüdür. Bu bağıntı kullanılarak 9 GHz ve 14 GHz için elde edilen faz ihtiyaç tablosu Çizelge 5.7’de ve Çizelge 5.8’de sunulmuştur.

Çizelge 5.7. 9 GHz için faz ihtiyaç tablosu

X/Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	34.70	22.80	-0.80	-35.60	-81.30	-137.2	-202.40	-276.3	1.90	-87.10
2	22.8	11	-12.4	-47.2	-92.6	-148.2	-213.1	-286.7	-8.2	-96.8
3	-0.8	-12.4	-35.6	-70	-115	-170	-234.4	-307.3	-28.1	-116.1
4	-35.60	-47.2	-70	-103.8	-148.2	-202.4	-265.9	22.1	-57.8	-144.8
5	-81.3	-92.60	-115	-148.2	-191.7	-244.9	-307.3	-18.2	-96.8	-182.6
6	-137.20	-148.2	-170	-202.4	-244.9	-297	1.9	-67.6	-144.8	-229
7	-202.4	-213.1	-234.4	-265.9	-307.3	1.9	-57.8	-125.7	-201.2	-283.8
8	-276.3	-286.7	-307.3	22.10	-18.2	-67.6	-125.7	-191.9	-265.6	13.70
9	1.90	-8.20	-28.1	-57.80	-96.80	-144.8	-201.2	-265.6	22.50	-56.2
10	-87.10	-96.8	-116.1	-144.8	-182.60	-229	-283.80	13.7	-56.20	-132.9

Çizelge 5.8. 14 GHz için faz ihtiyacı tablosu

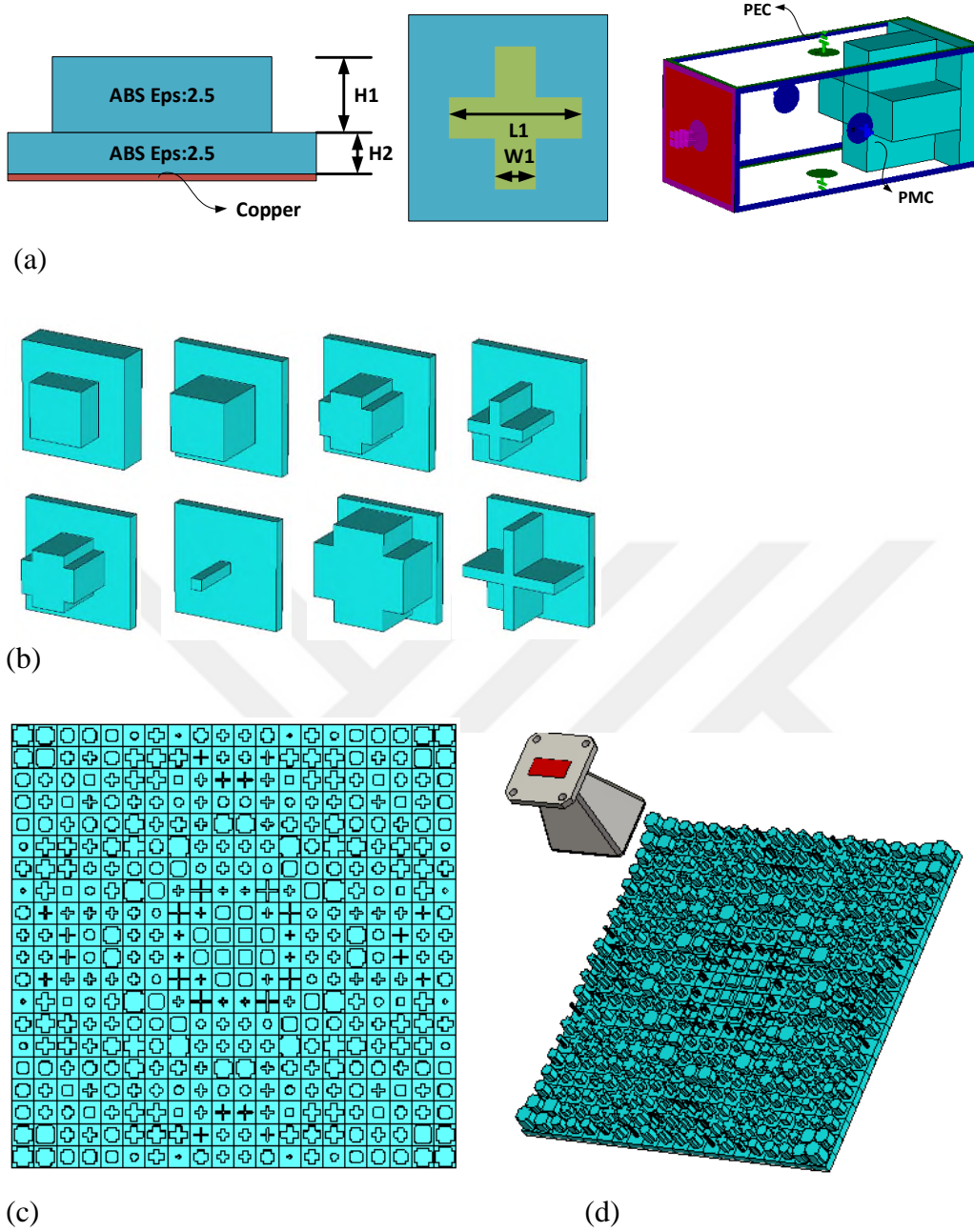
X/Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	54	35.50	-1.20	-55.40	-126.5	-213.3	45.2	-69.8	-197.10	24.50
2	35.50	17.10	-19.40	-73.40	-144	-230.5	28.50	-86	-212.70	9.40
3	-1.20	-19.400	-55.40	-108.9	-178.9	-264.5	-4.60	-118	-243.80	-20.60
4	-55.40	-73.4	-108.90	-161.5	-230.5	45.2	-53.60	-165.7	70.1	-65.20
5	-126.5	-144	-178.9	-230.50	61.90	-21	-118	-228.30	9.40	-124
6	-213.3	-230.50	-264.50	45.20	-21	-102	-197.10	54.8	-65.20	-196.3
7	45.20	28.50	-4.60	-53.60	-118	-197.10	70.1	-35.5	-153	-281.4
8	-69.80	-86	-118	-165.70	-228.3	54.8	-35.50	-138.5	-253.20	-18.7
9	-197.10	-212.7	-243.80	70.10	9.40	-65.20	-153	-253.20	-5	-127.4
10	24.500	9.40	-20.60	-65.2	-124	-196.30	-281.40	-18.7	-127.40	-246.7

Birim hücre yapısı değişkenlerinin istenilen fazı oluşturması için gerekli parametreleri belirlemek için yapay sinir ağı ve bir optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Tasarlanan antenin boyu (d) ve besleme antenin yansıtıcı yüzeye uzaklığı (F) ne olursa olsun, istenen koordinatlar için gerekli faz ihtiyacı matrisine (Çizelge 5.7 ve 5.8) karşılık gelen uygun parametre matrisi dakikalar içinde oluşturulur. Yansıtıcı antenin koordinatına bağlı birim hücre parametresine dayalı MxN matrisi de 3 boyutlu CST benzetim programında tasarlanarak çalışmanın sonuçları elde edilmiştir.

5.2.1. Yansıtıcı dizi tasarımı ve veri setlerinin oluşturulması

Tez çalışmasında 3 boyutlu olarak üretilebilen çarmıh şekilli bir birim hücre tasarımı yapılmıştır. Tasarımın dört değişkeni bulunmaktadır. Birinci ve ikinci katmanın yükseklikleri (h1 ve h2), çarmıh uzunluğu (L₁) ve çarmıhın genişliği (w₁). Dielektrik sabiti her iki katman için de tasarım değişkeni olarak kabul edilse de bu değer $\epsilon_r=2,5$ sabit olarak alınmıştır.

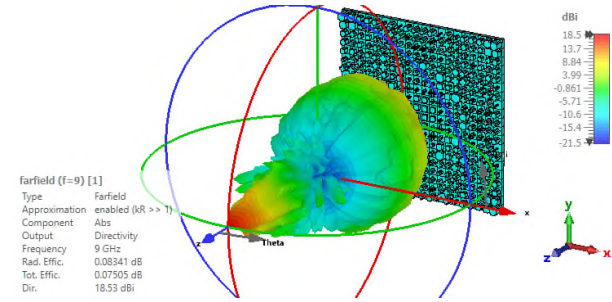
Resim 5.3'te sırasıyla, çarmıh şekilli birim hücre modeli, çarmıh şekilli birim hücrenin çeşitli tasarım değerleri için farklı formları, bu tasarım parametrelerine karşılık gelen birim hücrelerin 20x20 elemandan oluşan yansıtıcı dizi üzerine yerleşimi ve son olarak da tasarlanan yansıtıcı dizi anten yer almaktadır.



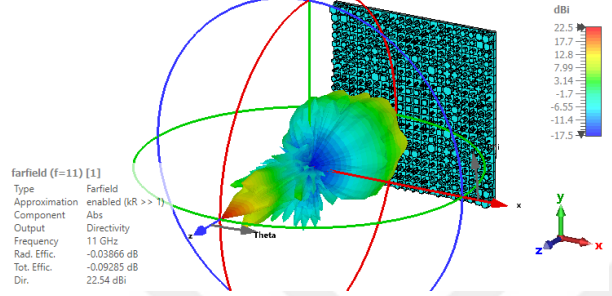
Resim 5.3. (a) Çarmıh şekilli 3B basılı birim hücrenin şematik ve 3B görünümü (b) Farklı tasarım değerleri için birim hücrenin çeşitli formları (c) Yansıtıcı dizi yerleşimi (d) Yansıtıcı dizi anten

Resim 5.4'te tasarlanan yansıtıcı dizinin EM benzetimi sonucunda 9 GHz, 11 GHz, 12 GHz ve 14 GHz için elde edilen ışınma örüntüleri ve S11 sonucu yer almaktadır.

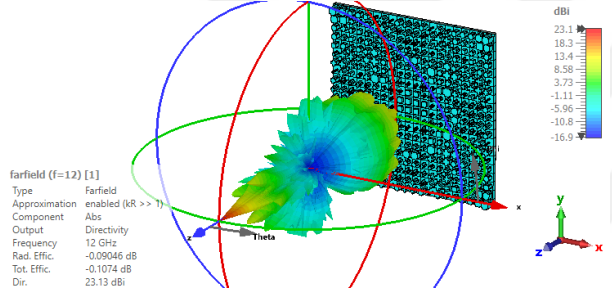
Çizelge 5.9.'da, önerilen çarpaz şekilli YD elemanının tasarım değişkenleri uzayı sunulmaktadır. Burada hesaplama açısından verimli bir modelleme için Latin-Hiper-küp örnekleme düşünülmüştür. Eğitim için toplam 800 örnek kullanılırken, doğrulama için 200 ek örnek üretilmiştir.



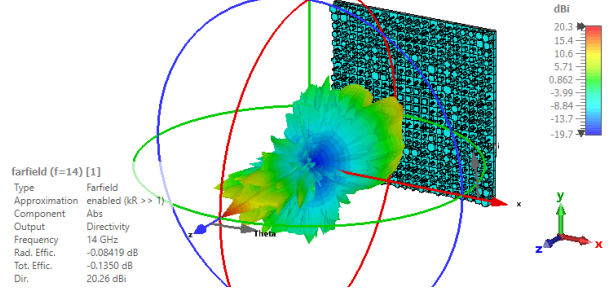
(a)



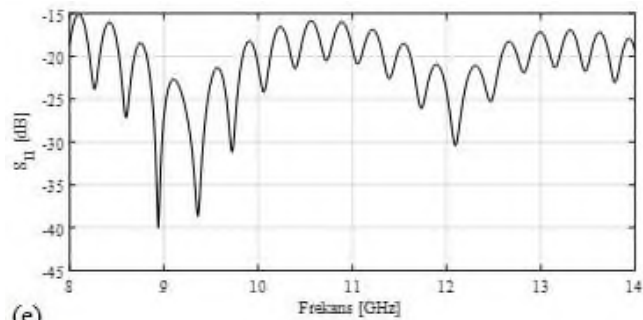
(b)



(c)



(d)



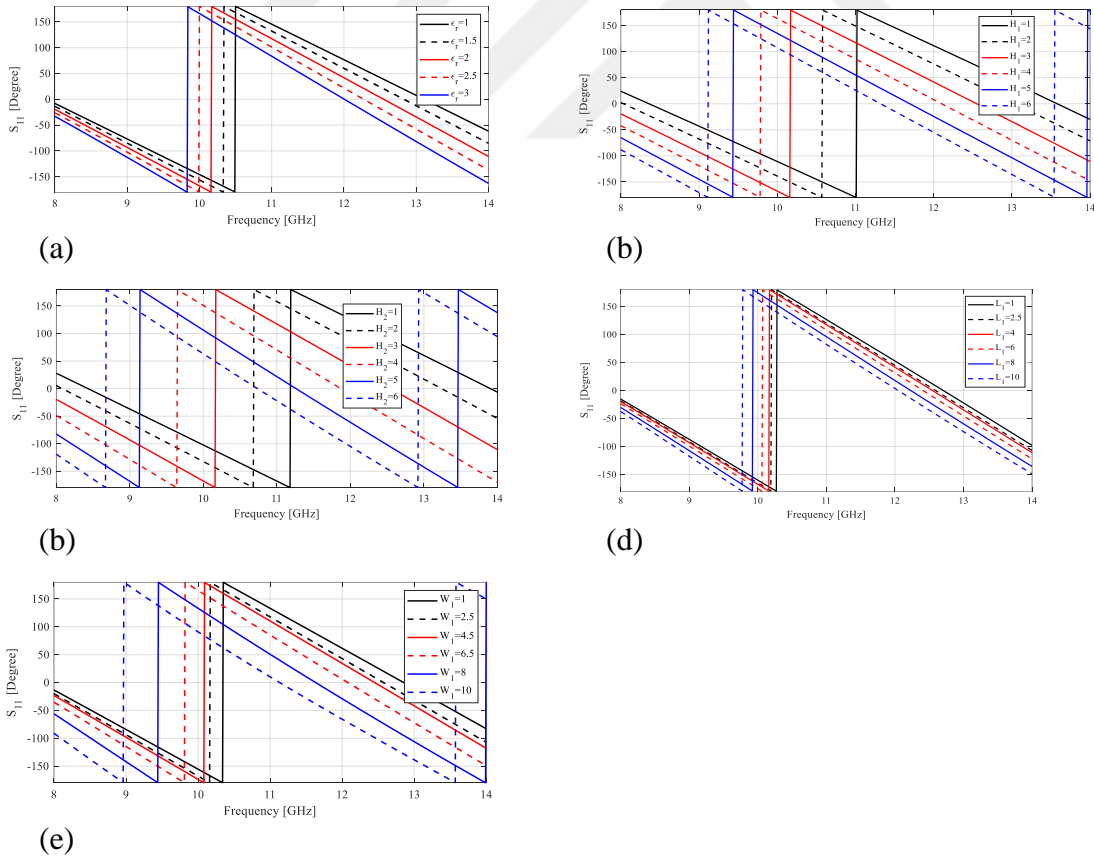
Resim 5.4. Benzetim ışınma örüntüleri a) 9 GHz için b) 11 GHz için c) 12 GHz için d) 14 GHz için e) S11 sonucu

Çizelge 5.9. Tasarım değişkenleri ve bunların sınır değerleri

Parametre	Alt	Üst
h_1 [mm]	1	6
h_2 [mm]	1	6
L_1 [mm]	1	10
W_1 [mm]	1	10
Frekans f_r [GHz]	8	14

Çizelge 5.9.'daki değişkenlere göre çarmlı şekilli YD birim elemanın veriye dayalı yedek modelini oluşturmak için bir dizi geleneksel ve son teknoloji regresyon algoritması kullanılmıştır.

Şekil 5.4'te birim eleman değişkenlerinin parametrik analizi ve bunların yansıma aşamasına etkisi sunulmaktadır.



Şekil 5.4. Birim hücrenin yansıma fazı parametrik analizi (Her değişkenin parametrik analizi sırasında diğer parametreler $\epsilon_r=2$, $H_1=3.5$ [mm], $H_2=3.5$ [mm], $L_1=5.5$ [mm], $W_1=5.5$ [mm] olarak sabitlenmiş iken) (a) “ ϵ_r ” değişkeni için, (b) “ H_1 ” değişkeni için, (c) “ H_2 ” değişkeni için, (d) “ L_1 ” değişkeni için, (e) “ W_1 ” değişkeni için.

5.2.2. Tasarımın optimizasyonu

Önceki bölümde oluşturulan veriler, geleneksel ve son teknoloji ürünü yapay zekâ tabanlı regresyon modelleri kullanılarak birim YD ögesinin veriye dayalı vekil temsilini oluşturmak için kullanılmıştır. Bu modeller:

- I- Yapay Sinir Ağı (YSA)
- II- Destek Vektör Makinası (DVM)
- III- Gauss Süreci (GS)
- IV- Topluluk Öğrenimi (TÖ)
- V- Modifiyeli Çok Katmanlı Algılayıcı (MÇKA)

Tüm bu yapay zekâ (YZ) vekil modelleri, Çizelge 5.9.'da verilen tasarım değişkenlerine göre önerilen çarmıh şekilli YD birim hücre yansıma fazı karakteristik tepkisinin davranışsal modellerini oluşturmak için kullanılmıştır.

Modellerin Ortalama Mutlak Hata (OMH) kullanılarak 10 farklı çalıştırma için ölçülen tahmin performansı Çizelge 5.10'da yer almaktadır.

Çizelge 5.10. 10 farklı çalıştırma için vekil modeller ve performansları

(OMH±standart sapma)		
Tasarım Parametresi	K-fold	Holdout
YSA	9.65±1.28	13.1±1.45
DVM	12.61±1.51	15.5±1.05
GS	8.34±1.09	11.5±1.69
TÖ	8.6±0.9	10.8±1.06
MÇKA	3.2±0.25	4.72±0.3

YD'yi tasarlarırken, basılan parçalar için tipik olarak ± 10 derecelik bir faz hatasının kabul edilebilir sayıldığını vurgulamak gerekir. Ancak, elde edilen OMH değerlerinin, 3B EM benzetimin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında yalnızca vekil model tarafından yapılan yanlış tahminleri dikkate aldığı belirtilmelidir. Dolayısıyla hata değeri, modelleme süreci boyunca karşılaşılan en küçük faz sapmasını gösterir. Uygulamada bu hatanın, imalat kusurları ve uygulanan kısıtlamalarla ilgili olarak birim elemanın sınırlamaları gibi faktörler nedeniyle daha da artması olasıdır. Yüksek performanslı bir YD elde etmek için, diziyi veri odaklı vekil modelleme kullanarak oluşturmak gerekir. Modelin Ortalama Mutlak Hatası (OMH),

daha önce belirtilen ± 10 derecelik faz hatasından daha düşük olmalıdır. Böylece, burada MÇKA vekil modeli, hem K-fold doğrulama hem de hold-out performans testlerinde en yüksek doğruluk oranına ulaşır. Buna en yakın olan Topluluk Öğrenimi, performans testlerinin her birinde neredeyse iki kat hata değerine sahiptir.

Seçenekler arasındaki en yüksek doğruluk oranına sahip MÇKA vekil model algoritması kullanılarak tasarım optimizasyonu yapılan 20x20 elemanlı bir YD anten 3B yazıcı ile üretilerek deneysel sonuçların da elde edilmesi sağlanmıştır.

5.2.3. Deneysel Sonuçlar

20 x 20 eleman boyutuna sahip bir YD tasarımının oluşturulması için daha önce yukarıda da belirtildiği gibi MÇKA vekil modeli kullanılmıştır. Tasarım ile, ihtiyaç duyulan yansıma fazı özelliklerini karşılamak için tüm dizi hücrelerinin geometrik tasarım parametrelerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (BAÇO) tabanlı yöntemler kullanılarak 20x20 YD'nin optimizasyonunda kullanılan maliyet fonksiyonu Eş. 5.3'de formüle edilmiştir:

$$E(\vec{x}, f) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| P_{\text{Req},i,j}(f) - P_{P,i,j}(\vec{x}, f) \right| \quad (5.3)$$

Burada,

$$\vec{x} = [H1, H2, L1, W1],$$

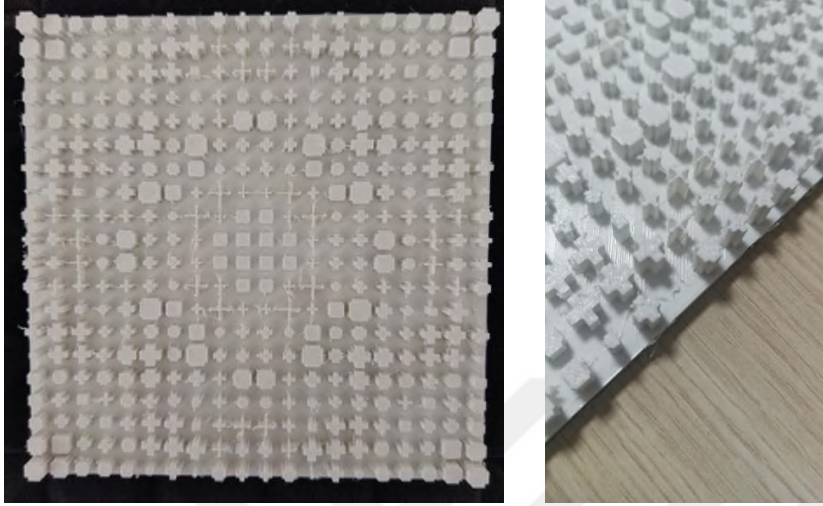
$P_{\text{Req},i,j}$: İstenen yansıma fazı,

$P_{P,i,j}$: Vekil modelin öngördüğü yansıma fazı.

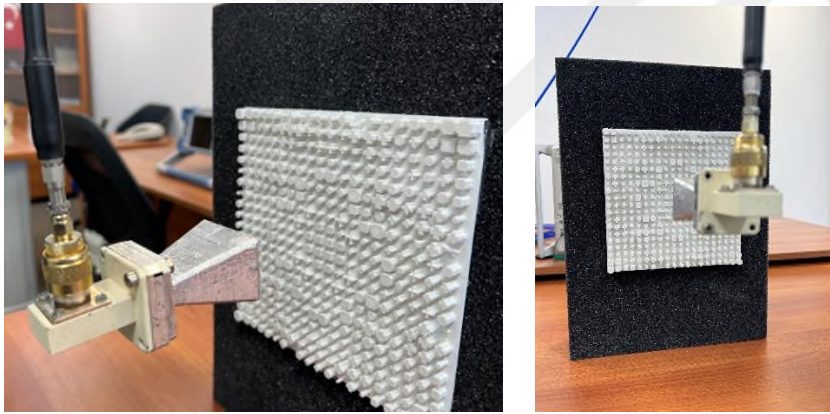
Burada, gerekli yansıma açısını $P_{\text{Req},i,j}(f)$ doğru bir şekilde hesaplamak için BAÇO tarafından dizideki her birim elemanın \vec{x} değeri için en uygun tasarım belirlenmesine yönelik işlem gerçekleştirilir. Çalışmada çarımış şekilli 3B yazdırılabilir YD örnek olay olarak incelenmiştir. Yalnızca 800 veri örneği kullanılarak yaklaşık beş derecelik ortalama mutlak hataya (OMH) sahip, tasarıma hazır bir vekil model geliştirilmiştir. Bu, destek vektör regresyonu veya derin sinir ağı gibi diğer tekniklerin yanı sıra, en uyumlu model olan topluluk öğrenmesinin hata oranıyla karşılaştırıldığında bile iki kat daha düşük olduğu görülür. Bu, önemli bir orandır.

Eğitim verilerinin toplanmasıyla ilgili vekillerin oluşturulmasının hesaplanması, tüm dizinin yaklaşık olarak beş adet tam benzetimine eşdeğerdir.

Çalışılan vekil modelleme yaklaşımını doğrulamak için, 8-14 GHz bandında çalışan 20×20 elemanlı bir dizi (Resim 5.5), Ender 3V2 3D yazıcı ile (Resim 5.6) 3 boyutlu olarak üretilmiştir.



(a)



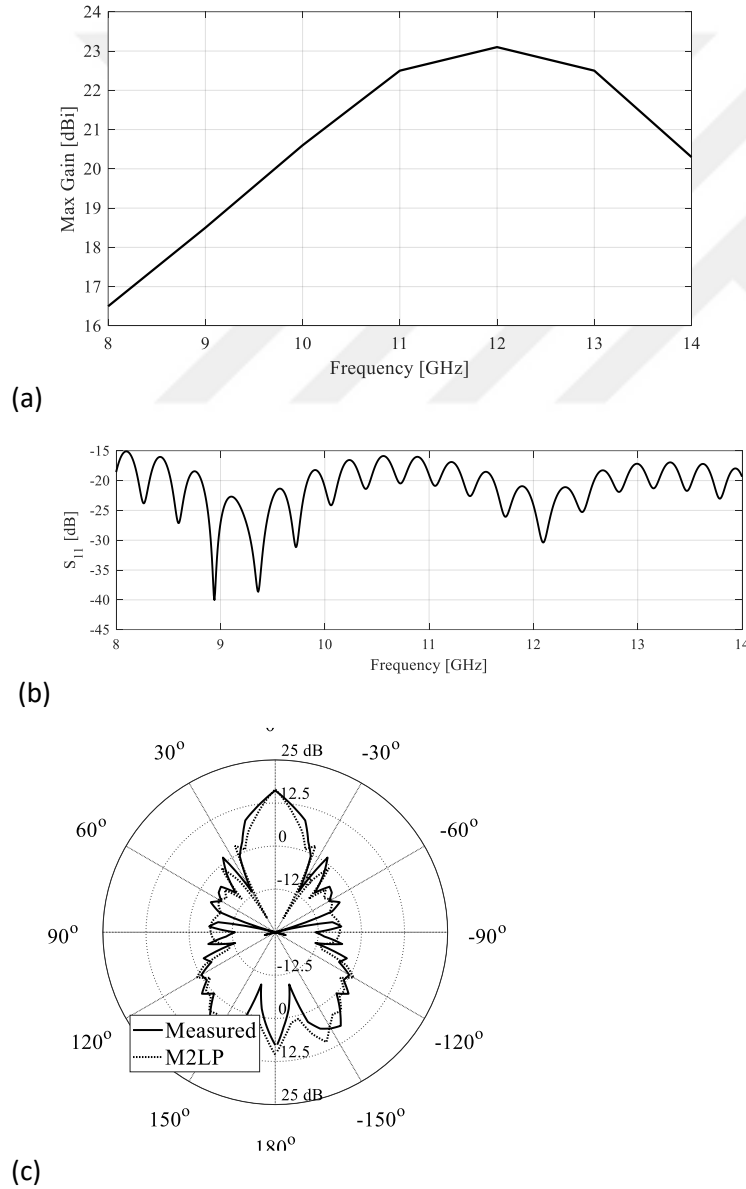
(b)

Resim 5.5. Basılmış 20×20 dizi ve kesiti (a) ve YD'nin boynuz anten ile beslenmesi (b)

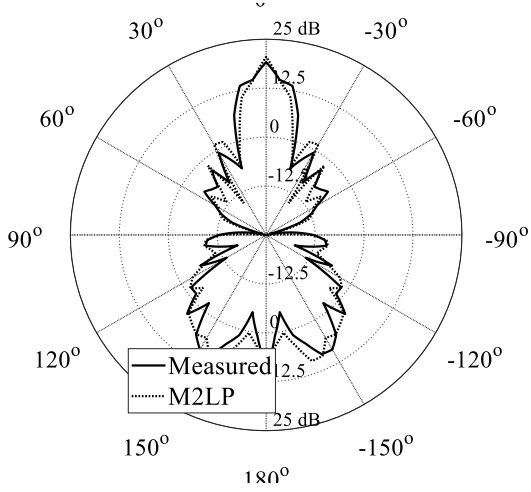


Resim 5.6. 3B basımda kullanılan yazıcı

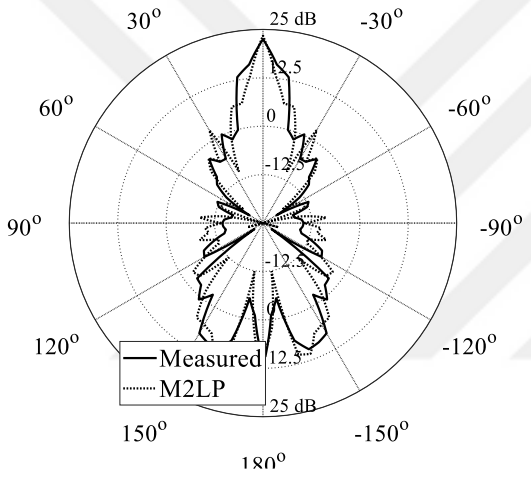
Optimum şekilde tasarlanmış YD'nin ölçülen performans sonuçları Şekil 5.5'de sunulmaktadır. Bu çalışmada sunulan yöntem, mevcut literatürde bulunan en gelişmiş yöntemlerle karşılaştırılabilir olan hesaplama etkinliği ve güvenilirliği nedeniyle, mevcut vekil destekli YD tasarım tekniklerinin uygun bir alternatifi olarak kabul edilebilir. Önerilen yaklaşımın etkililiğini daha ileri düzeyde değerlendirmek amacıyla, elde edilen optimal YD tasarımının deneysel sonuçları, literatürdeki benzer tasarımların performans sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.11). Ölçüm için Yıldız Teknik Üniversitesi'nde bulunan LB-8180-NF geniş band 0,8-18 GHz boynuz anten kullanılmıştır. Kullanılan boynuz antenin genişliği 4.6 cm, yüksekliği 3,5 cm ve derinliği 5 cm'dir [33].



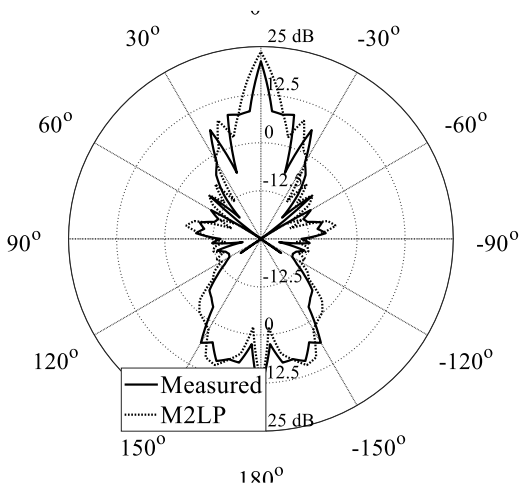
Şekil 5.5. YD'nin ölçülen performans sonuçları (a) Bandın ölçülen maksimum kazanç karakteristiği, (b) Ölçülen S₁₁; YD'nin ölçülen yayılım patterni (c) 8 GHz için (d) 10 GHz için, (e) 12 GHz için, (f) 14 GHz için.



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.5. YD'nin ölçülen performans sonuçları (a) Bandın ölçülen maksimum kazanç karakteristiği, (b) Ölçülen S11; YD'nin ölçülen yayılım patterni (c) 8 GHz için (d) 10 GHz için, (e) 12 GHz için, f) 14 GHz için (Devam).

Çizelge 5.11. Sunulan antenin karşılaştırmalı performansı

Referans	Bu çalışma	[34]	[35]	[36]	[37]	[38]	[39]	[16]	[40]
Frekans (GHz)	9 14	8.7 11.2	8.5 11.5	9.1 10.9	12.1 14.8	9.5 12.3	8 12	11.9	---
Merkez Frekansı (GHz)	12	10.2	10	10	13.5	10	10	8.7 12.7	9
Katman sayısı	1	2	2	1	2	2	1	2	1
Eleman sayısı	400	77	52	729	225	277	400	---	400
Açıklık verimliliği (%)	35	39.8	35	40.3	39	51.3	---	---	13.3
Kazanç (dB)	23	19.3	19	26.1	25	26.4	19.4	24.2	17.8
Yan lob seviyesi	-11.5	---	-14	-16	-	-17.5	-4	-15	-11.7
f/D	0.9	1	0.9	1	0.97	0.79	---	1	2.25
Teknoloji	3D Printer ϵ :2.4	ϵ 1:2.65 ϵ 2: 1.07	ϵ 1:3.2 ϵ 2: 1.07	ϵ :2.2	ϵ 1:3.55 ϵ 2: 1	ϵ 1:3.48 ϵ 2: 1	ϵ :1.98	ϵ 1: 3.4 ϵ 2: 1	ϵ : 2.2
Boyutlar (mm)	200 x 200	140 x 140	12.5 x 125	270 x 270	180 x 180	285 x 285	400 x 400	288 x 288	200 x 200

5.2.4. Sonuç

Bu çalışmada, 3B YD tasarımını optimize etmek amacıyla vekillerin kullanılmasına yönelik yenilikçi bir yöntem ortaya konulmuştur. Yaklaşımın temelinde, temel bileşenin verimli hesaplanarak modellenmesi yer almaktadır. Derin öğrenme tekniklerini kullanarak bir vekil geliştirilmiş ve model mimarisi otomasyon yoluyla otomatik olarak oluşturulmuştur. Önerilen yöntem, birim elemanların geometrik parametrelerine dayalı olarak faz özelliklerini doğru bir şekilde tanımlayan kesin modellerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu, daha az sayıda veri örneği (toplam 1000 örnek) kullanılarak gerçekleştirilebilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez, yapay zekâ (YZ) vekil modellerinin X bandı uygulamaları için yansıtıcı dizi antenlerinin tasarımı ve optimizasyonunda başarıyla uygulanmasını göstermiş olup anten mühendisliğine yenilikçi bir katkı sağlamıştır. Sadece 1000 örnekten oluşan bir yansıtıcı dizi birim hücre veri seti üzerinde eğitilmiş YZ vekil modellerin kullanılması suretiyle, yansıtıcı dizi antenlerinin tasarımı ve optimizasyonu etkin bir şekilde yapılabilmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel yöntemler açısından gerekli olan hesaplama yükü ve zamanın önemli ölçüde azaltılmasını sağlamaktadır.

Eğitildikten sonra, YZ vekil modelleri, yansıtıcı dizi antenlerinin performansı için hızlı ve doğru tahminler sağlamıştır. Bu tahminler, tasarım alanının daha verimli bir şekilde keşfedilmesini sağlayarak optimizasyon sürecine rehberlik etmede önemli olmuştur. YZ modellerinin etkinliği, tahminlerinin ileri 3B elektromanyetik (EM) benzetim araçlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sıkı bir şekilde test edilmiştir. Karşılaştırma, yüksek derecede uyum göstererek, yansıtıcı dizi antenlerinin karmaşık davranışlarının doğru bir şekilde benzetiminin yapılmasında YZ modellerinin güvenilirliğini doğrulamıştır.

Ayrıca, çalışmayı pratik uygulamalarla temellendirmek için, optimize edilmiş yansıtıcı dizi anten prototipi 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Bu prototipin performansı daha sonra deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, YZ vekil modelleri tarafından yapılan tahminlerle yakından uyumlu olup, YZ odaklı tasarım yaklaşımının etkinliğini daha da güçlendirmiştir. Bu uyum, sadece YZ modellerinin doğruluğunu göstermekle kalmayıp, aynı zamanda zaman alıcı ve maliyetli fiziksel prototipleme süreçlerine olan bağımlılığını önemli ölçüde azaltma potansiyelini de göstermektedir.

Sonuç olarak, X-bandı uygulamaları için yansıtıcı dizi antenlerinin tasarımı ve optimizasyonunda YZ vekil modellerinin kullanımı, son derece etkili bir strateji olarak kanıtlanmıştır. Bu yaklaşım, bu antenlerin tasarımıyla ilişkili geleneksel zorlukların üstesinden gelmekle kalmayıp anten mühendisliği alanında daha yenilikçi ve verimli tasarım metodolojilerinin yolunu da açmaktadır. YZ model tahminlerinin 3B EM benzetimleri ve bir 3B basılı antenden elde edilen deneysel sonuçlarla başarılı bir şekilde karşılaştırılması, YZ'nin anten tasarım süreçlerine katkı potansiyelinin kanıtıdır.

KAYNAKLAR

1. Okorochkova, A. I., Malyutin, B. B., Khripkov, G. L., Laouar, M. A., and Priezhev, A. A., (2019). Analysis of receiving antennas types in communication systems with spatial separation of signals by wavefront curvature. *XV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems*, AIP Conf. Proc. 2188.
2. Beiranvand, B., Iyer, A. K., and Mirzavand, R. (2021). Cost-Effective Design of a Reflectarray Antenna for 5G and Millimeter-Wave Applications Utilizing 3D-Printed Components. *Journal Of Latex Class Files*, 14(8).
3. Mahouti, P., Belen, M. A., Çalık, N., and Koziel, S., (2022). Computationally Efficient Surrogate-Assisted Design of Pyramidal-Shaped 3-D Reflectarray Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(11), 10777-10786, doi: 10.1109/TAP.2022.3191131.
4. Inam, M., Dahri, M. H., Kamarudin, M. R., Ashyap, A. Y. I., Jamaluddin, M. H., Sulaiman, N. H., Khan, M. A., Shamsan, Z. A., Almuhan, K., and Alorifi, F., (2022). Linearly Polarized Millimeter Wave Reflectarray with Mutual Coupling Optimization. *Tech Science Press, Computers, Materials & Continua*, DOI:10.32604/cmc.2022.025650
5. Malagisi, C. S., (1978). Microstrip disc element reflect array. *Proceedings of the Electronics and Aerospace Systems Convention (EASCON '78)*, 186–192.
6. Kelkar, A., (1991). FLAPS: conformal phased reflecting surfaces. *Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference, Los Angeles, CA, USA*, 58-62. doi: 10.1109/NRC.1991.114725.
7. Metzler, T. A., (1995). Stub loaded microstrip reflectarrays, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1995 Digest*, Newport Beach, CA, USA, 1, 574-577. doi: 10.1109/APS.1995.530084.
8. Teng, M., Yu, S., and Kou, N., (2023). A Dual-Band Beam Steering Array Antenna With Integration of Reflectarray and Phased Array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(6).
9. Tariq, S., Naseer, N., Iftikhar, A., Shafique, M. F., Nasir, J., Dahri, M. H., Fida, A., and Saka, B. (2023). Direct printable X-band low profile broadband reflectarray antenna using copper foils. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 171, 154901.
10. Jamaluddin, M. H., Sauleau, R., Castel, X., Benzerga, R., Coq, L., Gillard, R., Koleck, T., (2010). Design, Fabrication and Characterization of a Dielectric Resonator Antenna Reflectarray in Ka-Band. *Progress In Electromagnetics Research*, 25, 261-275. 10.2528/PIERB10071306.
11. Kim, J. Y., Ha, S. J., Kim, D., Lee, B., ve Jung, C. W., (2012) "Reconfigurable beam steering antenna using U-slot fabric patch for wrist-wearable applications", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26 (11-12), 1545-1553.

12. Ahmed, F., Afzal, M. U., Esselle, K. P., and Thalakituna, D. N., (2023). Novel Dual-Band Phase-Gradient Metascreen and Dual-Band Near-Field Meta-Steering Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(7).
13. Nayeri, P., Yang, F., and Elsherbeni, A. Z., (2013). Bifocal Design and Aperture Phase Optimizations of Reflectarray Antennas for Wide-Angle Beam Scanning Performance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (61,9), 4588 – 4597. DOI: 10.1109/TAP.2013.2264795
14. Deshmukh, A. A., Kadam, A. A., Lele, K., and Ray, K. P., (2015). Dual polarized stub loaded microstrip Reflectarray with microstrip antenna feed. *International Conference on Pervasive Computing (ICPC)*, Pune, India, 1-5, doi: 10.1109/PERVASIVE.2015.7087059.
15. Yang X. *et al.*, (2018). A Mechanically Reconfigurable Reflectarray With Slotted Patches of Tunable Height. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(4), 555-558. doi: 10.1109/LAWP.2018.2802701.
16. Luyen, H., Yang, Z., Gao, M., Booske, J. H., Behdad, N., (2019). A Wideband Single-Layer Reflectarray Exploiting a Polarization Rotating Unit Cell. *IEEE Trans Antennas Propag.*, 872-883.
17. Belen, A., Günes, F., Belen, M. A., Mahouti, P., (2020). 3D printed wideband flat gain multilayer nonuniform reflectarray antenna for X-band applications. *Int J Numer Model El.* e2753. <https://doi.org/10.1002/jnm.2753>
18. Mitra, D., et al, (2021). Conductive electrifi and nonconductive ninjaflex filaments based flexible microstrip antenna for changing conformal surface applications. *Electronics*, 10 (7), 821.
19. Ma, B., Lu, F., Zhi, G., Xue, X., Zhao, X., Ma, C., ... & Yang, M. (2021). Development of an X-band reflectarray antenna for satellite communications. *Scientific Reports*, 11(1), 6530.
20. Dahri, M. H., Jamaluddin, M. H., Abbasi, M. I., and Kamarudin, M. R., (2017). A Review of Wideband Reflectarray Antennas for 5G Communication Systems. *IEEE Access*, 5, Doi:10.1109/ACCESS.2017.2747844.
21. Köse, S., (2019). Eş Akıllı Işıma Örüntüsüne Sahip Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı ve Modellemesi. *Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi*.
22. Kaya, G., (2012). Mikroşerit Yansıtıcı Dizi Antenler. *YTÜ Fen Bil. Ens. Elektronik ve Hab. Müh. ABD YL Tezi*.
23. Federico, G., Caratelli, D., Theis, G., and Smolders, A. B., (2021). A Review of Antenna Array Technologies for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Wireless Communications at Millimeter-Wave Frequencies. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, Article ID 5559765, 18 pages <https://doi.org/10.1155/2021/5559765>

24. Zhou, Q., and Guo, L., (2023), A Multipolarized Metal-Only Reflectarray Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(8), 6977-6982.
25. Tan, J. (2023). Machine Learning-Assisted Method for Efficient and Accurate Antenna Modelling. *Department of Electronic and Electrical Engineering The University of Sheffield (Thesis)*
26. Sumithra, P. and Thiripurasundari, D., (2017). A review on Computational Electromagnetics Methods. *Advanced Electromagnetics*, 6(1).
27. Doğan, F., Türkoğlu, İ., (2019), Derin Öğrenme Modelleri ve Uygulama Alanlarına İlişkin Bir Derleme. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 409-445.
28. Dastres, R., and Soori, M., (2021). Artificial Neural Network Systems. *International Journal of Imaging and Robotics*, 21(2), 13-25.
29. Anderson, D. and McNeill, G., (1992). Artificial Neural Networks Technology. *Kaman Sciences Corporation-A DACS State-of-the-Art Report*, 31.
30. Bereket, M., Belen, A., Belen M. A. (2021). Artificial Neural Network Based Microstrip Reflectarray Unit Element Design. *Journal of Artificial Intelligence and Data Science (JAIDA)*, 1(2), 160-164
31. Finich, S., Touhami, N. A., and Farkhsi, A., (2017). Design and analysis of different shapes for unit-cell reflectarray antenna. *Procedia Engineering* 181, 526-537.
32. Bodur, H., and Çimen, S., (2019). X-band uygulamalar için tek katmanlı değişken birim eleman boyutlu yansıtıcı dizi anten tasarımı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34(4), 1861-1869
33. Çalışkan, A., (2019). Reflectarray Antenna Design Using Artificial Intelligence. *YTÜ Fen Bil. Ens. Elektronik ve Hab. Müh. ABD Doktora Tezi*.
34. Ren, L. S., Jiao, Y. C., Li, F., Zhao, J. J., and Zhao, G., (2011). A Novel Double-Petal Loop Element for Broadband Reflectarray. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 157–163.
35. Zhao, J. J., Gong, S. X., Xu, Y. X., and Ren, L. S., (2012). Design of a Broadband Reflectarray Using Meander-Shaped Elements Reflectarray With Novel Elements for Wideband Applications. *Microw. and Opt. Techn. Lett.*, vol. 54(2), 500–503.
36. Wu, J., Da, X., Wu, K., (2017). Circularly Polarized High Efficiency Wideband Reflectarray Using Rectangle-Shaped Patch Element. *Inter. J. of RF and Microw. Comp. Aided Eng.*, 27(5), e21089.
37. Qotolo, S. F., Hassani, H. R., and Moghadasi, M. N., (2015). A Novel Broadband Reflectarray Antenna With Lattice Stubs on Square Element for Ku-Band Application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57, 2699-2702.

38. Han, C., Zhang, Y., and Yang, Q., (2017). A Novel Single-Layer Unit Structure for Broadband Reflectarray Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 681-684
39. Rouzbahani, S., Nezhad, A. Z., Ali, M. M., (2016). Design of Reflectarray With Cosecant Squared Radiation Pattern in X-Band. *24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 502-506
40. Qu, S. W., Chen, Q. Y., Xia, M. Y., and Zhang, X. Y., (2014). Single-Layer Dualband Reflectarray With Single Linear Polarization. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62(1), 199-205.



DİZİN

A

algoritma · 18-22, 26-28, 31, 35, 36, 39, 41
 alıştırma · 22
 alternatif · 43
 analiz · 11, 17-19, 22, 26, 28, 29, 31, 39
 Anten · 1-5, 7, 9-15, 17-22, 28, 29, 32, 33, 36, 37, 41, 43, 45, 46
 avantaj · 1-3, 9, 13, 25, 26, 34

B

band · 1, 4-10, 13-18, 20, 33, 42, 43, 44, 46
 band genişliği · 6, 9, 13-17, 20
 baskı · 33, 46
 birim hücre · 1, 3-15, 28-30, 33-37, 39-41, 45, 46
 biyolojik · 22, 23
 boyut · 1, 2, 9, 10, 12-14, 17-20, 28, 29, 33, 36, 41, 42, 45

Ç

çıkartım · 22
 çıkıntı · 15

D

dairesel · 1, 2
 dalga kılavuzu · 13
 deneysel · 4, 7, 12, 14, 15, 29, 30, 33, 34, 36
 dezavantaj · 13, 25, 26
 dielektrik · 6, 18
 doğrusal · 1, 2
 düzlemsel · 1, 8, 10, 17, 18, 20, 28, 35, 46

E

Elektromanyetik · 1, 8, 10, 17, 18, 20, 28, 35, 46
 empedans · 7, 17, 18, 19, 28
 esnek · 3, 7, 9, 24

F

faz dağılımı · 5, 14,
 faz değişim · 4, 5, 10, 11
 faz hatası · 14, 41
 faz ihtiyacı · 8, 12, 34, 35, 36
 faz karakteristiği · 8, 11
 frekans · 3-5, 7, 9, 10, 13-15, 17, 18, 28, 33, 35, 39, 45

G

geleneksel · 15, 19, 22, 34, 39, 40, 46
 geometri · 1, 2, 3, 6, 10, 11, 14, 17, 18, 28, 29, 30, 41, 45
 gizli katman · 23, 26, 27, 30, 32
 grafik · 11

H

haberleşme · 1, 29
 hiyerarşik · 22
 hüzme · 2, 4, 5, 9, 10, 13, 34, 35

I

Işıma · 1, 2, 7, 10, 17, 18, 19, 37, 38

İ

iletken · 12, 13, 18, 33,
 işlevsellik · 28

K

kablosuz · 1, 2
 karakteristik · 1, 10, 12, 40,
 karşılıklılık · 1
 katman · 4, 6, 12, 13, 23, 26, 27, 30, 31, 32, 36, 40, 45
 kazanç · 1, 4, 5, 6, 9, 10, 15, 17, 19, 20, 28, 43, 45
 koordinat · 8, 35, 36
 kuplaj · 15, 16

L

Latin · 35

M

Makine öğrenmesi · 22
 maliyet · 1, 3, 7, 9, 17, 29, 34, 41, 46
 Malta Çarmıhı · 7, 29
 matematiksel · 17, 19, 35
 matris · 8, 36
 mikroşerit · 3, 4, 7, 10, 13, 29, 33
 mimari · 24, 25, 27, 45
 modelleme · 8, 14, 17-19, 22, 28-30, 33-35, 37, 40, 42

N

nöron · 22, 23, 26, 31, 32

O

odaklama · 1, 2
 optimizasyon · 5, 7, 10, 14, 15, 17-19, 20-22, 27-29, 32-34, 36, 40, 41, 46
 ortalama · 22, 31, 40, 41

Ö

öngörü · 17
 ödün · 28

P

Parabolik · 2, 9
 parametre · 3, 6, 7, 8, 10, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 36, 39, 40, 41, 45
 Performans · 1-5, 7, 9, 10, 12-22, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 40, 41, 43-46
 polarizasyon · 3, 5, 17
 programlama · 22, 28, 34
 prototip · 17, 18, 46

R

radar · 2, 29
regresyon · 26, 27, 28, 34, 39, 40,
41
rezonans · 7, 12, 14, 16

S

sınır · 39
sistemik · 6, 25, 28

T

tahminleme · 32
tasarım · 1, 3-7, 10, 11, 13-22,
28-31, 34-37, 39-41, 43, 45,
46
Teknoloji · 1, 2, 7, 13, 14, 29, 33,
46
topoloji · 24, 27

V

Vekil modelleme · 28, 33, 34, 40,
42
Veri iletişimi · 1
veri seti · 8, 46
veriye dayalı · 33, 34, 39, 40

Y

yama · 3, 5, 7, 9, 10, 13, 15, 29
yansımaya açısı · 7, 13, 41
yansımaya kaybı · 10
Yansıtıcı dizi · 2-7, 9-15, 20, 21,
28, 29, 33, 35-37, 46
Yapay sinir ağı · 7, 8, 22, 24, 26,
27, 24, 36, 40
Yapay zekâ · 19, 22, 28, 30, 32,
34, 35, 40, 46
yayılm · 26, 27, 43, 44
yazılım · 8, 19
yenilikçi · 28, 45, 46

X

X-band · 7, 8, 33, 46



TEKNOVERSITE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

