

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PARAZİTİK YAMA KATMANLI MİKROŞERİT YAMA ANTEN
DİZİSİ TASARIMI**

HAZIRLAYAN

HAZAL KARLIDAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2025

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PARAZİTİK YAMA KATMANLI MİKROŞERİT YAMA ANTEN
DİZİSİ TASARIMI**

HAZIRLAYAN

HAZAL KARLIDAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖR. ÜYESİ HAYRULLAH YILDIZ

ANKARA - 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Hazal Karlıdağ Köroğlu tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 31 / 01 / 2025

Tez Adı: Parazitik Yama Katmanlı Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)	İmza
Dr. Yakup Özkazanç (Başkan) , Hacettepe Üniversitesi	
Prof. Dr. Sedat Nazlıbilek, Başkent Üniversitesi	
Dr.Ör. Üyesi Hayrullah Yıldız (Danışman), Başkent Üniversitesi	

ONAY

Prof. Dr. Dilek Çökeliler Serdaroğlu

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 31 / 01 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı: Hazal KARLIDAĞ KÖROĞLU

Öğrencinin Numarası: 22120195

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Programı: Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Hayrullah Yıldız

Tez Başlığı: Parazitik Yama Katmanlı Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 54 sayfalık kısmına ilişkin, 28/01/2025 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %9'dur. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı:

Dr.Ör. Üyesi Hayrullah Yıldız

.....

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini ve vaktini benimle paylaşarak büyük bir ilgiyle bana yardım eden, fikir ve yönlendirmeleriyle akademik kariyerime katkı sağlayan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hayrullah Yıldız'a içtenlikle teşekkür ederim.

Süreç içerisinde beni takıldığım noktalarda yanımda olup problemlere çözüm arayan ve çalışmalarına değerli katkılar sağlayan Emin Polat'a teşekkür ederim.

Bu çalışmayı tamamlarken desteklerini her zaman hissettiğim, yanımda olan ve bana güç veren değerli aileme, sevgili eşim Volkan Köroğlu'na ve İrem İmren, Eren İmren'e sonsuz teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

ÖZET

Hazal KARLIDAĞ KÖROĞLU

PARAZİTİK YAMA KATMANLI MİKROŞERİT YAMA ANTEN DİZİSİ TASARIMI

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik/Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

Mikroşerit yama antenler, düşük üretim maliyeti ve üretim kolaylığı gibi avantajları nedeniyle kablosuz haberleşme sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat, dar bant genişliği ve sınırlı kazanç gibi performans kısıtlamaları, geniş frekans bandı ve yüksek kazanç gerektiren uygulamalarda kullanılabilmesi için çeşitli tasarım iyileştirmelerini gerekli kılmaktadır. Bu tezde, bant genişliği ve kazanç artırımı amacıyla parazitik yamaların kullanıldığı bir dizi mikroşerit yama anten tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda, çalışmada dizi yama anten yapısına parazitik yamalar eklenerek performans parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, ana ve parazitik yamalar arasındaki optimum mesafe, dielektrik malzeme özellikleri ve dizi düzeni gibi tasarım parametreleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, parazitik yamaların eklenmesiyle antenin bant genişliğinde ve kazancında belirgin bir artış sağlandığını göstermiştir. Bu tasarımın, yüksek frekanslı haberleşme sistemleri ve uydu uygulamaları gibi alanlarda verimli bir çözüm sunduğu değerlendirilmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Mikroşerit Yama Anten, Dizi Anten, Dielektrik Malzeme, Parazitik Yama, Kazanç Artırımı, Bant Genişliği

ABSTRACT

Hazal KARLIDAĞ KÖROĞLU

THE DESIGN OF MICROSTRIP PATCH ARRAY ANTENNA WITH PARASITIC PATCHES

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Electrical/Electronic Engineering

2025

Microstrip patch antennas are widely used in wireless communication systems due to their advantages such as low manufacturing cost and ease of fabrication. However, performance limitations such as narrow operating bandwidth and limited gain necessitate various design improvements. In this thesis, the design of an array of microstrip patch antennas using parasitic patches for bandwidth and gain enhancement is studied. This study aims to improve the performance parameters by adding parasitic patches to the patch array antenna structure. Design parameters such as the optimum distance between the main and parasitic patches, dielectric material properties and array layout are analysed in detail. The results show that the addition of parasitic patches significantly increases the operating frequency bandwidth and gain of the antenna. It is concluded that this design offers an efficient solution in areas such as high frequency communication systems and satellite applications.

KEYWORDS: Microstrip Patch Antenna, Array Antenna, Dielectric Material, Parasitic Patch, Gain Enhancement, Bandwidth

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Çalışması	4
1.2. Tezin Katkıları.....	8
1.3. Materyal Kullanımı	10
1.3.1. CST Studio Suite ve MATLAB	10
2. TEORİK ARKA PLAN	11
2.1. Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Tasarımı.....	11
2.1.1. Yama Anten Boyutları	13
2.1.2. Besleme Teknikleri	14
2.2. Dairesel Polarizasyonlu Dizi Anten Tasarımı.....	14
2.3. Katmanlı Parazitik Yama Anten Yapısı Tasarımı	16
2.3.1. Kapasitif Bağlaşım.....	17
2.3.2. İndüktif Bağlaşım	17
2.3.3. Parazitik Yama Yapısının Hesaplamaları.....	17
2.4. Yüksek Performanslı Dielektrik Malzemeler	18
2.5. Antenler Hakkında Temel Bilgiler.....	19
2.5.1. Kazanç	19
2.5.2. Yönlülük	19
2.5.3. Anten Verimliliği	20
2.5.4. Işıma Örüntüsü	20
2.5.5. Bant Genişliği.....	21

2.5.6.	Empedans Uyumlandırma	22
2.5.7.	Polarizasyon	22
2.5.8.	Eksenel Oran.....	23
2.5.9.	S Parametreleri (Saçılma Parametreleri).....	23
3.	TASARIM METODOLOJİSİ.....	26
3.1.	Yama Anten Boyutlarının Belirlenmesi	26
3.2.	Dizi Anten Tasarımı	29
3.3.	Parazitik Yama Katmanın Tasarımı	32
3.4.	Parazitik Yama ile Yama Dizi Anten Arasındaki Mesafenin Optimizasyonu	33
4.	UYGULAMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI	38
4.1.	Parazitik Yama Katmanlı Dizi Anten Üretimi ve Simülasyon Performansı,	38
5.	SONUÇ	44

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Anten Gereksinimleri	3
Tablo 1.2. Literatürdeki Kazanç Değerlerinin Karşılaştırması	8
Tablo 3.1 Tek Yama antenin özellikleri	28
Tablo 3.2. Dizi Yama Antenin Özellikleri	30
Tablo 3.3. Parazitik Yama Katmanın Özellikleri	33
Tablo 4.1: Antenin Bilgisayar Ortamındaki Analiz Sonuçları ile Yankısız Oda Ölçüm Sonuçlarını Gösteren Tablo	44
Tablo 5.1: Bu tezde tasarlanan Antenin Referans Alınan Antenle Karşılaştırılması	45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Wi-Fi Çalışma Frekansları	2
Şekil 1.2 Mikroşerit anten tasarımı ve üretim süreci	4
Şekil 1.3. Yama Anten.....	5
Şekil 1.4. Parazitik Yama Tasarımı Örneği	6
Şekil 1.5. Parazitik Yama Tasarımı Örneği.....	7
Şekil 2.1. Dairesel Polarizasyon yama anten	12
Şekil 2.2 Koaksiyel Besleme Hattı Örneği.....	14
Şekil 2.3. Düzgün Aralıklı Anten Dizisi	15
Şekil 2.4 Kapasitif Parazitik Düzlemsel Örneği	17
Şekil 2.5 Parazitik Yamanın Gösterimi.....	18
Şekil 2.6. Hüzme Genişliği Grafiği	21
Şekil 2.7. Bant Genişliği Grafiği	22
Şekil 2.8. (a) Anten Empedansı ve Bant Genişliği Diagramı (b) Anten Direnç Modeli	22
Şekil 2.9. Polarizasyon Çeşitleri.....	23
Şekil 2.10. Eksenel Orana Göre Polarizasyon Çeşitleri	23
Şekil 2.11. S parametreleri Şeması	24
Şekil 3.1 Yama Anten Boyutları	27
Şekil 3.2. Tek Yama Antenin Yansıma Katsayısı (S11) Grafiği.....	28
Şekil 3.3. Tek Yama Antenin Kazanç Grafiği (2.4 GHz).....	29
Şekil 3.4. Dizi Yama Antenin Üsten Görünümü.....	30
Şekil 3.5. 2x2 anten dizisinin 2.4 GHz frekansındaki Dizi Anten Kazanç Grafiği (Analiz sonucu).....	31
Şekil 3.6. Dizi Anten S11 Grafiği (Analiz sonucu)	32
Şekil 3.7. 2x2 Dizi Antenin 2.4 GHz frekansında Uzak Alan 3 Boyutlu Işıma Grafiği	32
Şekil 3.8. Parazitik Yama Katmanın Üsten Görünüşü	33
Şekil 3.9. Parazitik Yama Katmanlı Dizi Yama Antenin Yandan Görüntüsü	34
Şekil 3.10 Dairesel Dizi Anten ve Parazitik Yamanın Fiziksel Gösterimi	34
Şekil 4.1. Üretilen Antenin Yandan Görünüşü	38
Şekil 4.2. Üretilen Antenin Üst Görünüşü	39
Şekil 4.3 Üretilen Dizi Antenin Üst Görünüşü	39
Şekil 4.4 Parazitik Yama Antenin Üst Görünüşü.....	40

Şekil 4.5. Anten ışıma parametrelerinin ölçümlerinin yapıldığı Yankısız Oda	40
Şekil 4.6. Analiz Sonuçları ve Üretim Sonuçlarının S11 Karşılaştırılması	41
Şekil 4.7. Anten Odası ve Analiz Kazanç Sonuçlarının Karşılaştırıldığı Grafik (2.4 GHZ frekansında).....	42
Şekil 4.8. Anten Odası ve Analiz Eksenel Oran Sonuçlarının Karşılaştırıldığı Grafik (2.4GHz frekansında).....	42



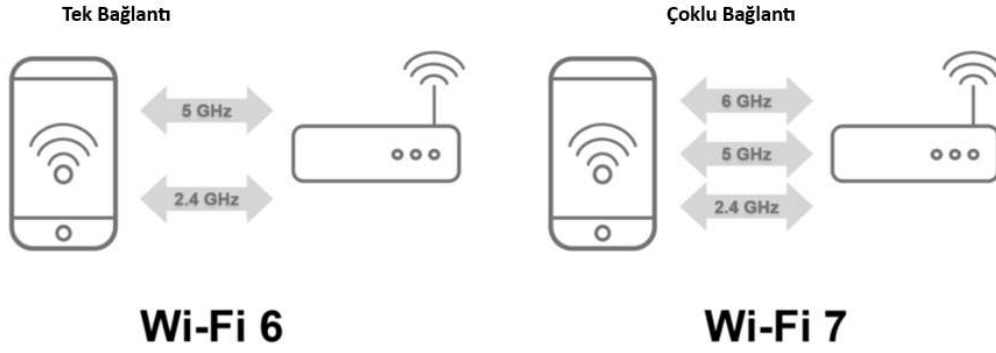
SİMGELER VE KISALTMALAR

AA	Dizi Anteni (Array Antenna)
AF	Dizi Faktörü (Array Factor)
AoA	Variş Açısı (Angle of Arrival)
BAA	Işın Şekillendirme Dizisi (Beamforming Array Antenna)
BW	Bant Genişliği (Bandwidth)
c	Işık Hızı (Speed of Light)
D	Doğrultuculuk (Directivity)
DoA	Variş Yönü (Direction of Arrival)
DRA	Dielektrik Rezonatör Anteni (Dielectric Resonator Antenna)
EF	Eleman Faktörü (Element Factor)
f	Frekans (Frequency)
FF	Uzak Alan (Far Field)
G	Kazanç (Gain)
h	Yükseklik (Height)
ISM	Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi bant
L	Uzunluk (Length)
LPDA	Log-Periyodik Dipol Dizi (Log-Periodic Dipole Array)
MA	Mikroşerit Anten (Microstrip Antenna)
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output)
MPA	Çoklu Patch Anten (Multi-Patch Antenna)
NF	Yakın Alan (Near Field)
Q	Kalite Faktörü (Quality Factor)
PA	Yama Anten (Patch Antenna)
RA	Dikdörtgen Anten (Rectangular Antenna)
RL	Geri Dönüş Kaybı (Return Loss)
SA	Tekil Anten (Single Antenna)
SPA	Seyrek Dizi (Sparse Array)
S ₁₁	Yansıma Katsayısı (Reflection Coefficient)
tanδ	Kayıp Tanjantı (Loss Tangent)
ULA	Düzgün Doğrusal Dizi (Uniform Linear Array)
VSWR	Gerilim Dalga Boyu Oranı (Voltage Standing Wave Ratio)
W	Genişlik (Width)
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı
Z ₀	Karakteristik Empedans (Characteristic Impedance)
ΔL	Etkili Uzunluk Uzantısı (Effective Length Extension)
ε _r	Göreceli Dielektrik Sabiti (Relative Permittivity)
λ	Dalga Boyu (Wavelength)
μ _r	Göreceli Manyetik Geçirgenlik (Relative Permeability)

1. GİRİŞ

Son yıllarda kablosuz haberleşme yapıları (Wi-Fi, 5G), uydu haberleşmesi ve radar teknolojilerindeki gelişme hız kazanmıştır. Bu durum, daha yüksek kazanç, geniş bant genişliği ve daha düşük maliyetli anten tasarımlarını zorunlu hale getirmiştir. Bluetooth ve Wi-Fi gibi ISM (Industrial, Scientific, and Medical band) bandındaki çalışmalar için 2.4 GHz mikroşerit dairesel polarizasyonlu yama anten kullanılmaktadır [8]. Haberleşme sistemlerinde dairesel polarizasyonlu antenler, doğrusal polarizasyonlu antenlere kıyasla daha fazla avantaj sunar [15,28]. Elektrik alan vektörünün döner bir hareket sergilemesi, sinyalin alıcı tarafından farklı açılardan kolayca alınmasını sağlar. Bu özellik, özellikle baz istasyonları, askeri haberleşme sistemleri ve uzay uygulamalarında, verici antenlerde dairesel polarizasyonun tercih edilmesine neden olmaktadır [23,29]. Bu sayede, kablosuz iletişimde alıcının hareketi, doğrusal polarizasyon açısı veya çevresel yansımalarından kaynaklanabilecek sinyal kayıpları en aza indirgenir. Her durumda, sinyalin alınması mümkün olur ve bu da iletişimin sürekliliğini artırır [1].

Mikroşerit yama antenler, kolay üretilebilir ve düşük maliyetli yapıları sayesinde bu alanlarla sıklıkla kullanılabilir hale gelmiştir. Fakat, mikroşerit yama antenlerin düşük kazanç ve dar bant özellikleri yüzünden kullanım alanları sınırlı kalmaktadır. Baskı devre teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, 1980'li yıllarda, mikroşerit yama antenler önem kazanmıştır [7]. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek ve anten performansını arttırmak için parazitik yama katmanlı yama anten dizisi etkili bir çözüm sunmaktadır. Parazitik yamalar, doğrudan beslenmemektedir, elektronik bağlaşım yoluyla ana yama antene katkıda bulunan pasif yapılardır. Bu tasarım sayesinde; anten yapısının frekans bant genişliğinin ve kazancının artırılması mümkün olmaktadır. Bu yapı, yama antenlerde kullanılan diğer geniş bant sağlayan yöntemlerden daha kullanışlı ve daha etkili bir yöntem olarak sunulmaktadır. [19]. Bunu sebebi bant genişliğinin daha fazla olması ve üretim kolaylığıdır.



Şekil 1.1 Wi-Fi Çalışma Frekansları

2.4GHz için tasarlanan parazitik yama katmanlı mikroşerit yama anten dizisi tasarımında "CST Studio Suite" anten tasarım yazılımı kullanılmıştır. Bu tez çalışması, dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tezin amacı ve anten tasarımı üzerine yapılan literatür incelemesi özetlenmiştir. İkinci bölümde, tek yama anten, dizi anten ve parazitik yama tasarımları ile gereksinimler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ise, bu tez kapsamında geliştirilen parazitik yama katmanlı dizi anten tasarımının parametrelerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan simülasyon ve analiz gerçekleştirilmiştir. Son olarak, dördüncü bölümde elde edilen bulgular özetlenmiş ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Anten tasarımında dikkate alınması gereken temel parametreler ve yapılan karşılaştırmalar da sonuç bölümünde detaylandırılmıştır.

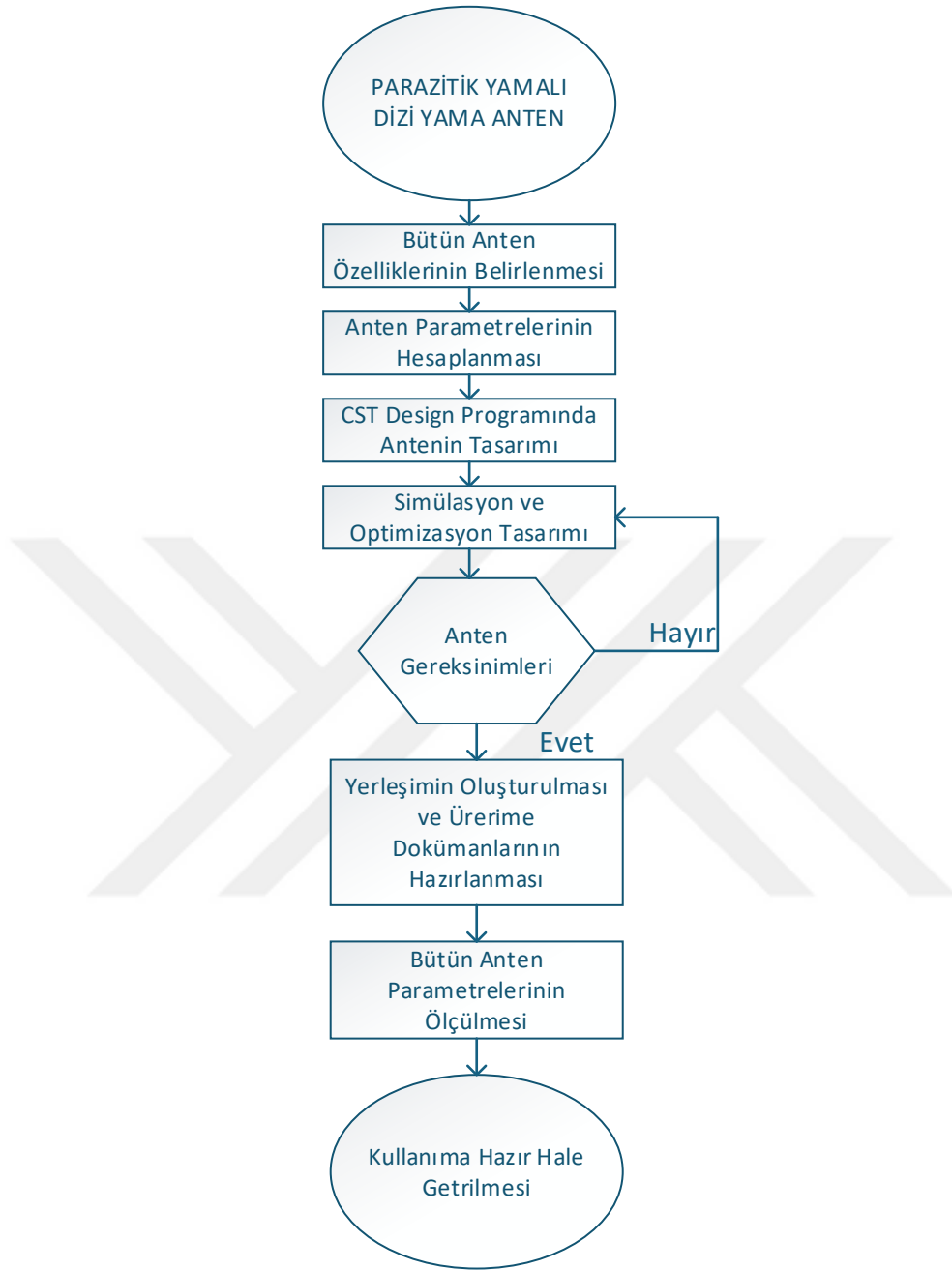
Bu çalışmada izlenen tasarım ve üretim yöntemi Şekil 1.2’de verilen şemada gösterilmektedir. Buna göre, Tablo 1.1’de belirlenen anten gereksinimleri ve parametreleri, ikinci bölümde verilen formüllere göre hesaplanmış ve CST tasarım programı yardımıyla optimize edilerek son hale getirilmiştir. Simülasyon ve optimizasyon çalışmalarından sonra elde edilen sonuçların anten gereksinimlerine uyup uymadığı kontrol edilmiştir. Anten parametreleri uygun hale getirildikten sonra üretim sürecine başlanmıştır. Anten üretimini takiben, yankısız oda kullanılarak anten parametreleri ölçülmüş ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Uydu haberleşme sistemlerinde, antenler belirli frekans bantlarında çalışacak şekilde tasarlanır ve her bir bant, farklı uygulama ve gereksinimlere hizmet eder. Bu çalışmada, S-Bant (2-4 GHz) frekans aralığında haberleşen uydular için bir anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. S-Bant, özellikle uydu haberleşmesinde uzaktan komut ve telemetri işlemleri için yaygın olarak kullanılır. Tasarım sürecinde, uydu haberleşmesinin gerektirdiği düşük geri dönüş kaybı, yüksek kazanç ve dairesel polarizasyon gibi kriterler göz önünde

bulundurulmuştur. Özellikle, dairesel polarizasyon, uydu ve yer istasyonları arasındaki iletişimde polarizasyon kayıplarını minimize ederek sinyal kalitesini artırır. Antenin boyutları, besleme yapısı ve malzeme seçimi gibi parametreler, S-Bant frekanslarında optimal performans sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu tasarım, uydu haberleşme sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliğine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Literatürde [13,14,15,30] incelenmiş ve tasarlanacak antenin, Tablo 1.1’de verilen anten gereksinimlerini sağlaması hedeflenmiştir.

Tablo 1.1 Anten Gereksinimleri

Gereksinim Maddeleri	Değerler
Kazanç	> 6dBi
Çalışma frekansı (f)	2.4 GHz
10 dB Empedans Bant Genişliği	>100 MHz
Yan Kulak Seviyesi	-15 dB
Boyutlar	180 mm x 180 mm
Polarizasyon Tipi	Dairesel



Şekil 1.2 Mikroşerit anten tasarımı ve üretim süreci

1.1. Literatür Çalışması

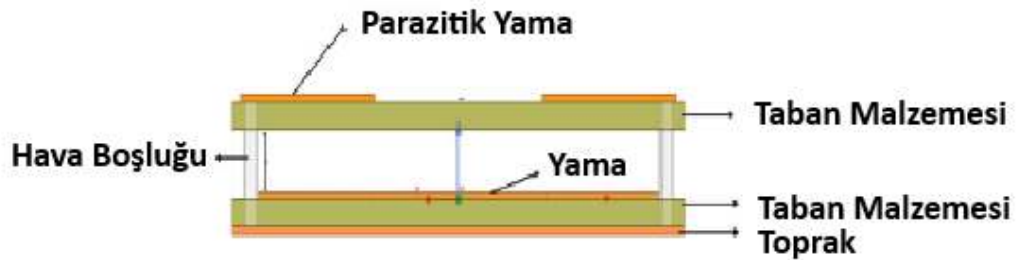
Literatürde, mikroşerit yama antenlerin bant genişliğini ve kazancını artırmaya yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır [12,13,14,28]. Modern kablosuz iletişim sistemlerinin hızla büyümesiyle birlikte, hafif ve düşük profilli antenlere olan talep önemli ölçüde artmaktadır. Düşük profil, hafiflik ve yüksek kazanç gibi avantajlarından dolayı, mikroşerit antenler birçok alıcı-verici sistem uygulamasında oldukça çekici hale

gelmiştir [9]. Ancak, geleneksel mikroşerit antenler, genellikle %5'in altında kalan dar frekans bant genişliği nedeniyle rezonans frekansı etrafında sınırlı bir bantta ışıma yapısına sahiptirler [10]. Bu nedenle, mikroşerit yama antenlerin bant genişliğini artırmak için çeşitli yöntemler sunulmuştur [11].

Parazitik Yamalı Dizi Yama Antenlerin bant genişliği, yönlülüğü, kazancı gibi özellikleri, anten tiplerine göre değişebilmektedir. Literatürde bulunan çalışmalardan, farklı parazitik yama uygulamalarına ilişkin çalışmalara ait kısa özet aşağıdaki paragraflarda verilmektedir. Tablo 1.2'de ilgili parametrelerin değişimi karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

Mansoor Ahmed ve Fazli A. Khalil tarafından 2021 yılında yayınlanan çalışmada [30], 2.4GHz WLAN frekansında çalışan tek beslemeli dairesel polarizasyonlu bir mikroşerit yama anten sunulmuştur. Dairesel polarizasyon, tasarım optimizasyonunu biraz zorlaştıran kenarların pertürbasyonu ile edilmiştir. Önerilen antenin simüle edilen ve ölçülen geri dönüş kaybı sırasıyla -27 dB ve -13.34dB'dir. Kazanç ise 2.4GHz'de 6 dB olarak elde edilmiştir [30].

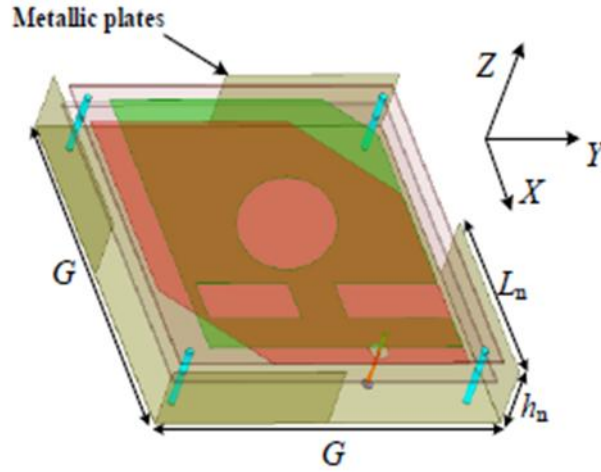
K Pavan Reddy, ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yayınlanan çalışmada [13], bant genişliğini ve kazancı arttırmak için parazitik elemanlar kullanan bir yama anten önerilmektedir (Şekil 1.3). Antende FR-4 epoksi taban malzemesi kullanılmıştır. Taban malzemesi üzerine parazitik yamalar yerleştiren geleneksel antenlerin aksine, bu anten üsttaşıta parazitik yama kullanılmıştır, Şekil 1.3.'te gösterilmiştir. S-Bant (2-4 GHz) ve X-Bant (8-12 GHz) frekanslarında uygulamalar gerçekleştirilmiş, önerilen yapıyla anten kazancının 3.97 dB, frekans bant genişliğinin ise 1.52 GHz artırıldığı belirtilmiştir.



Şekil 1.3. Parazitik Yama Anten [13]

L. Junlong ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yayınlanan makalede [14], RFID okuyucu uygulamalarında kullanılmak üzere geniş bantlı, tek beslemeli, dairesel polarizasyonlu, eksenel oran bant genişliği artırılmış 896MHz'de yama anten

çalışılmıştır. Bu yapı E- şeklinde bir yama ve yakın alan rezonans parazitik yamadan oluşmaktadır, Şekil 1.4.'te gösterilmiştir. E-şekilli yama üzerinde eliptik bir yuva ve bir kesikle antenin empedans bant genişliği ve polarizasyon performansı artırılmıştır. Ölçülen sonuçlara göre, bu yapının antenin empedans bant genişliğini %14 artırdığı ve bant genişliği üzerinde ortalama 7.3 dBic kazanca sahip olduğu belirtilmektedir.



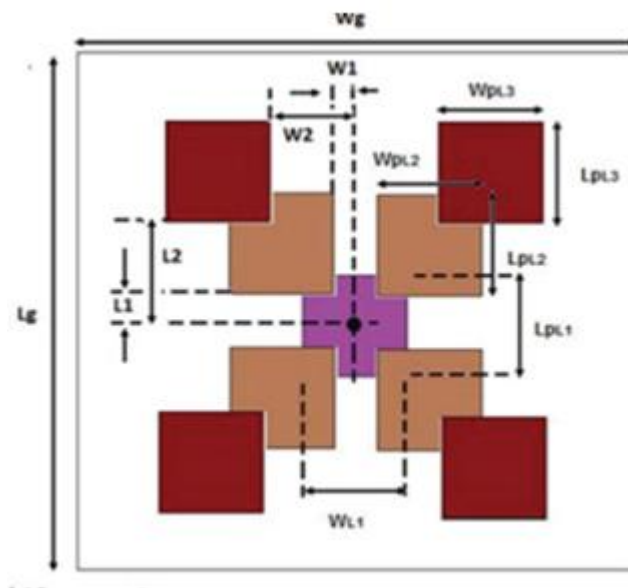
Şekil 1.4. Parazitik Yama Tasarımı[14]

A.B. Santiko ve arkadaşlarının 2016 yılında yazdıkları makalede [12]; düşük kazanç, bant genişliği ve verimliliğe sahip olan mikroşerit yama antenlerinin bu zayıflıkların üstesinden gelebilmek için 2.35GHz'de çok katmanlı parazitik yama tasarımı kullanılmıştır (Şekil 1.5.). Birinci katman parazitik ve ikinci katman parazitik arasındaki mesafe, elektromanyetik kuplajı en üst düzeye çıkarmak ve anten ana hüzmesini iyileştirmek için optimize edilmiştir.

M. S. Khan ve arkadaşları tarafından yazılan makalede [32] ; hava yastığı (air cushion) ve istifli (stacked) yama teknikleri kullanılarak yüksek kazançlı ve geniş bantlı dairesel polarizasyona sahip bir dizi antenin tasarımı sunulmaktadır. Önerilen anten dizisinin temel ışınım elemanı, hava yastığı üzerinde desteklenen bir tahrikli (driven) ve bir parazitik (parasitic) yamadan oluşmaktadır. Tahrikli yama mikroşerit hat ile beslenirken, parazitik yama alttaki yamaya elektromanyetik olarak bağlanmaktadır. Bu anten elemanı kullanılarak, prob ile beslenen 2x2 dizi anten tasarlanmış ve test edilmiştir. Antenin VSWR değeri 2.02 GHz ile 2.38 GHz arasında 2'nin altındadır. Eksenel oran (axial ratio) 2.15 GHz ile 2.40 GHz arasında 3 dB'in altındadır ve maksimum kazancı 17 dBi olarak ölçülmüştür.

M. Nesteros ve arkadaşları [33], 865–928 MHz aralığında çalışan RFID okuyucular için yüksek kazançlı ve dairesel polarizasyona sahip bir yama anteni tasarlamışlardır. Tasarlanan antenler, bir eczane deposunda raflarda saklanan binlerce ilacın etiketlerini tanımlamak amacıyla sağlık uygulamalarında kullanılacaktır. Bu nedenle, elektromanyetik kapsama alanının yeterli olması ve polarizasyon çeşitliliğinin sağlanması, etiket okuma performansını artırmak ve tanımlama hatalarını en aza indirmek açısından kritik öneme sahiptir. Empedans uyumunu iyileştirmek için bir çıkıntı (stub) eklenmiştir. Geniş bant özelliği hem empedans uyumu hem de eksenel oran açısından, üst üste yerleştirilmiş ikinci bir köşeleri kırpılmış yama anteni ile sağlanmıştır. Ana ve parazitik yamaların yüksekliği, köşe kesme boyutları ve prob konumu değiştirilerek optimum tasarım elde edilmiştir. Son olarak, anten tasarımları ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

J.S. Varma ve arkadaşları [34], X-bant ve Ku-bant frekanslarında çalışan kompakt, çift bantlı 2x2 dizi anten tasarımı sunulmaktadır. Anten, eşit faz ve akım genliklerine sahip olması için kurumsal besleme ağına (corporate feeding network) sahip 2x2 dizi yapı kullanılarak tasarlanmıştır. Dairesel polarizasyon sağlamak amacıyla köşeleri kırpılmış mikroşerit yama dizisi kullanılmıştır. Önerilen anten 10.48 GHz ve 12.55 GHz frekanslarında çalışmakta olup maksimum 11 dBi kazançla sahiptir. Köşeleri kırpılmış yama dizisinin 12.64 GHz merkez frekansında 270 MHz bant genişliği ile 0.17 dB eksenel oran (axial ratio) bulunmaktadır. Bu anten dizisi, X ve Ku bantlarındaki çeşitli kablosuz haberleşme uygulamalarında kullanılabilir



Şekil 1.5. Parazitik Yama Tasarımı[12]

Tablo 1.2. Literatürdeki Kazanç Değerlerinin Karşılaştırması

Referanslar	Frekans	Polarizasyon	Anten Eleman Sayısı	Kazanç Değeri (dBi)	10 dB Empedans Bant Genişliği ve yüzdesi	Eksenel Oran
L. Junlong [14]	896 MHz	Dairesel	3 Katmanlı yama anten ve parazitik dizi (Yarım E tipi)	7.3	127 MHz, % 14	< 3 dB
M. Nestoros [33]	880 MHz	Dairesel	Yama anten ve parazitik katman	9.3	95 MHz, % 11	< 3 dB
M.S. Khan [32]	2.2 GHz	Dairesel	2x2 Yama anten ve parazitik katman	17	360 MHz, % 16	< 3 dB
Varma [34]	10.48 GHz	Dairesel	2x2 Yama Anten dizisi	10.1	250 MHz (% 2)	< 3 dB
A.B. Santiko [12]	2.35 GHz	Doğrusal	3 Katmanlı yama anten ve parazitik dizi	4.64	100 MHz, % 4.3	-
K P. Reddy [13]	8.5 GHz	Doğrusal	2x2 Yama anten ve parazitik katman	9.32	2.07 GHz , % 24	-

1.2. Tezin Katkıları

Bu tez çalışmasında, parazitik yamalar kullanılarak dizi yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Parazitik yama yöntemi, mikroşerit yama antenlerde bant genişliği ve kazanç artırımı sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada, Katmanlı (stacked layer) ve

eş düzlemsel (coplanar) parazitik yama yapılandırmaları ele alınmış ve anten performansı detaylı olarak analiz edilmiştir.

Parazitik yama tasarımı, ana yama anten ile elektromanyetik bağlaşım yoluyla etkileşimde bulunan beslenmeyen yamaların kullanımına dayanmaktadır [22]. Bu tasarım, birden fazla rezonans frekansı oluşturarak bant genişliğini artırırken, ışınlım desenini optimize ederek kazanç artışı sağlamıştır. Ayrıca, dizi anten yapıları ile birleştirilerek toplam kazanç ve yönlülük performansı iyileştirilmiştir.

Tez kapsamında parazitik yamalar ve ana mikroşerit yama dizisi, Rogers 6002 dielektrik malzemesi kullanılacak biçimde modellenmiştir. Parazitik yamalar ve ana mikroşerit yama dizi anteni arasındaki mesafe, optimum bağlaşım sağlamak için dikkatlice tasarlanmıştır. Anten besleme hattı, mikroşerit hat yapısı kullanılarak oluşturulmuş ve açıklık bağlaşımlı bir besleme yöntemi uygulanmıştır.

Dizi anten yapılarının ışınlım performansı optimize edilirken, parazitik yamaların etkisi hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Tezde kullanılan dizi anten yapıları, toplam kazancı artırırken yan kulak seviyelerinin bastırılmasını sağlamıştır.

Tez çalışmasının başlıca katkıları aşağıda özetlenmiştir:

1. Parazitik yama ve dizi anten yapılandırması bir araya getirilerek dairesel polarizasyona sahip bir yama anten dizisinin bant genişliği ve kazanç artırımını sağlanmıştır.

2. Katmanlı ve eşdüzlemsel parazitik yama yapıları, aynı tasarım içinde birleştirilmiştir. Bu yöntem ile geniş bantlı ve yüksek kazançlı bir anten tasarlanmıştır.

3. Parazitik yamalı dizi anten, açıklık bağlaşımlı mikroşerit besleme yöntemiyle modellenmiştir. Böylece, parazitik yamaların anten tasarımına entegrasyonu, ana mikroşerit yama anten dizisinde herhangi bir boyut artışına neden olmadan gerçekleştirilmiştir.

4. Parazitik yama ve ana mikroşerit yama anten dizisi arasındaki mesafe, anten performansını maksimize etmek için optimize edilmiştir.

5. Tasarlanan yapı, dairesel polarizasyona sahip, mekanik özellikleri bakımından sade ve dayanıklılığı yüksek yapıdadır. Bu özelliği, antenin ürünleştirilmesi bakımından, literatürdeki benzer yapılardan oldukça avantajlıdır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen yöntemler, yüksek kazançlı ve geniş bantlı yama anten dizisi tasarımlarına yönelik yeni bir yaklaşım sunarak, literatüre katkı

sağlamaktadır. Çalışmanın, özellikle kablosuz haberleşme ve uydu iletişim sistemleri gibi, geniş bant ve yüksek kazanç gereksinimi olan sistemler için verimli bir çözüm oluşturduğu değerlendirilmektedir.

1.3. Materyal Kullanımı

1.3.1. CST Studio Suite ve MATLAB

Bu çalışmada, Parazitik Yama Katmanlı Dizi Anten tasarımı için diğer alternatif programlara göre daha etkili ve hızlı çözüm sağlayan CST Studio Suite programı seçilmiştir. CST elektronik ve mekanik çözümler sunan üç boyutlu simülasyon programıdır. Bu tezde, anten tasarımı ve analiz süreçlerinde CST Studio Suite yazılımı kullanılmıştır. CST, elektromanyetik simülasyonlarda yüksek doğruluk ve esneklik sağlayarak, anten performansının detaylı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Tasarım aşamasında, antenin temel parametreleri (S11), kazanç, ışınlama deseni ve eksenel oran (axial ratio) analiz edilmiş ve optimize edilmiştir. Ayrıca, farklı yapıların ve geometrik parametrelerin anten performansı üzerindeki etkileri de simülasyonlar yardımıyla incelenmiştir. Bu sayede, fiziksel prototiplerin sayısı azaltılmış ve tasarımın erken aşamalarında performansın optimize edilmesi mümkün olmuştur.

MATLAB, sayısal hesaplama ve veri analizi konularında uzmanlaşmış, güçlü bir programlama dilidir ve birçok mühendislik, bilim ve ekonomi alanında geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. MATLAB'in temel avantajlarından biri, karmaşık matematiksel hesaplamaları ve analizleri hızlı ve etkin bir şekilde yapabilmesidir. Bu tezde kullanılan grafikler MATLAB kullanılarak hazırlanmıştır.

2. TEORİK ARKA PLAN

2.1. Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Tasarımı

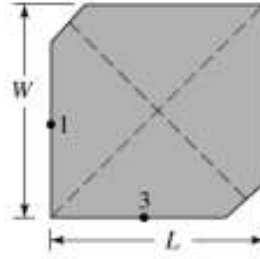
Mikroşerit yama anten, bir dielektrik taban malzemesi üzerine iletken bir yama ve altında toprak düzleminden oluşan bir anten türüdür. Yüksek verimlilik, kolay üretim ve kompakt yapı özellikler sayesinde telekomünikasyon, uydu iletişimi, GNSS, askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılır. İletken yama herhangi bir şekilde olabilir, ancak dikdörtgen ve dairesele konfigürasyonlar en yaygın kullanılan konfigürasyonlardır. Yama antenler, rezonans yapısı olarak çalışır. Elektromanyetik enerjiyi bir besleme kaynağı olarak kullanır. Yama elemanı antenin elektromanyetik dalgaları yaydığı veya aldığı iletken kısımdır. Yama elemanı üzerinden bir elektrik alan oluşturur. Bu elektrik alan, dielektrik taban malzemesi ve hava aracılığıyla serbest uzaya ışıınım yapar.

Yama antenler, dar bantlı ve düşük kazançlı sahip antenler olup, polarizasyon hassasiyeti oldukça yüksektir. Anten, sahip olduğu polarizasyona uygun polarizasyonla gelen sinyalleri kayıpsız olarak alır. Yani, antenin tasarlandığı polarizasyondaki sinyallere duyarlılığı yüksektir, ancak farklı polarizasyonlardaki sinyalleri alırken veya iletirken polarizasyon kaybı yaşanabilir. Bu durum, iletişim kalitesini etkileyebileceği için önemli bir tasarım parametresidir.

Dairesel polarizasyonlu antenlerin tasarımı, modern iletişim ve uydu sistemlerinde kritik bir öneme sahiptir. Bu tür antenler, elektromanyetik dalgaların toplam elektrik alanı bileşenlerinin bir daire çizerek ilerlemesini sağlar ve özellikle karmaşık ortam koşullarında (örneğin, atmosferik saçılma, çok yönlü yayılım gibi) sinyal kaybını ve bozulmayı en aza indirir. Dairesel polarizasyon, gönderici ve alıcı antenlerin yönlendirme uyumuna duyarlılığı azaltarak daha esnek ve güvenilir bir iletişim sunar. Bu avantajlar, dairesele polarizasyonlu antenlerin kablosuz iletişim, uydu haberleşme, radar sistemleri ve GPS gibi geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmesini sağlar. Dolayısıyla, bu tür antenlerin tasarımı, yüksek performanslı ve kararlı bir iletişim sistemi geliştirmek için gereklidir. Bu tezde dairesele polarizasyonlu antenin seçilmesinin temel nedeni, bu antenlerin karmaşık ve değişken ortam koşullarında sağladığı üstün performanstır. Özellikle çok yönlü yayılımın etkili olduğu, alıcı ve vericinin göreceli konumlarının sürekli değiştiği durumlarda, dairesele polarizasyon sinyal kaybını ve yönlendirme uyumsuzluklarını minimize eder. Ayrıca, doğrusal polarizasyonlu antenlerde yaşanan polarizasyon uyumsuzluğu nedeniyle oluşan enerji

kayıplarını önleyerek daha verimli bir sinyal iletimi sağlar. Dairesel polarizasyon, hem yatay hem de dikey bileşenleri kapsadığı için yön bağımsız iletişim sunar ve bu da kablosuz haberleşme, uydu sistemleri, GPS ve radar gibi yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda kritik bir avantaj sağlar[17]. Bu nedenlerle, bu çalışmada daireysel polarizasyonlu anten tasarımına odaklanılmıştır.

Dairesel polarizasyonlu antenlerde eksenel oran (Axial Ratio - AR) değeri, bir antenin yaydığı veya aldığı elektromanyetik dalgaların polarizasyon durumunu ölçen önemli bir parametredir. AR, elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün büyük eksen ile küçük eksen arasındaki genlik oranını ifade eder. Dairesel polarizasyonlu bir anten için ideal durumda AR değeri bir olmalıdır. Bu da dalganın mükemmel daireysel polarizasyona sahip olduğunu gösterir. Ancak pratikte, antenin performansına ve tasarımına bağlı olarak bu değer genellikle birden farklıdır. Dairesel polarizasyona sahip bir anten için eksenel oran değerinin $3dB$ 'nin altında olması kabul edilebilir bir değerdir [31].



Şekil 2.1. Dairesel Polarizasyon yama anten [1]

Dairesel polarizasyonlu mikroşerit yama anteni yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Işıma yapan düzlem temel olarak dörtgen yapıda olmakla beraber farklı ışıma karakteristikleri elde etmek için farklı geometrik şekiller de kullanılabilir. Kullanılan her yapının özel ışıma karakteristiği bulunur. Bu sayede gereksinime göre ışıma yapan düzlemin geometrisine göre tasarım belirlenir. Bir mikroşerit antenin diğer antenlerle karşılaştırıldığında dikkat çeken özellikleri; ince profil, dar bant ve şekil esnekliğidir. Bilinen en temel dikdörtgen yama anten, frekans bant genişlikleri tipik olarak %2-5 arasındadır ve 4-6 dBi arasında kazançla sahiptir.[1]

2.1.1. Yama Anten Boyutları

Mikroşerit yama antenin temel tasarım parametresi, rezonans frekansıdır (f_r). Rezonans frekansı, yama elemanındaki elektromanyetik dalganın boyutlarına bağlıdır ve eşitlik 2.1 ile hesaplanır:[1]

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu}\epsilon} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (2.1)$$

Buradaki parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

m : Yükseklik yönündeki mod numarası.

n : Uzunluk yönündeki mod numarası.

p : Genişlik yönündeki mod numarası.

h : Dielektrik rezonatörün yüksekliği.

L : Dielektrik rezonatörün uzunluğu.

W : Dielektrik rezonatörün genişliği.

M : Manyetik geçirgenlik.

ϵ : Dielektrik geçirgenlik

Mikroşerit yamanın genişliği (W) eşitlik 2.2 numaralı formül ile belirlenir:

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0}\epsilon_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.2)$$

Dielektrik malzeme kalınlığı ve yamanın genişliği gibi fiziksel özellikler, yamanın etkili dielektrik sabitini (ϵ_{eff}) belirler:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-0.5} \quad (2.3)$$

Kenar etkilerinden dolayı yamanın etkili uzunluğunda düzeltme yapılır:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (2.4)$$

Yamanın etkili uzunluğu (L_{eff}) 2.5 numaralı eşitlikteki formülle bulunur:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.5)$$

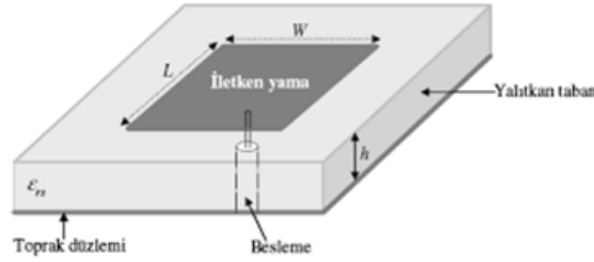
Kenar düzeltmelerinden sonra yamanın gerçek uzunluğu 2.6 numaralı denklem ile ifade edilir:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.6)$$

2.1.2. Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenlerin beslenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Başlıca yöntemler arasında koaksiyel besleme, mikroşerit besleme, açıklık bağlaşımlı besleme yöntemi yer alır. Bu yöntemlerin en yaygın kullanılanları koaksiyel besleme ve mikroşerit besleme teknikleridir.

Koaksiyel besleme yönteminde, koaksiyel konektör toprak düzleminin alt tarafından sabitlenir ve merkezi iletken, yama bölgesine kadar uzanır, Şekil 2.2'deki gibidir. Bu yöntemde, empedans uyumunu sağlamak için besleme noktasının yamanın üzerinde bulunduğu iki boyutlu konumu büyük önem taşır. Mikroşerit besleme yönteminde ise besleme hattı, yama ile aynı malzemeden ve aynı kalınlıkta üretilir, bu da bu yöntemin en büyük avantajlarından biridir. Mikroşerit besleme hattı, anten yapısının bir uzantısı olarak işlev görür.



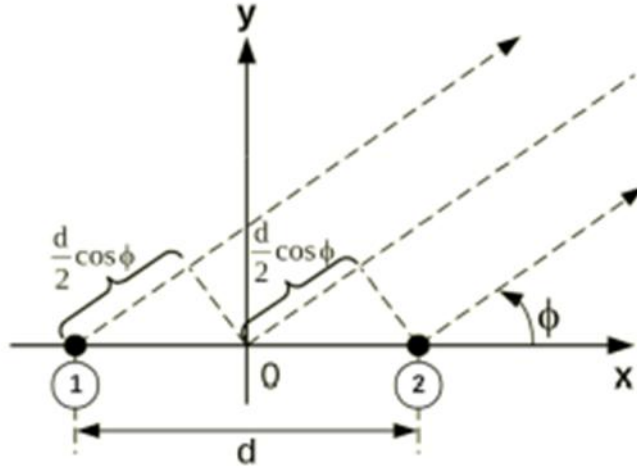
Şekil 2.2 Koaksiyel Besleme Hattı Örneği

2.2. Dairesel Polarizasyonlu Dizi Anten Tasarımı

Dizi anten, birbiriyle uyumlu şekilde çalışacak şekilde tasarlanmış birden fazla antenin bir araya gelerek oluşturduğu bir sistemdir. İstenilen ışınlam modelini elde etmek için çeşitli elemanlardan yayılan girişim modelinden yararlanılır. Bu antenler, yönlülüğü artırmak, kazancı yükseltmek ve belirli bir ışınlam deseni elde etmek amacıyla tasarlanır. Dizinin geometrisi ve her bir elemanın yerleşim aralığı, dizi antenin ışınlam karakteristiğini belirler. Ayrıca, elemanlar arasındaki faz ve genlik farkları, dizi antenin toplam ışınlam desenini şekillendirir. Mikroşerit antenler, tek başına kullanıldığı gibi anten kazancını artırmak ve elektronik hüzme yönlendirmek gibi amaçlar için bir diziyi oluşturan anten elemanları olarak da kullanılırlar.

Mikroşerit antenler tek elemanlı olduğu gibi diziler halinde de kullanılırlar [1, 8 ve 13]. Haberleşme sistemlerinde dizi anten kullanarak antenin performansı artırılabilir,

örneğin kazancı, yönlülüğü artırarak, anten demeti taranabilir ve tek bir elemanla yapılması zor olan diğer işlevselliği sağlanır.



Şekil 2.3. Düzgün Aralıklı Anten Dizisi

Yama dizi antenlerinin toplam ışıma deseni, diziyi oluşturan bireysel anten elemanların ışıma deseni ile dizi faktörünün çarpımı ile elde edilir:

$$E_{total}(\theta, \phi) = E_{eleman}(\theta, \phi) \cdot AF(\theta, \phi) \quad (2.7)$$

$E_{eleman}(\theta, \phi)$: Tek bir yama elemanının ışınlama deseni,

$AF(\theta, \phi)$: Dizi faktörü (array factor).

Birbirine dik eksenlerde bulunan M ve N sayıdaki antenden oluşan dizi antenlerde Dizi faktörü, MxN adet anten elemanının genlik ve faz kontrolüne bağlı olarak 2.8 numaralı denklemdeki gibi ifade edilir:[1]

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} e^{j(k_z m d_x \sin \theta \cos \phi + k_y n d_y \sin \theta \cos \phi)} \quad (2.8)$$

I_{mn} : m ve n konumundaki anten elemanının genlik ve fazını temsil eden kompleks genlik,

d_x, d_y : X ve Y eksenleri boyunca anten elemanları arasındaki mesafe.,

ϕ_n : N'inci elemanın fazı,

k_y, k_z : Y ve Z eksenlerindeki dalga sayıları ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$),

θ, ϕ : Gözlem noktasının yükseliş (elevation-zenit) ve yanca (azimuth) açıları.

λ : Sinyalin dalga boyu.

Elemanlar arasındaki mesafe (Şekil 2.3) (d), dizi antenin ışınlım desenini doğrudan etkiler, ışınlım deseninde ikincil ana hüzmeye (grating lobe) çıkmaması için $d < \lambda/2$ koşulunun sağlanmasına dikkat edilmesi gerekir.

Yönlülük, dizi antenin belirli bir yöndeki radyasyon yoğunluğunu ifade eder:

$$D = N \cdot D \quad (2.9)$$

N : Anten elemanlarının toplam sayısı,

D : Tek bir yamanın yönlülüğü (directivity).

Dizi antenlerinin kazancı, yönlülük ile anten verimliliği çarpımı ile elde edilir:

$$G = \eta \cdot D \quad (2.10)$$

η : Anten verimliliği.

Radyasyon deseni, elemanlar arasındaki faz farkları ile kontrol edilir. Faz farkı şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta\phi_x = \frac{2\pi d_x}{\lambda} \cdot \sin\theta \cos\phi \quad (2.11)$$

$$\Delta\phi_y = \frac{2\pi d_y}{\lambda} \cdot \sin\theta \cos\phi \quad (2.12)$$

d_x : Elemanların x-ekseni boyunca arasındaki mesafe

d_y : Elemanların y-ekseni boyunca arasındaki mesafe

θ : Ana hüzmeyin yönlendirildiği açı.

2.3. Katmanlı Parazitik Yama Anten Yapısı Tasarımı

Mikroşerit anten tasarımında kullanılan ve ana yama anten ya da dizi anten üzerine veya altına gelecek şekilde yerleştirilen pasif yamaların olduğu yapı, Parazitik Yama yapısı olarak isimlendirilir. Genel olarak, farklı şekillerdeki yamalar, dielektrik bir alt tabaka üzerinde uygun konumlara yerleştirilir ve bu alt tabaka yer düzlemi üzerinde desteklenir [16].

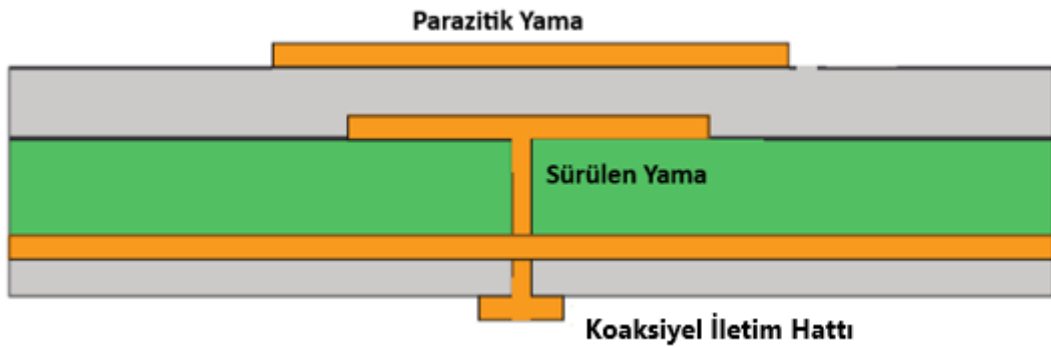
Bu yapıda, üst katmandaki parazitik yamalar, ana diziden biraz daha düşük bir frekansta rezonansa girer. Bu durum, ana yama anten dizisi ile parazitik yama dizisi arasında elektromanyetik bağlaşmaya neden olur ve nihayetinde iki rezonans frekansı ile çok daha geniş bir bant genişliği sağlar. İki dizi arasındaki bağlaşma, ana yama anten ile parazitik katman arasındaki hava boşluğunun yüksekliğine bağlıdır. Yüksekliğin küçük olması durumunda daha büyük bir bağlaşma meydana gelir. Bu tezde, ana anten dizisi üzerinde, parazitik dizi bulunan bir katman kullanılarak bant genişliğinin artırılması sağlanmıştır.

Bu yapıda, parazitik elemanlar, mikroşerit yamanın rezonans frekansına çok yakın bir frekansta rezonansa girer ve bunun sonucunda anten kazancı artar. Bu teknik aynı zamanda çift rezonans fenomeni tekniği olarak da bilinir [27].

Bu çalışmada tasarlanan anten, daha büyük bir kazanç ve daha iyi bir bant genişliği elde etmek için ana mikroşerit yama dizi antenin üst katmanına dördü yama yapısı ilave edilmesiyle oluşturulmuştur.

2.3.1. Kapasitif Bağlaşım

Parazitik yama, ana yamanın üzerine yerleştirilir ve iki yama arasındaki kapasitif etkileşim antenin empedans uyumunu ve bant genişliğini artırır [5]. Şekil 2.4'te kapasitif parazitik yamanın örneği verilmiştir. Bu yamalar antenin empedans uyumunu iyileştirmek, bant genişliğini artırmak ve istenilen frekanslarda çalışma özelliklerini optimize etmek amacıyla kullanılır. Parazitik elemanların geometrisi ve konumu, antenin performans parametrelerini doğrudan etkiler. Özellikle, parazitik elemanların boyutları ve ana yama ile aralarındaki mesafe, antenin rezonans frekanslarını ve bant genişliğini belirlemede kritik rol oynar.



Şekil 2.4 Kapasitif Parazitik Düzlemsel Örneği

2.3.2. İndüktif Bağlaşım

Parazitik yama, ana yamanın yanına yerleştirilir, indüktif etkileşim antenin ışınlama desenini şekillendirir ve kazancı artırır [18].

2.3.3. Parazitik Yama Yapısının Hesaplamaları

Parazitik yamanın boyutları ve rezonans frekansı hesaplanırken ana yama antene yakın bir frekansta çalışacak şekilde tasarlanır. Parazitik bileşenlerin kullanımı, düşük profilli antenlerin boyutlarını önemli ölçüde artırmadan veya performanslarını düşürmeden kazançlarını artırmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. [18] Şekil 2.5'te parazitik yama modelinin boyutları gösterilmiştir.

$$f_{r,p} = \frac{c}{2L_p \sqrt{\epsilon_{eff,p}}} \quad (2.13)$$

L_p : Parazitik yamanın uzunluğu

$\epsilon_{eff,p}$: Parazitik yama için etkili dielektrik sabiti.

Ana ve parazitik yamalar arasındaki rezonans frekans farkı:

$$\Delta f = f_{r,p} - f_{r,a} \quad (2.14)$$

Burada $f_{r,a}$ ana yamanın rezonans frekansıdır.

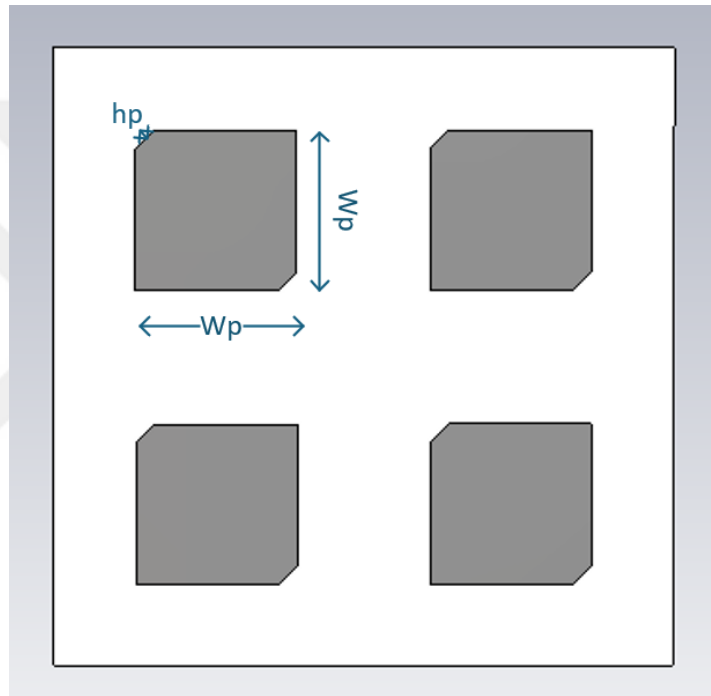
Parazitik yamanın etkili dielektrik sabiti şu şekilde hesaplanır [26]:

$$\epsilon_{eff,p} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h_p}{W_p} \right)^{-0.5} \quad (2.15)$$

ϵ_r : Dielektrik malzemenin göreceli dielektrik sabiti,

h_p : Parazitik yamanın kalınlığı,

W_p : Parazitik yamanın genişliği.



Şekil 2.5 Parazitik Yamanın Gösterimi

Parazitik yama katmanı ile ana yama anten dizisinin arasındaki fark ($h_{parasitic}$), aşağıdaki gibi hesaplanır [21]:

$$h_{parasitic} \approx \frac{\lambda_g}{10} \quad (2.16)$$

Burada λ_g , ana yamanın bulunduğu ortamdaki dalga boyudur.

2.4. Yüksek Performanslı Dielektrik Malzemeler

Elektromanyetik dalgaların bir ortamda nasıl yayıldığını ve bu ortamdan elektrik alana nasıl tepki verdiğini tanımlayan parametre, ϵ (elektriksel geçirgenlik katsayısı) ile ifade edilir [9]. Boş uzayın elektriksel geçirgenliği (ϵ_0) $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ' ye eşittir.

Diğer malzemeler, bu değeri temel alarak belirli bir dielektrik katsayısına (ϵ_r) sahip olacak şekilde tanımlanır [9]. Dielektrik malzemeler, yama anten karakteristiğini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Mikroşerit yama antenlerin, yama elemanı ve toprak düzlemi arasında yer alır. Kullanılan taban malzemesinin dielektrik sabiti “ ϵ_r ” olarak gösterilir. Dielektrik sabiti, malzemenin elektromanyetik dalgalara nasıl tepki verdiğini gösterir[6]. Bu malzemenin kalınlığı (h) antenin bant genişliğini, kazancını ve empedansını doğrudan etkiler. Taban malzemesi malzemesinin dielektrik sabitinin düşük olması, kalınlığının yüksek olması, antende ideal ışımayı sağlamasının yanı sıra frekans bant genişliğini de artırmaktadır.[1]

$$\epsilon = \epsilon_0 \chi \epsilon_r \quad (2.17)$$

$$f_r = \frac{c}{2L_p \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.18)$$

2.5. Antenler Hakkında Temel Bilgiler

2.5.1. Kazanç

Bir antenin kazancı (belirli bir yönde) “anten tarafından kabul edilen gücün izotropik olarak ışıması durumunda elde edilecek ışıma yoğunluğunun, belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğuna oranı” olarak tanımlanır. İzotropik olarak yayılan güce karşılık gelen ışıma şiddeti, anten tarafından kabul edilen (giriş) gücün 4π 'ye bölünmesine eşittir.” [1]

Antenin kazancı yönlülükle yakından ilişkili olsa da antenin yönlülük yeteneklerinin yanı sıra verimliliğini de dikkate alan bir ölçüdür. Yönlülüğün antenin sadece yönsel özelliklerini tanımlayan bir ölçüdür ve bu nedenle sadece örüntü tarafından kontrol edilmektedir.

Bağıl kazanç genellikle "belirli bir yöndeki güç çıkışının, referans alınan bir antenin aynı yöndeki güç çıkışı ile oranı" olarak tanımlanır. Her iki antenin de aynı güçle beslenmesi gerekir. Referans anten genellikle bir dipol, horn veya kazancı bilinen başka bir anten olabilir. Ancak, çoğu durumda, referans olarak kayıpsız izotropik bir anten tercih edilir.

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}(kayıpsız izotropik kaynak)} \quad (2.19)$$

$U(\theta, \phi)$:Antenin belirli bir yönde yaydığı radyasyon yoğunluğu

2.5.2. Yönlülük

Bir antenin yönlülüğü, antenden belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun tüm yönlerin ortalaması alınmış ışıma yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Ortalama ışıma

yoğunluğu, anten tarafından yayılan toplam gücün 4π 'ye bölünmesine eşittir. Yön belirtilmemişse, yönlülük değeri maksimum radyasyon yoğunluğunun yönü olarak ifade edilir [1].

Daha basit bir ifadeyle, izotropik olmayan bir kaynağın yönlülüğü, belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun izotropik bir kaynağınkine oranına eşittir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.20)$$

2.5.3. Anten Verimliliği

Toplam anten verimliliği e_0 , giriş terminallerindeki ve antenin yapısındaki kayıpları hesaba katmak için kullanılır.

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.21)$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.22)$$

$VSWR$ = voltage standing wave ratio

e_0 = toplam verimlilik

e_r = yansıma (uyumsuzluk) verimliliği

e_c = iletim verimliliği

e_d = dielektrik verimliliği

Γ = antenin giriş uçlarındaki gerilim yansıma katsayısı

Genellikle e_c ve e_d 'nin hesaplanması çok zordur, ancak deneysel olarak belirlenebilirler. Bu yüzden genelde eşitlik 2.22 kullanılır:

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (2.23)$$

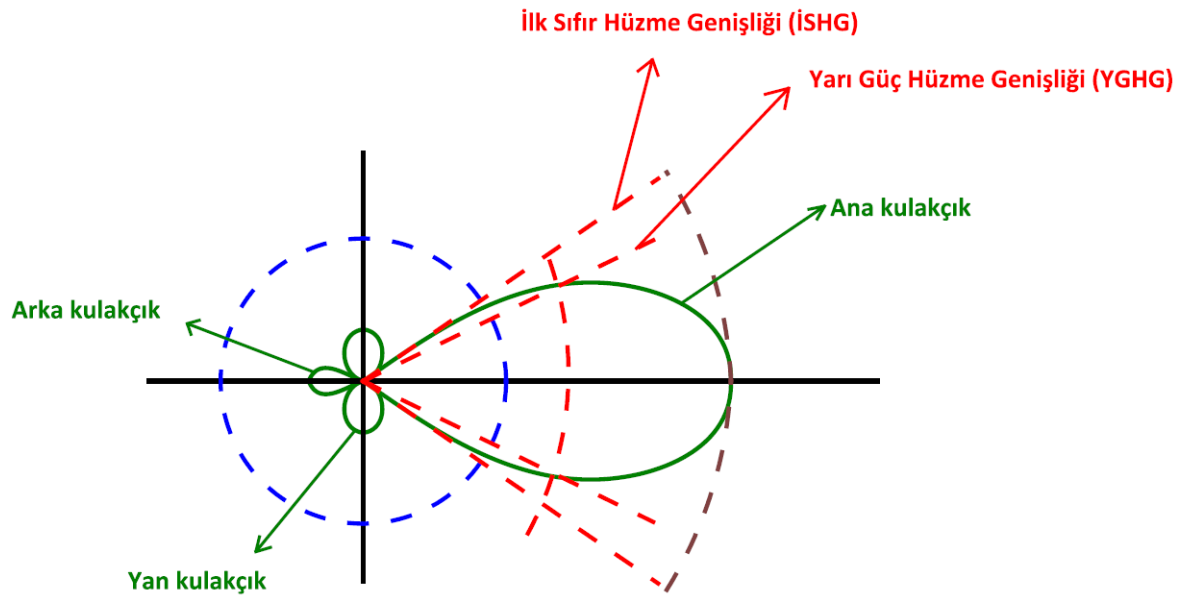
2.5.4. Işıma Örüntüsü

Bir anten tarafından yayılan gücün, uzayda farklı konumlarda antenden uzaklaşan yönün bir fonksiyonu olarak değişimi anten ışıma örüntüsü olarak tanımlanır. Varış açısının bir fonksiyonu olarak bu güç değişimi antenin uzak bölgesinde ölçülür. Eğer ışıma örüntüsü tüm yönlerde aynı ise, bu antene izotropik anten örüntüsü denir. Pratikte, izotropik ışıma örüntüsüne sahip antenler mevcut değildir, ancak izotropik ışıma örüntüsü gerçek antenlerin kazanç ve örüntülerini karşılaştırmak için bir referans olarak kullanılır.[2]

Hüzme genişliği, enerjinin çoğunun antenden yayıldığı açıklık açısıdır. Yayılan enerjinin tepe seviyesinin yarısına (%50) düştüğü açı yarım güç ışın genişliği (veya $-3 - dB$ noktası olarak adlandırılır, Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Yarım güç ışın genişliğinin birimi radyan veya derecedir.

Ana lob: Antenin en güçlü şekilde radyasyon yaptığı yönü ifade eder ve antenin temel performans özelliklerini tanımlar.

Yan lob: Antenin istenmeyen yönlerde yayılan radyasyonunu gösterir ve bu durum sinyal bozulmaları ve enerji kayıpları gibi problemlere neden olabilir.



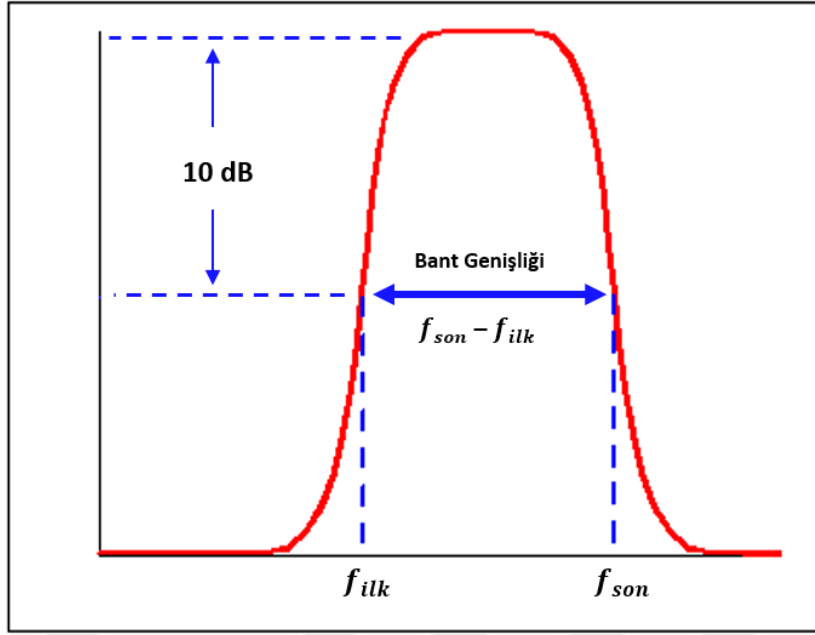
Şekil 2.6. Hüzme Genişliği Grafiği

2.5.5. Bant Genişliği

Bir antenin bant genişliği, bir merkez frekansın her iki tarafında, anten özelliklerinin; giriş empedansı, örüntü, demet genişliği, polarizasyon, yan lob seviyesi, kazanç, demet yönü, ışıma verimliliği gibi merkez frekanstakilerin kabul edilebilir bir değeri içinde olduğu frekans aralığı olarak açıklanabilir, Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.

Geniş bantlı antenler için bant genişliği genellikle kabul edilebilir çalışma frekanslarının alt-üst oranı olarak ifade edilir. Örneğin, 10:1 bant genişliği, üst frekansın alt frekanstan 10 kat daha büyük olduğunu gösterir.

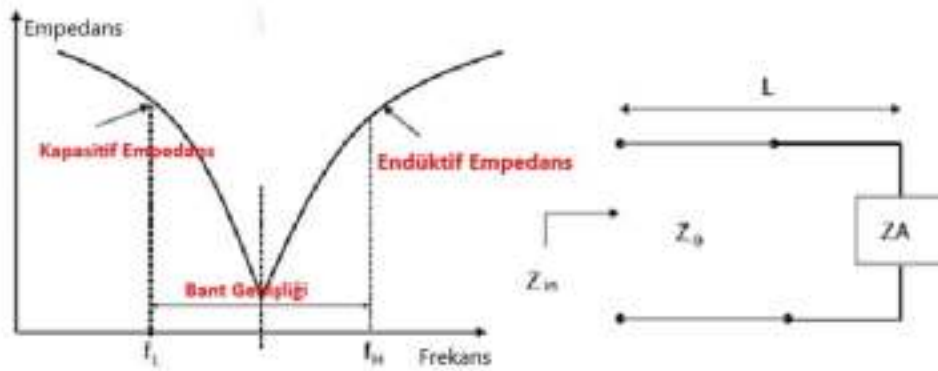
Dar bantlı antenler için bant genişliği frekans farkının yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin, %5 bant genişliği, kabul edilebilir çalışma frekans aralığının, merkez frekansının %5'i olduğunu gösterir.[1]



Şekil 2.7. Bant Genişliği Grafiği

2.5.6. Empedans Uyumlandırma

Bir antenin empedansı, giriş terminalindeki voltajı akımla ilişkilendirir ve gerçek ve sanal kısımlardan oluşur (direnc ve reaktans). Anten empedansının reaktans kısmı, endüktif ve kapasitif olarak frekansla birlikte değişir. Bir antenin iki tür direnci vardır: Şekil 2.8'de gösterildiği gibi ışıma direnci ve kayıp (Omik) direnc. Işıma direnci, ışımaya dönüşen enerjiye karşılık gelen kısımdır. Kayıp (Omik) direnci ise, elektrik gücünü ısıya dönüştüren anten yapısının kaybıdır. Etkili radyasyon ve verimlilik için radyasyon direnci omik dirençten çok daha yüksek olmalıdır.

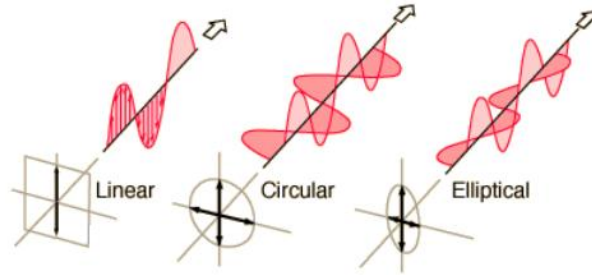


Şekil 2.8. (a) Anten Empedansı ve Bant Genişliği Diagramı (b) Anten Direnc Modeli

2.5.7. Polarizasyon

Elektrik alanının, yayılım yönüne dik bileşenlerinin oluşturduğu bileşke vektörünün zamanla değişimi bir antenin polarizasyonunu tanımlar. Polarizasyon doğrusal, dairesel ya

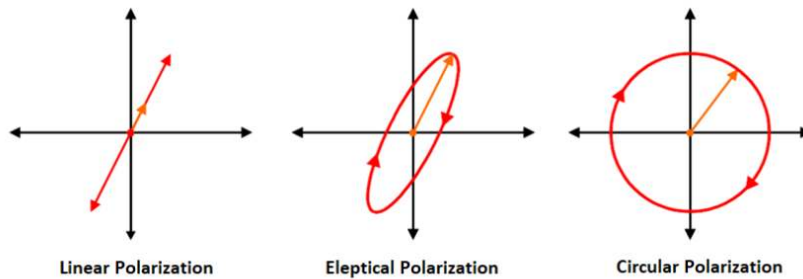
da eliptik olabilir (Şekil 2.9.). Doğrusal polarizasyon yatay, dikey veya ikisinin bileşen biçimindedir. Çift kutuplu antenler ayrı terminaller üzerinden hem dikey hem de yatay polarizasyon üretebilir. Dairesel polarizasyon, antenin yaydığı elektrik alanının yayılma eksenini boyunca döndüğünde oluşur. Dönme yönüne bağlı olarak polarizasyon sağa veya sola doğru olur. Antenler hiçbir zaman mükemmel şekilde polarize olmaz. E-düzlemine dik düzlemdeki veya dairesel polarizasyonun karşı tarafındaki enerji miktarı çapraz polarizasyon ile ölçülür. Bu değer genellikle antenin tepe kazancına göre verilir.[2]



Şekil 2.9. Polarizasyon Çeşitleri

2.5.8. Eksenel Oran

Eksenel oran, antenlerde dairesel polarizasyon özelliğini tanımlayan bir ölçüttür. Bu oran, elektrik alan vektörünün büyük ve küçük eksenlerinin genlik oranı olarak ifade edilir. İdeal dairesel polarizasyona sahip antenlerde eksenel oran genellikle bir olarak kabul edilir. Antenin polarizasyon performansını belirleyeme kritik bir parametre olan eksenel orana göre polarizasyon çeşitliliği ortaya çıkar. Şekil 2.10'da polarizasyon çeşitliliği gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Eksenel Orana Göre Polarizasyon Çeşitleri

2.5.9. S Parametreleri (Saçılma Parametreleri)

S-parametreler (Saçılma Parametreleri), antenlerin ve RF/mikrodalga devrelerinin giriş ve çıkış özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu parametreler, özellikle antenlerde empedans uyumu, geri dönüş kaybı ve iletim özelliklerini tanımlamak

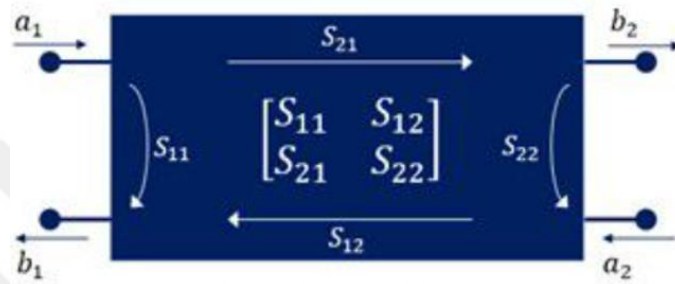
ve ölçmek açısından büyük bir öneme sahiptir, Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. S-parametre analizi, anten ve devre tasarımında sinyalin iletim ve yansıma özelliklerini detaylı bir şekilde anlamaya olanak sağlar.

$$b_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} a_j \quad (2.24)$$

b_i : i'inci terminalden yansıyan veya iletilen dalga,

a_j : j'inci terminale gönderilen dalga,

S_{ij} : j'inci terminale gelen dalganın i'inci terminalden nasıl iletilildiğini veya yansıtıldığını gösterir.



Şekil 2.11. S parametreleri Şeması

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 \quad (2.25)$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 \quad (2.26)$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{V + Z_0 I}{\sqrt{|Re\{Z_0\}|}} \quad (2.27)$$

$$b = \frac{1}{2} \frac{V + Z_0^* I}{\sqrt{|Re\{Z_0\}|}} \quad (2.28)$$

2.5.9.1. S11 (Yansıma Kaybı)

Antenin giriş terminale gönderilen sinyalin, aynı terminalden geri yansıyan kısmını S11 olarak tanımlanmaktadır. Formülü eşitlik 2.28'de verilmiştir.:

$$S_{11} = 10 \log_{10} \left| \frac{P_{yansıyan}}{P_{gönderilen}} \right| \quad (2.29)$$

S11 değerinin -10 dB'den daha düşük olması, yansıyan gücün, gönderilen gücün 10 katından daha az olduğunu gösterir. Birçok anten uygulamasında, S11 değerinin -10 dB'den daha aşağıda olan bölgesi, 10 dB empedans bandı olarak tanımlanır ve kabul gören bir sınır değeri olarak kullanılmaktadır.

2.5.9.2. S21 (İletim Katsayısı)

Giriş portundan gelen dalganın çıkış terminaline iletilen kısmını ifade eder. İletim katsayısı, giriş enerjisinin ne kadarının diğer terminale aktarıldığını gösterir.

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (2.30)$$

2.5.9.3. S12(Ters İletim Katsayısı)

Çıkış portundan gelen dalganın giriş terminaline iletilen kısmındır. Ters iletim katsayısı, sistemin iki terminal arasındaki enerji transferinin ne kadar simetrik olduğunun da bir göstergesidir.

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (2.31)$$

2.5.9.4. S22 (Çıkış Terminaline Yansıma Katsayısı)

Çıkış terminaline gelen dalganın, aynı porttan geri yansıyan kısmını ifade eder. Çıkış terminalindeki empedans uyumunu gösterir.

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (2.32)$$

3. TASARIM METODOLOJİSİ

3.1. Yama Anten Boyutlarının Belirlenmesi

Bu bölümde, mikroşerit yama antenin tasarımında kullanılan temel hesaplamalar gösterilmiştir. 2.1.1. bölümde verilen eşitlikler kullanılarak, Tablo 1.1'deki anten gereksinimlerini sağlayacak mikroşerit yama anten fiziksel ölçüleri belirlenmiş ve Tablo 3.1. gösterilmiştir. Dielektrik malzemenin fiziksel özellikleri, istenilen çalışma frekansına göre yama ve toprak arasındaki mesafenin ayarlanması, analiz sonuçlarına doğrudan etki ettiği için bu değişkenler göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmış ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Diğer önemli hesaplama, empedans uyumlamasıdır. Anten ve besleme arasındaki empedans uyumlaması bu bölümde gösterilmiştir. Kaynak empedansı, iletim hattının karakteristik empedansı ve yük empedansı arasındaki uyumsuzluklar, sinyalin bir kısmı veya tamamının yansımaya neden olur. Bu durum empedans uyumsuzluğu olarak ifade edilir ve istenmeyen bir durumdur [3]. Empedans uyumsuzluğu, uygulamalarda olumsuzluklara yol açabilir. Bunların en önemlisi, elektromanyetik dalganın geri yansıyan kısmıdır. Dalganın tamamı iletim hattından yük kısmına iletilmezse bir kısmı geri döner. Yansıma meydana geldiğinde, iletim hattı üzerinde aynı anda hem ilerleyen dalga hem de yansıyan dalgalar oluşur. Bu iki dalganın aynı anda bulunduğu duran dalga oluşur [9]. Kaynağa yansıyan dalga, kaynağa fiziksel olarak zarar verecektir. Empedans uyumsuzluğundan dolayı antene aktarılan güç az olacaktır. Bu durum alıcı verici sistemlerde sinyal kalitesini düşürecek ve sinyalin gürültü tabanını yükseltecektir. Bu durum antenin çalışma bant genişliğini azaltacaktır [5].

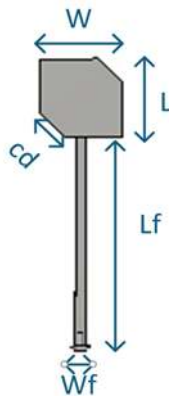
Tasarımda dielektrik malzeme olarak Rogers 6002 serisi taban malzemesi kullanılmıştır. Anten çalışma frekansı ISM bandı içinde olan $f_0 = 2.4$ GHz olarak seçilmiştir. Bu şekilde tasarlanan yama antenin geniş bir kullanım alanına sahip olması amaçlanmaktadır. Genel anten özellikleri Tablo 3.1.'de yer almaktadır.

Bu çalışmada, kare mikroşerit yama antenin diyagonal köşelerinin kesilmesiyle dairesel polarizasyon özelliğine sahip bir mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Söz konusu tasarım, antenin iki temel modunun faz farkını $\pm 90^\circ$ olacak şekilde optimize ederek dairesel polarizasyon elde edilmesini sağlamıştır. Bu yöntem, antenin polarizasyon performansını optimize etmeyi amaçlayan etkili bir tasarım stratejisi olarak benimsenmiştir. Dairesel polarizasyonun tercih edilmesinin temel nedeni, bu

polarizasyon tipinin elektromanyetik dalgaların iletim ve alım süreçlerinde sunduğu önemli avantajlardır. Özellikle uydu haberleşme uygulamalarında, dairesel polarizasyon farklı yönelimlerdeki alıcılar arasında uyumluluk sağlayarak polarizasyon kaybını en aza indirir ve sinyal bütünlüğünü artırır. Bu sayede, dönen ya da yönelim değişikliği yapan uydu platformları ile yer istasyonları arasındaki iletişimde kararlılık sağlanır. Uydu haberleşme sistemlerinde bu özellikler, özellikle yüksek güvenilirlik ve verimlilik gerektiren uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Bu nedenlerle, dairesel polarizasyon, bu tür uygulamalar için tercih edilmiştir.

Yamanın kesim boyutları (L_c) antenin rezonans frekansına göre belirlenir. Kesim uzunluğu teorik olarak kenar uzunluğunun %5-15'i arasında seçilebilir [20]. Bu tasarımda CST tasarım aracının optimizasyonu ile uygun kesim boyutu bulunmuştur.

Bir yama antenin tasarımındaki en önemli adımlardan biri, uygun kalınlıkta (h) ve düşük kayıp tanjantına sahip bir dielektrik taban malzemesi seçmektir. Daha kalın bir alt tabaka, mekanik olarak güçlü olmasının yanı sıra, radyasyon gücünü artıracak, iletken kaybını azaltacak ve empedans bant genişliğini iyileştirecektir. Bununla birlikte, ağırlığı, dielektrik kaybını, yüzey dalgası kaybını ve besleyiciden gelen yabancı radyasyonları da artıracaktır. Taban malzemesi için düşük bir elektriksel geçirgenlik değeri, yama çevresindeki saçaklanma alanını ve dolayısıyla yayılan gücü artıracaktır. Bu nedenle, tasarımlarımızda $\epsilon_r = 2.94$ olan alt tabaka kullanılmıştır. Yüksek kayıp tanjantına sahip malzemeler, dielektrik kaybını artırır ve dolayısıyla anten verimini düşürür.[4] Şekil 3.1.'de gösterilen boyutlar Tablo 3.1'de açıklanmıştır.

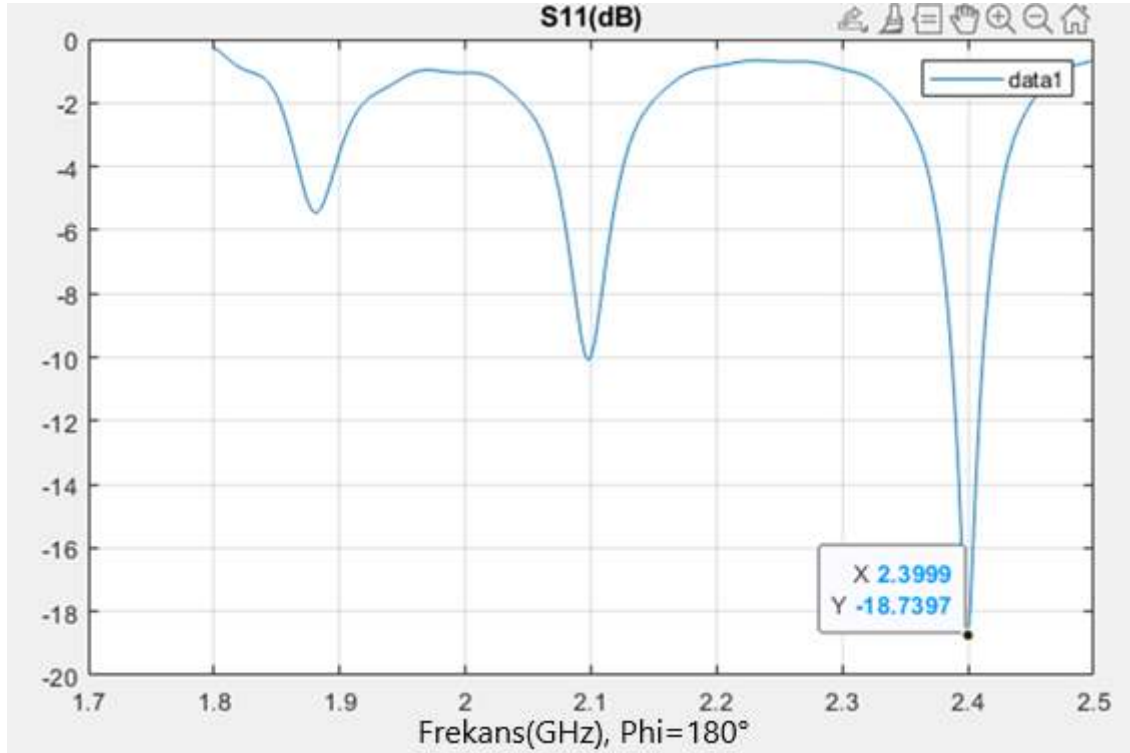


Şekil 3.1 Yama Anten Boyutları

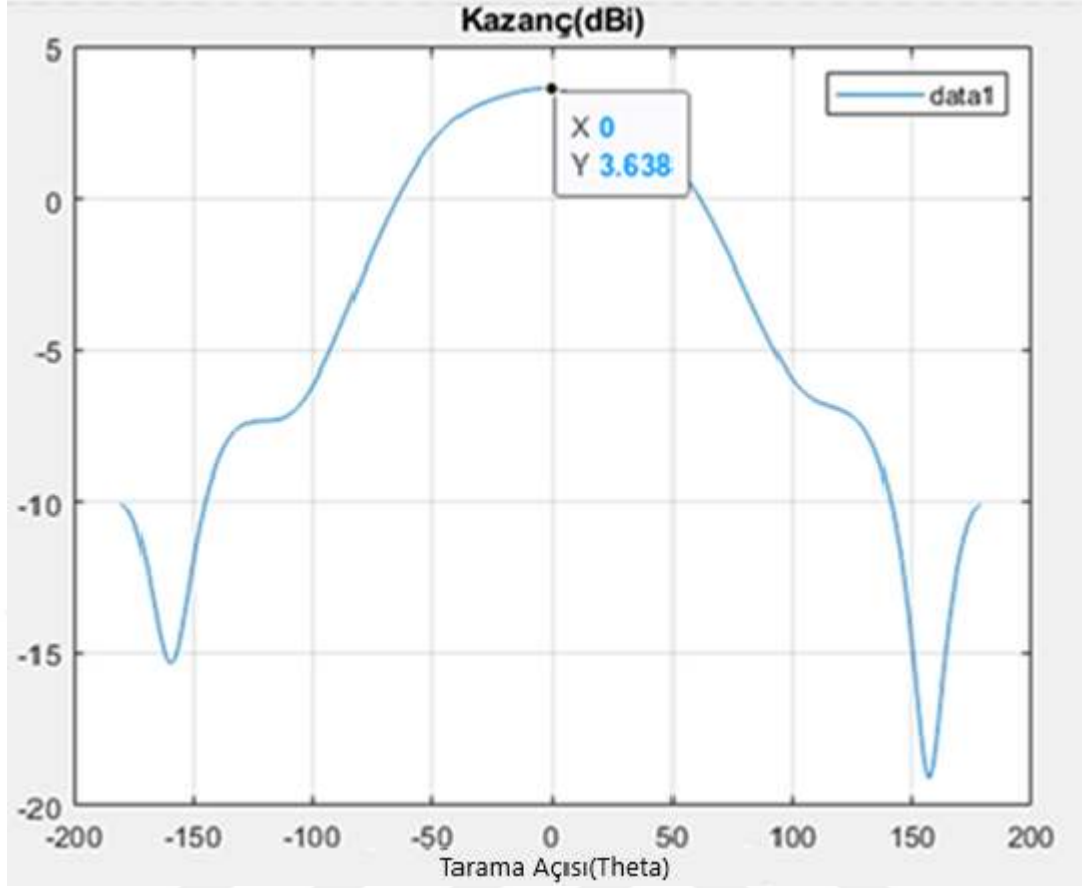
Tablo 3.1 Tek Yama antenin özellikleri

Parametreler	Değerler
Yama Genişliği (W) (mm)	28.6
Yama Yüksekliği (L) (mm)	0.035
Çalışma frekansı (f) (GHz)	2.4
Dielektrik katsayısı (ϵ_r)	2.98
Dielektrik kalınlığı (h) (mm)	1.52
Beslemenin Genişliği (W_f) (mm)	0.05
Dairesel Polarizasyon İçin Kesik (C_d) (mm)	8.69

CST Tasarım aracının simülasyon sonuçları Şekil 3.2 ve 3.3'teki gibidir. Yapılan analizin sonunda mikroşerit yama antenin rezonans frekansının, tasarlandığı gibi $f_0 = 2.4$ GHz'te olduğu, bu frekansta elde edilen S11 değerinin -18.73 dB olduğu görülmektedir. (Şekil 3.2). Bu antenin yansıma katsayısı S11 değerinin -10 dB değerinden daha küçük olduğu bant genişliği 50 MHz olmaktadır. Tablo-1.1 de verilen gerekleri incelendiğinde, istenilen özelliklerin sağlanamadığı görülmektedir.

**Şekil 3.2.** Tek Yama Antenin Yansıma Katsayısı (S11) Grafiği

Şekil 3.3'te verilen kazanç grafiği, 2.4GHz'de kazancın 3.63dBi olduğunu göstermektedir.



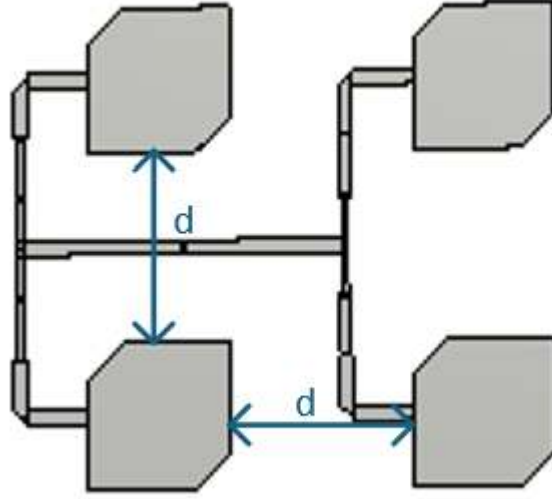
Şekil 3.3. Tek Yama Antenin Kazanç Grafiği (2.4 GHz)

3.2. Dizi Anten Tasarımı

Tablo 1.1'deki gereksinimler temel alınarak mikroşerit yama antenlerindeki kazanç arttırımı için 2x2 mikroşerit yama dizi anteni tasarlanmış ve bu çalışmada 2.4GHz merkez frekansında, yüksek kazançlı dairesel polarizasyona sahip dizi yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. 2x2 RHCP dizi antenin tasarımı, Bölüm 2.2'de verilen formülasyon ve CST yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup, optimize edilen fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de, yamalar arasındaki mesafeler ise Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Yamalar arasındaki mikroşerit besleme hattının uzunluğu anten dizisi elemanları arasındaki faz dağılımını belirler. Bu çalışmada besleme hatlarının uzunluğu her anten için eşittir. Bu sayede faz farkı oluşmamaktadır. Bir girişli besleme ile 4 anten eşit şekilde beslenmektedir. Yamaların arasında mesafeler ve yama boyutları Bölüm 2.2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, CST Studio Suite programı yardımıyla optimize edilmiş ve Tablo 3.2'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Yama anten ve parazitik yamalar için, bakır kalınlığı 0.035mm olan Rogers 6002 serisi taban malzemesi kullanılmıştır. Hem alt tabaka hem de taban malzemesi, 1.52 mm kalınlığında Rogers 6002 malzemesinden üretilmiştir.



Şekil 3.4. Dizi Yama Antenin Üsten Görünümü

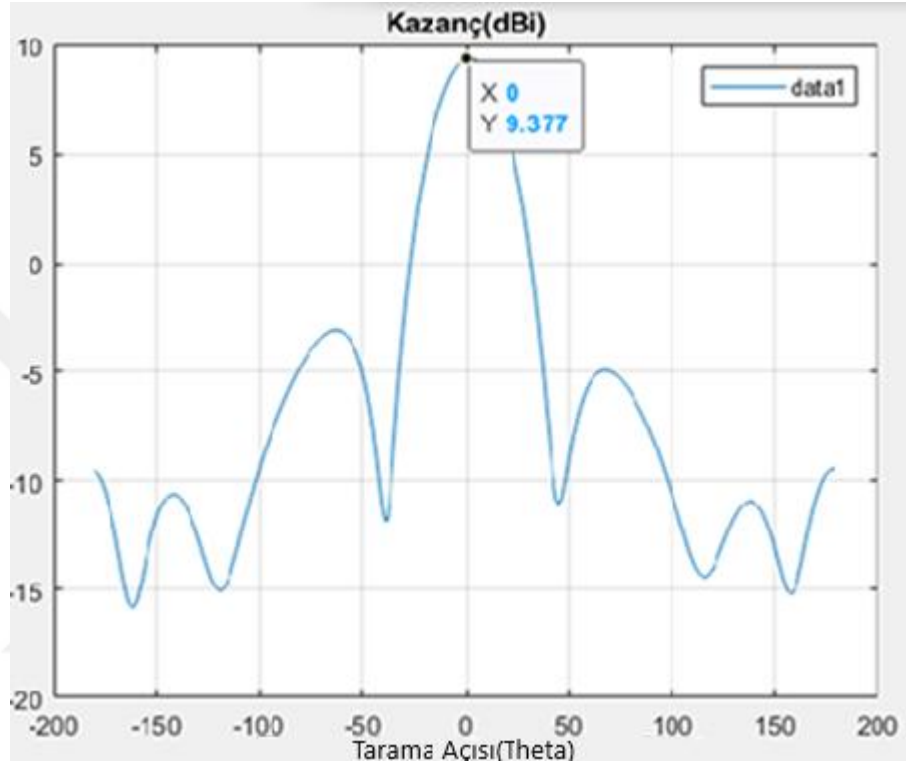
Tablo 3.2. Dizi Yama Antenin Özellikleri

Parametreler	Değerler
Çerçevenin Boyutu (mm)	180x180
Yama Genişliği (W) (mm)	36.94
Yama Yüksekliği (L) (mm)	36.94
Çalışma frekansı (f) (GHz)	2.30-2.50
Dielektrik katsayısı (ϵ_r)	2.94
Dielektrik kalınlığı (h) (mm)	1.52
Antenler arasındaki mesafe(d) (mm)	42.75
Dairesel Polarizasyon İçin Kesik (Ld) (mm)	8.69

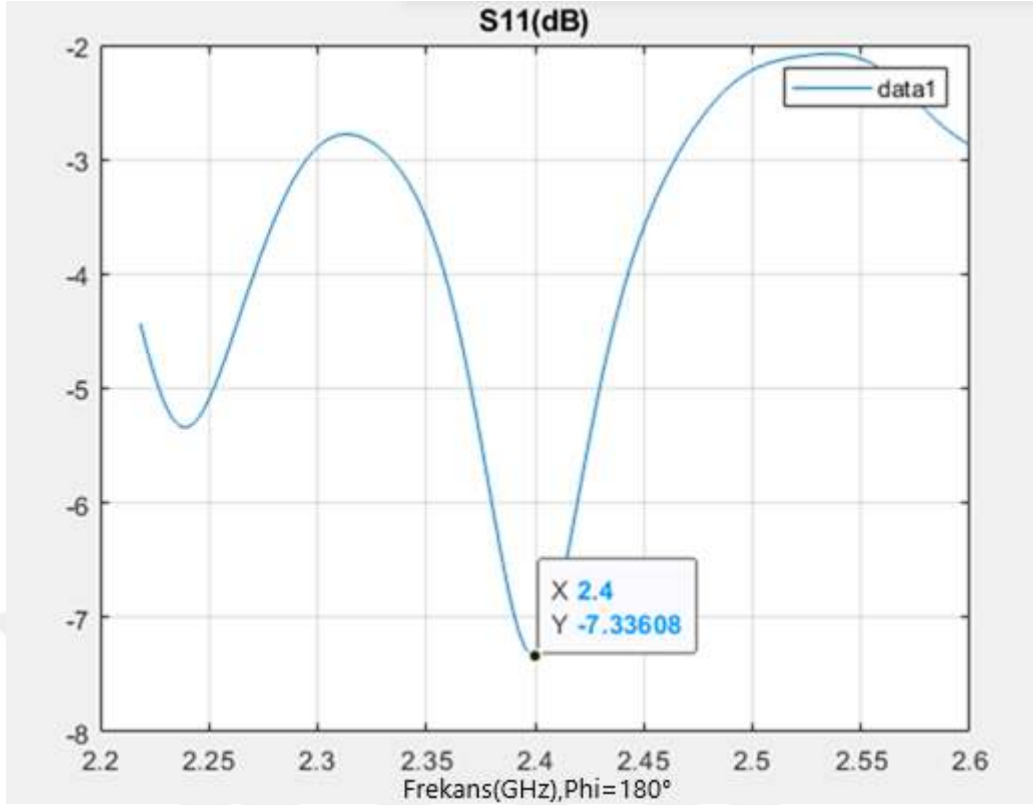
Antenin, analizler sonucunda elde edilen kazanç, yansıma katsayısı (S11) ve ışıma deseni değerleri, sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

2x2 dizi antenin parazitik yama kullanılmadan kazanç grafiği Şekil 3.5’te verilmektedir. Buna göre, 2.4 GHz’de 2x2 dizi antenin kazancının 9.3dBi olduğu görülmektedir.

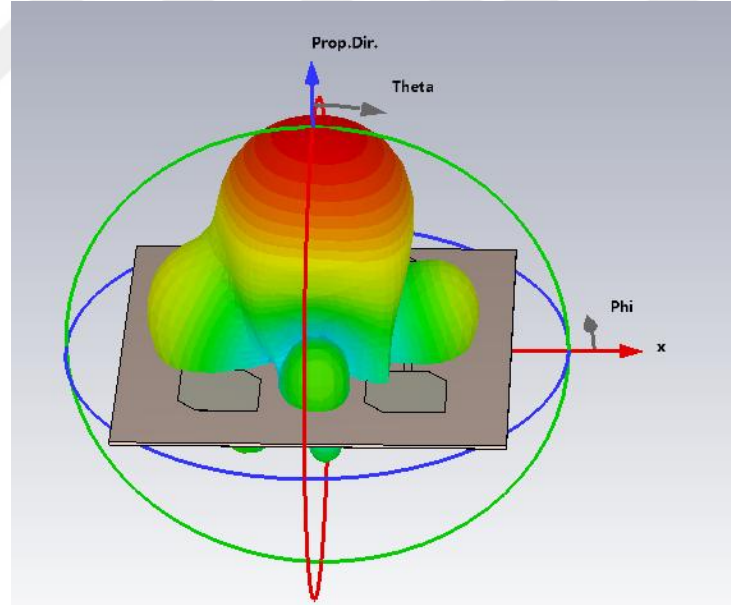
Şekil 3.6’da verilen S11 grafiği incelendiğinde, antenin 10 dB empedans bandının Tablo 1.1’de verilen gereksinimi sağlamadığı görülmüştür. Hedeflenen S11 değerine ulaşmak için parazitik yama katmanı ekleyerek çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 3.5. 2x2 anten dizisinin 2.4 GHz frekansındaki Dizi Anten Kazanç Grafiği (Analiz sonucu)



Şekil 3.6. Dizi Anten S11 Grafiği (Analiz sonucu)



Şekil 3.7. 2x2 Dizi Antenin 2.4 GHz frekansında Uzak Alan 3 Boyutlu Işıma Grafiği

3.3. Parazitik Yama Katmanın Tasarımı

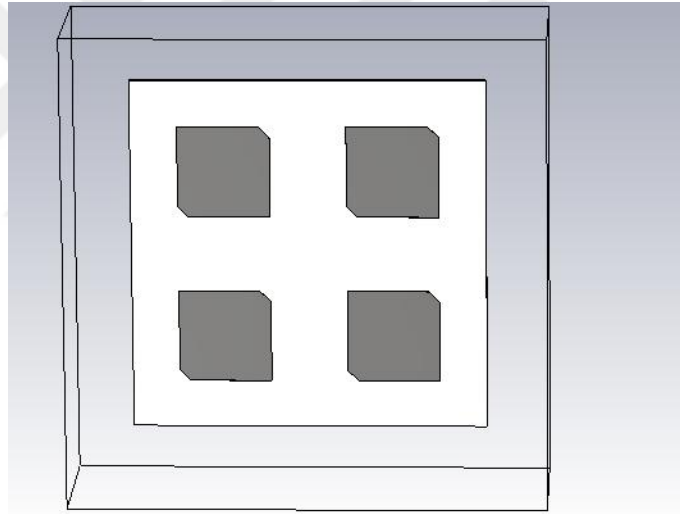
İletim hattı modeli denklemini kullanarak parazitik yama anteni tasarlamak için, ilk seçim, kalınlığın, istenen rezonans frekansının (f_0) ve dielektrik sabitinin belirlenmesini içerir. Bu tasarım için 1.52 mm yüksekliğinde bir taban malzemesi olan Rogers RT/duriod 6002 (TM) dielektrik malzemesi seçilmiştir. Tasarım sürecinde iletim

hattı modeli denklemleri kullanılmış ve 2.4 GHz frekansında rezonansa girecek bir parazitik yama anten tasarlanmıştır (Şekil 3.8). Tablo 3.3’de verilen değerler, Bölüm 2.2’deki formüllere göre hesaplanıp simülasyon sonucu çıkan değerlerdir.

Eksenel oran seviyesini en iyi hale getirmek için anten elemanlarının ve parazitik yama üzerindeki elemanların hepsine belirli geometride ve kullanılan polarizasyona uygun kesikler oluşturulmuştur.

Tablo 3.3. Parazitik Yama Katmanın Özellikleri

Parametreler	Değerler
Yama Genişliği (W) (mm)	46.77
Yama Yüksekliği (L) (mm)	46.77
Çalışma frekansı (f) (GHz)	2.30-2.50
Dielektrik katsayısı (Er)	2.94
Dielektrik kalınlığı (h) (mm)	1.52



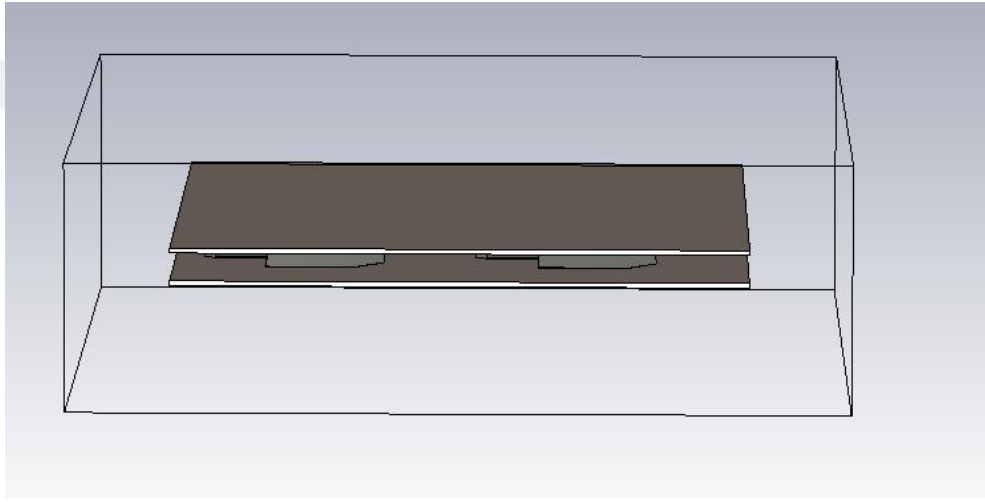
Şekil 3.8. Parazitik Yama Katmanın Üsten Görünüşü

3.4. Parazitik Yama ile Yama Dizi Anten Arasındaki Mesafenin Optimizasyonu

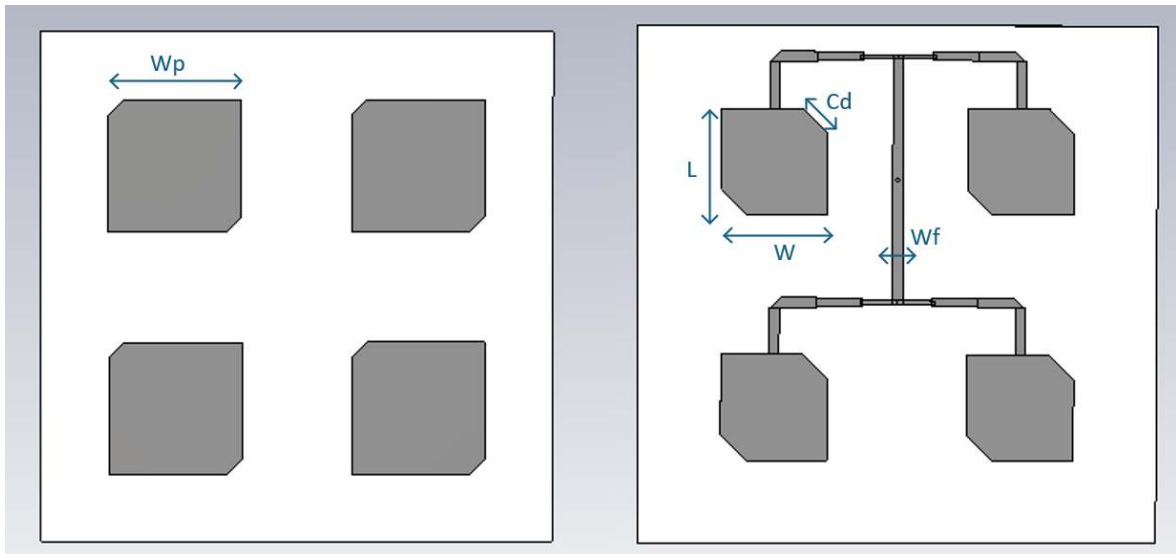
Parazitik yama ile ana yama dizi anten arasındaki mesafeyi hesaplamak, antenin performansını optimize etmek için kritik bir tasarım gerektirmektedir. Bu mesafe, parazitik yama ile ana yama dizi anteniyle olan elektromanyetik bağlaşımları kontrol eder ve antenin rezonans frekansını, bant genişliği, kazancı ve empedans uyumu üzerinde doğrudan etkili olur. Hesaplama kullanılan dielektrik malzemenin özellikleri, rezonans frekansına ve antenin çalışması gereken elektromanyetik dalga boyuna (λ) bağlıdır. Bu tasarımda kapasitif bağlaşım kullanılmıştır (Şekil 3.9.).

Parazitik yama, ana antenin üzerine yerleştirilmiştir. İki yama arasındaki mesafe, kapasitif etkileri artıracak kadar küçük olmalıdır. Formül 2.15 kullanılarak, iki katman arasındaki mesafe (h) değeri, 9.11mm olarak hesaplanmıştır. Parazitik yama, dizi antenin bulunduğu ana yamaya yaklaştıkça empedans uyumu ve yansıma katsayısı (S_{11}) iyileşir. Ancak çok küçük bir mesafe, istenmeyen bağlaşım etkilerine neden olabilir. Bu nedenle mesafe, CST Studio programında simülasyonlarla optimize edilmiştir ve optimum mesafe değeri, minimum 8 mm olarak bulunmuştur.

Parazitik yama ve mikroşerit yama dizi antenin üstten görünüşü Şekil 3.10'da verilmiştir.



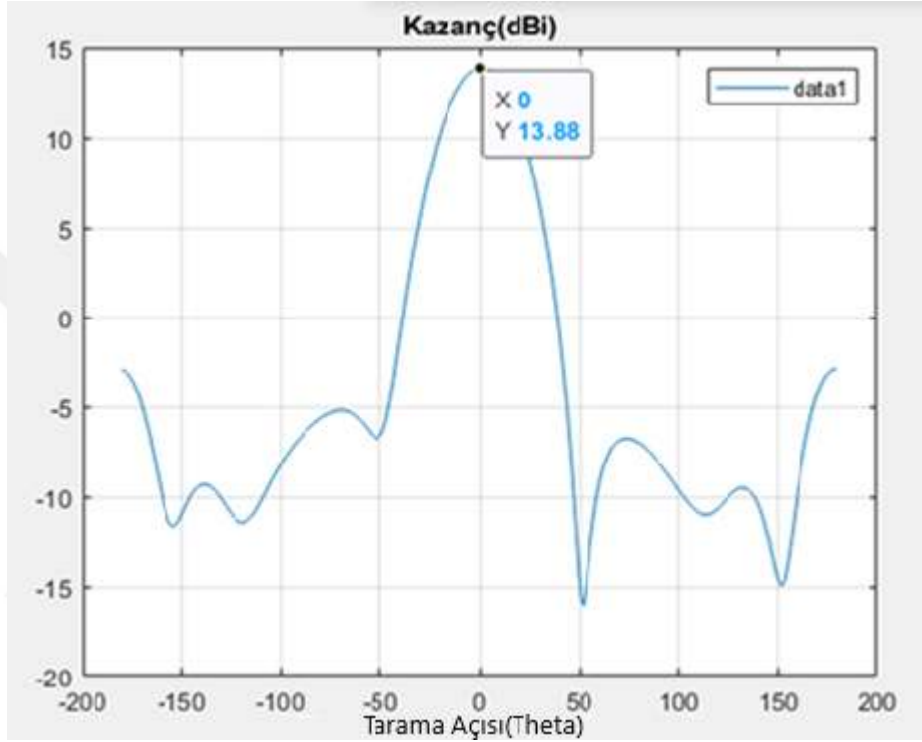
Şekil 3.9. Parazitik Yama Katmanlı Dizi Yama Antenin Yandan Görüntüsü



Şekil 3.10 Dairesel Dizi Anten ve Parazitik Yamanın Fiziksel Gösterimi

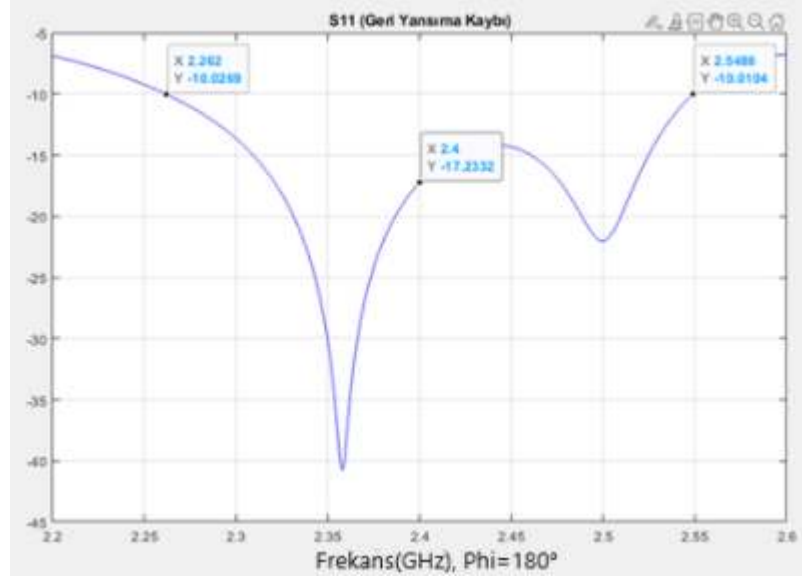
Parazitik yama katmanlı 2x2 dizi yama antenin, CST Studio yazılım programı ile yapılan analiz ve optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen anten kazancı, yansıma katsayısı (S11), ışıma deseni ve eksenel oran değerleri, sırasıyla Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 de verilmiştir.

Şekil 3.11 'de verilen kazanç grafiğinden görüldüğü üzere, tasarlanan antenin 2.4GHz'deki kazancı 13.88 dBi ve ana hüzmesinin 3dB hüzme genişliği 36.7 ° olarak elde edilmiştir.

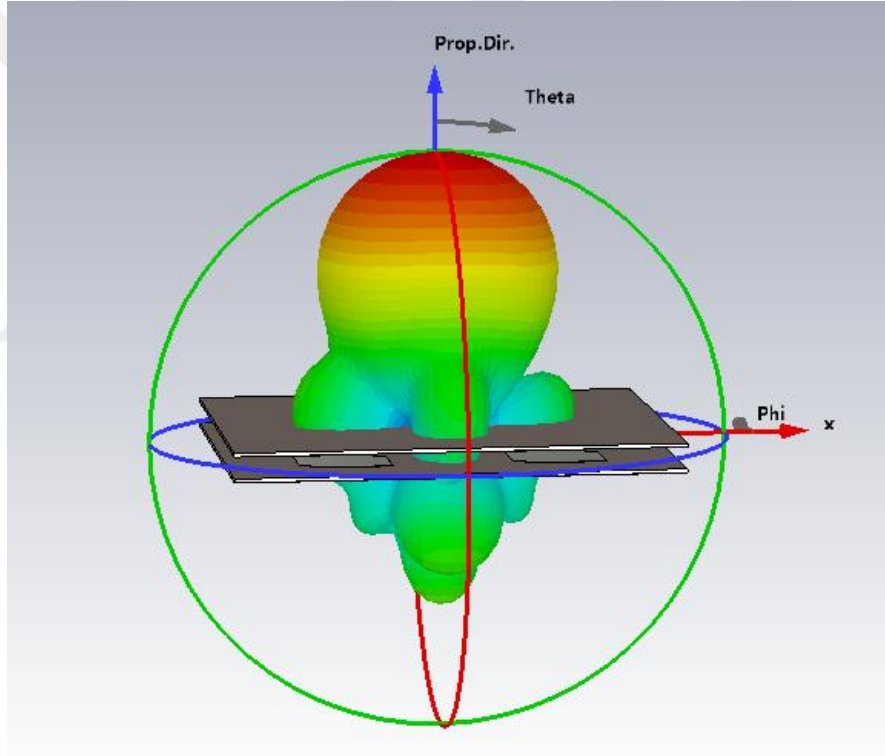


Şekil 3.11 Parazitik yama katmanlı 2x2 dizi yama antenin Kazanç Grafiği (2.40GHz frekansında)

Şekil 3.12 incelendiğinde, tasarlanan antenin, 10 dB empedans bant genişliğinin yaklaşık 2.26 ile 2.55 GHz arasında olduğu görülmektedir.

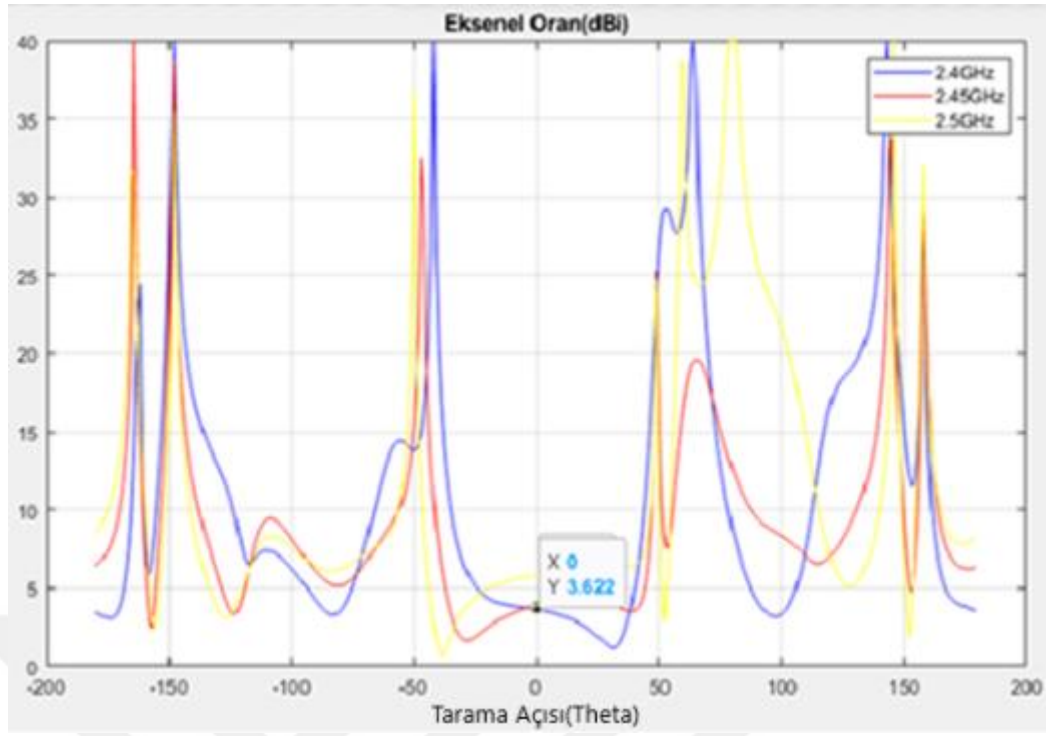


Şekil 3.12. Parazitik yama katmanlı 2x2 dizi yama antenin Geri Yansımaya (S11) Grafiği



Şekil 3.13. Parazitik Yama Katmanlı Dizi Anteni Uzak Alan Işıma Grafiği (Frekans 2.40 GHz)

Antenin elde edilen dairesel polarizasyon eksenel oran değerleri incelendiğinde (Şekil 3.14), 2.4 GHz’de eksenel oranın 3.62 dB olduğu görülmektedir. Dairesel polarizasyonlu bir anten için eksenel oranın 5 dB değerinin altında olması, belirli uygulamalar için uygun ve kabul edilebilir bir performans göstergesidir [25]. Bu değerde, anten hala etkili bir şekilde dairesel polarizasyon sağlayabilmekte ve pratik kullanım senaryolarında yeterli bir polarizasyon saflığı sunmaktadır [24].



Şekil 3.14. 2.4, 2.45, 2.5 GHz'deki Eksenel Oran Grafiği

4. UYGULAMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

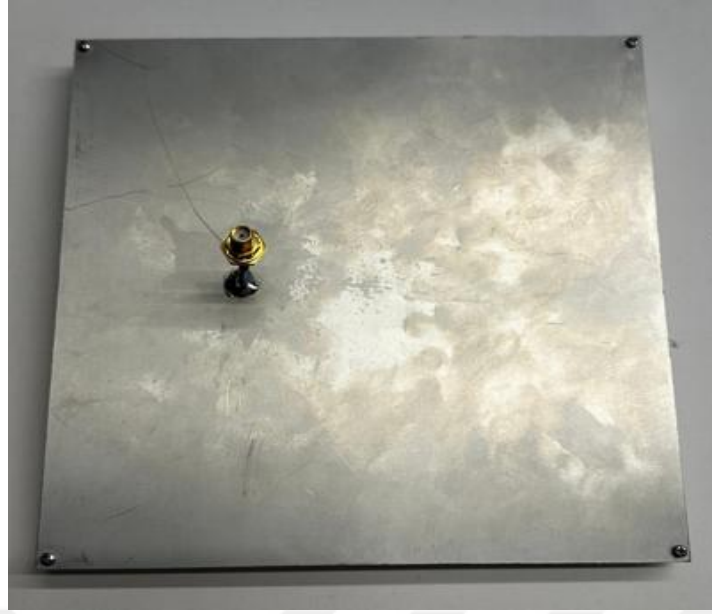
Önceki bölümde, hedeflenen geniş bant frekans aralığında yüksek kazanç sağlamak amacıyla tasarlanan antenin boyut parametrelerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. Bunun yanı sıra, besleme hattının uzunluğu ve genişliği de özenle ele alınmış ve optimum performans elde etmek için düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, geri dönüş kaybı ve kazanç üzerinde önemli bir etkiye sahip olması nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, empedans uyumunun sağlanması da dikkate alınan önemli bir faktör olmuştur, çünkü anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyumu, sistemin verimliliği ve performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Yapılan bu optimizasyonlar, antenin istenilen performans seviyesine ulaşmasını sağlamıştır. Maliyetli üretim süreci öncesinde farklı tasarım değerleri değerlendirmeye alınarak en uygun tasarım çıktısını belirlemek bu aşama için önemlidir.

4.1. Parazitik Yama Katmanlı Dizi Anten Üretimi ve Simülasyon Performansı,

Üretilen anten, Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Tasarımda görülebileceği üzere, parazitik yamalar taban malzemesi üzerinde yer alırken, ana yama mikroşerit hat beslemesine bağlanmıştır. Alt tabaka ile taban malzemesi arasında mekanik destek sağlamak için dayanaklar ve parazitik yama katman ile alt tabaka arasında 8 mm'lik düşük dielektrik sabitine sahip bir köpük katman (Rohacell $\epsilon_r=1.05$) bulunmaktadır. Anten, bir iletim hattı kullanılarak beslenmektedir. Anten beslemesi, koaksiyel ve mikroşerit iletim hatları ile gerçekleştirilmiştir.



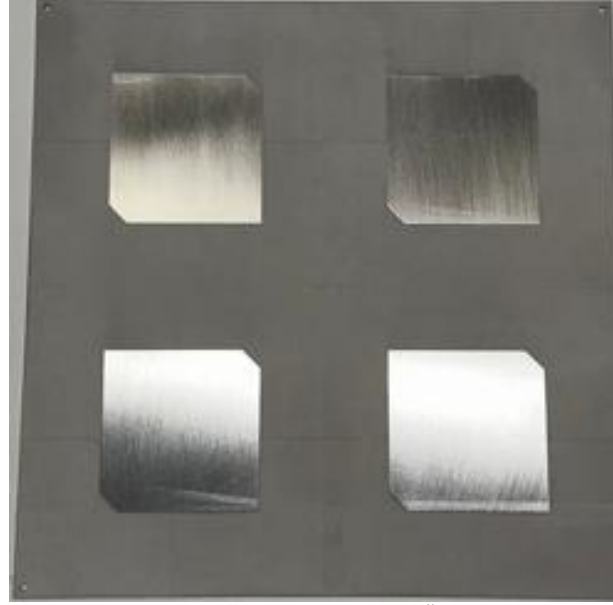
Şekil 4.1. Üretilen Antenin Yandan Görünüşü



Şekil 4.2. Üretilen Antenin Üst Görünüşü

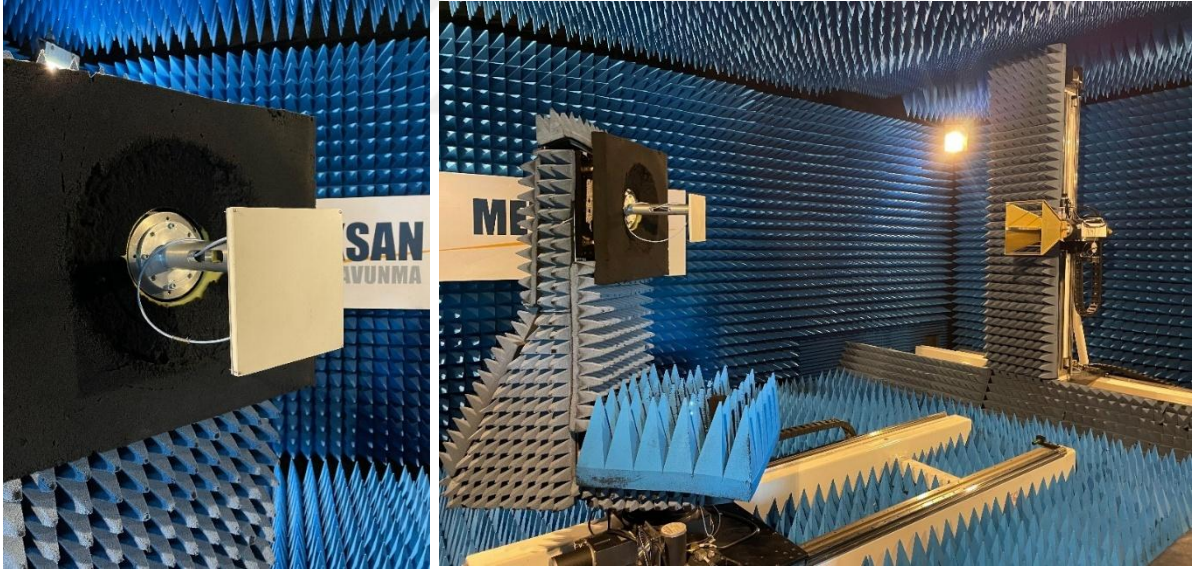


Şekil 4.3 Üretilen Dizi Antenin Üst Görünüşü



Şekil 4.4 Parazitik Yama Antenin Üst Görünüşü

Anten ölçümleri METEKSAN A.Ş firmasında bulunan yankısız oda imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5)

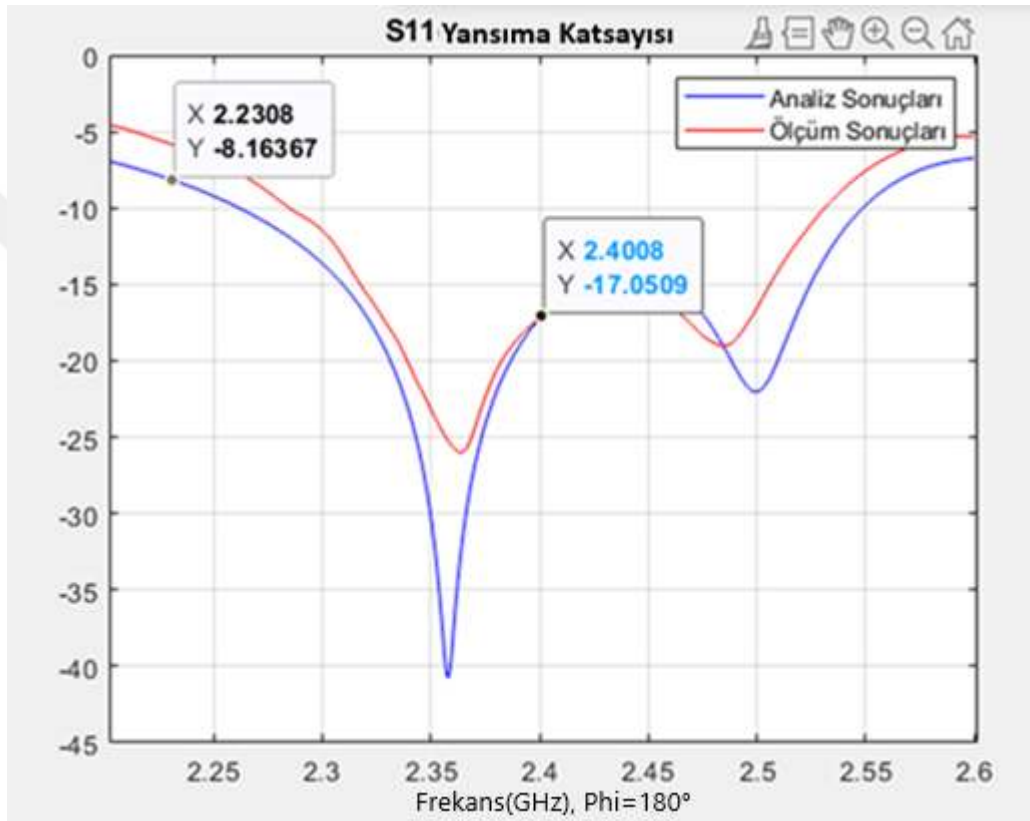


Tasarlanan antenin yankısız odada ölçülen S11, kazanç ve eksenel oran performans

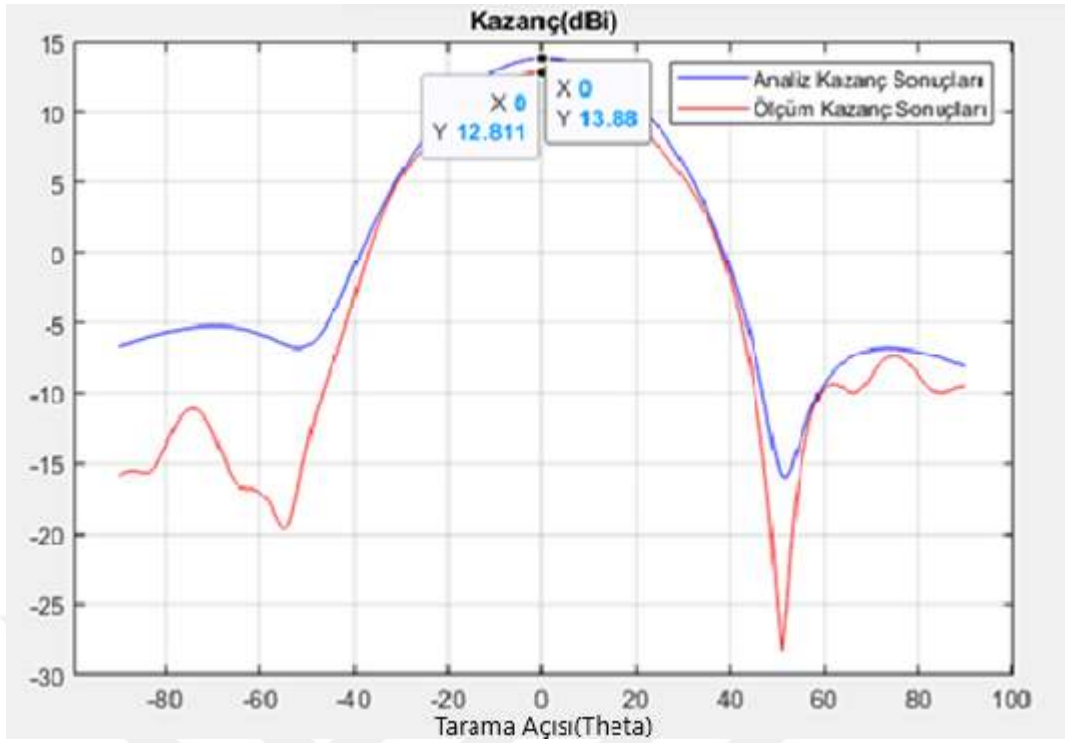
Şekil 4.5. Anten ışıma parametrelerinin ölçümlerinin yapıldığı yankısız oda değerleri ile tasarım

sırasında hesaplama ile elde edilen analiz sonuçları, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8’de birlikte gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, tasarım ve ölçüm verileri arasında S11 ve kazanç değerlerinin büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Bu, antenin empedans uyumu ve yönlülük performansının tasarım hedeflerine uygun olduğunu

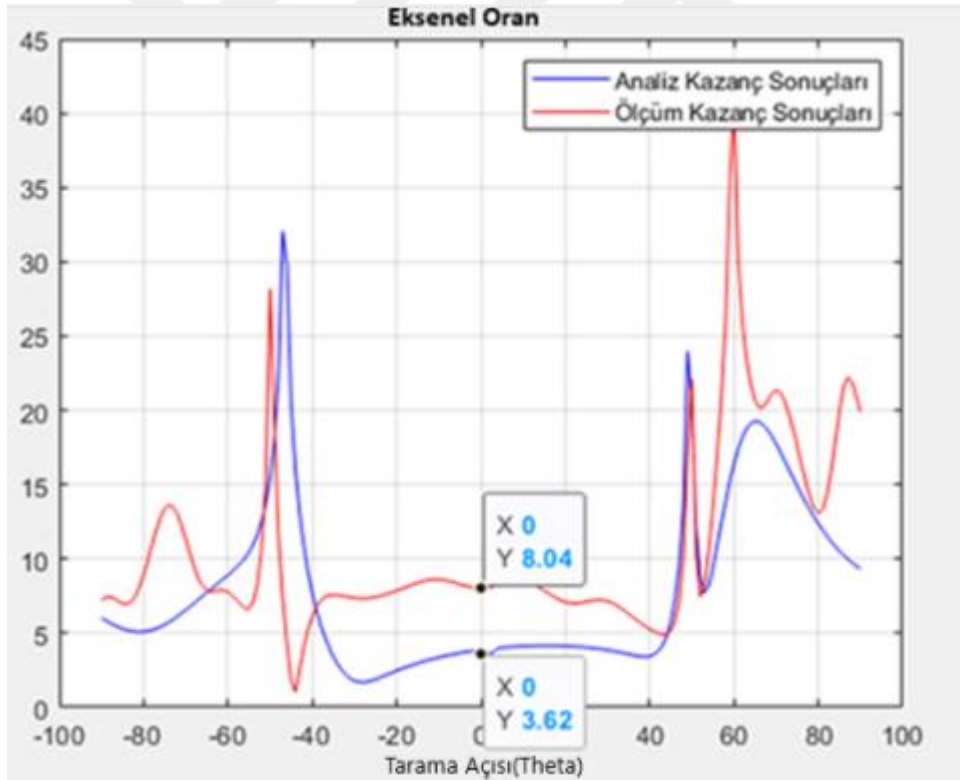
göstermektedir. Ancak, eksenel oran değerlerinde belirgin bir farklılık tespit edilmiştir. Bu durumun, antenin üretim toleranslarından, malzeme özelliklerindeki sapmalardan veya ölçüm ortamındaki çevresel etkilerden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir. Eksenel oran farklılığı, özellikle antenin dairesel polarizasyon performansını etkileyeceğinden, antenin ürün haline getirilmesi aşamasında, bu parametrenin optimize edilmesi gerekecektir. Sonuç olarak, antenin Tablo 1.1’de verilen genel performans hedefleri büyük ölçüde karşıladığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.6. Analiz Sonuçları ve Üretim Sonuçlarının S11 Karşılaştırılması

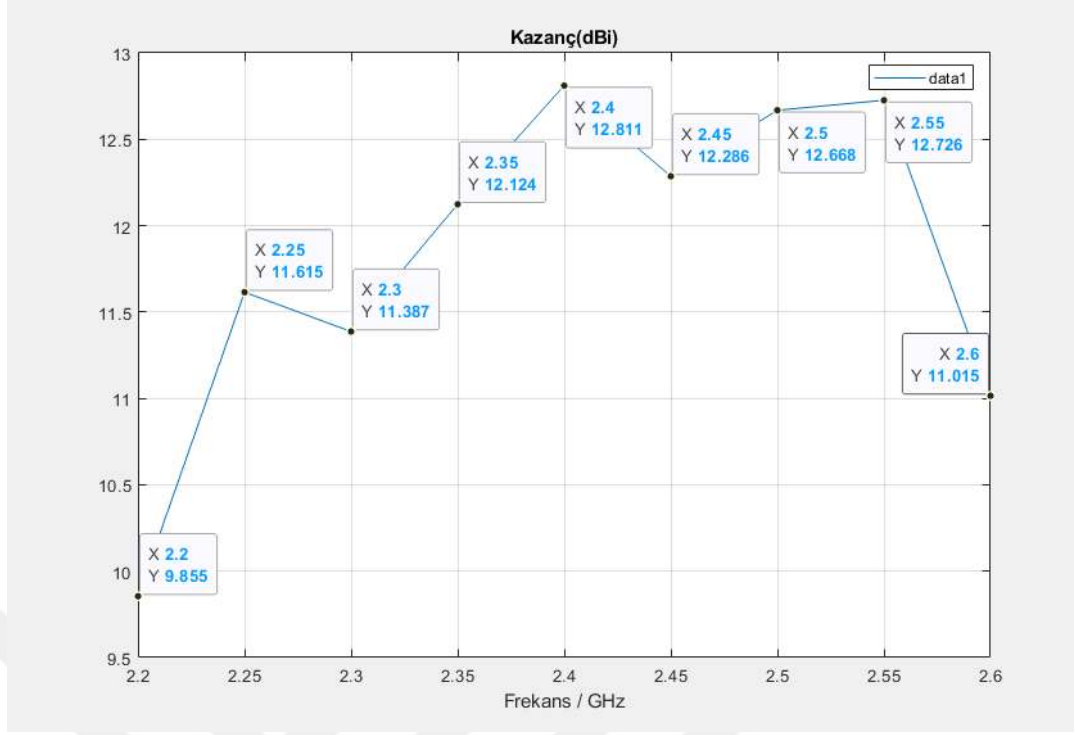


Şekil 4.7. Anten Odası ve Analiz Kazanç Sonuçlarının Karşılaştırıldığı Grafik (2.4 GHZ frekansında)

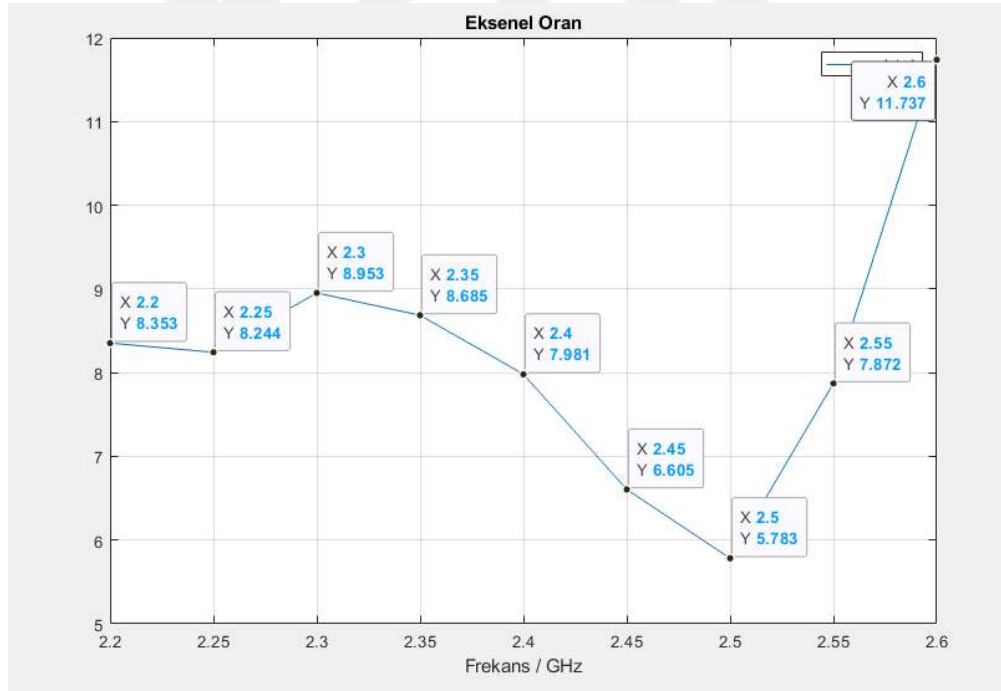


Şekil 4.8. Anten Odası ve Analiz Eksenel Oran Sonuçlarının Karşılaştırıldığı Grafik (2.4GHz frekansında)

2x2 Anten dizisinin frekansla değişen kazanç değerleri ve eksenel oran değerleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Anten kazancının 2.40GHz frekansında en yüksek olduğu, eksenel oranın ise 2.55 GHz frekansında en düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9 Frekansa Göre Anten Kazanç Grafiği



Şekil 4.10 Frekansa Göre Eksenel Oran Grafiği

Son ürün haline getirilen dizi antenin ölçüm sonuçları ile CST Studio Suit yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılması bu bölümde verilmektedir.

Tablo 4.1: Antenin, Hedeflenen değerleri, Bilgisayar Ortamındaki Analiz Sonuçları ve Yankısız Oda lm Sonuçlarını Gösteren Tablo

Parametreler	Hedeflenen Değerler (2.40GHz)	Analiz Sonuçları (2.40 GHz)	Yankısız Oda lm Sonuçları (2.40 GHz)
Kazanç (dBi)	> 6dBi	13.9	12.8
Yan Kulakçık Seviyesi (dB)	-15dB	-16.8	-22.1
S11 (dB)	-	-17.05	-17.27
10 dB Empedans Bant Genişliği	> 100MHz	2.26-2.54	2.28-2.53

5. SONUÇ

Bu alışmada, ISM için ayrılmış frekans bandında kullanıma uygun özelliklerde bir yama anten dizisi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan kuramsal araştırmalar ve literatür taraması sonucunda, anten özellikleri detaylandırılmış, istenen özellikleri sağlayacak dizi anten tasarlanmış ve alışmalar CST Studio ile elektromanyetik analiz ortamına taşınmıştır. Aşamalı olarak gerçekleştirilen anten tasarımı ilk olarak tek elemanlı bir yama anten tasarımıyla başlayıp sonuçlar incelenmiştir. Ardından belirlenen frekans bandı genişliği ve anten kazancı değerlerine ulaşmak için olması gereken özellikler tasarıma aktarılmıştır ve tasarım 2x2 yama anten dizisi formuna evrilmiştir. Sonraki aşamada literatür araştırmalarından elde edilen bilgiler kullanılarak dizi anten üzerine aynı sayıda parazitik yamadan oluşan bir katman yerleştirilmiştir. Parazitik yama antenler sayesinde, 2.26 GHz ile 2.54 GHz arasında 10 dB empedans bant genişliği sağlanmış ve kazanç seviyesi 13.9 dBi seviyesine çıkmıştır.

Elektromanyetik ortamda tamamlanan tasarımın ardından, dizi anten üretilmiş ve yankısız oda performans ölümleri yapılmıştır. Testler sırasında ilk olarak farklı frekanslarda yansıma katsayısı (S11) parametreleri llmş ve elde edilen değerlerin benzetim sonuçları ile tutarlılığı görülmüş, sonrasında ışınım deseni ölümleri ile kazanç ölümleri gerçekleştirilmiştir.

Üretilen anten üzerinde yapılan ölüm ve değerlendirmeler sonucunda, tüm

performans parametrelerinin büyük oranda tasarlanan değerlerle örtüştüğü görülmüştür.

Bu tez kapsamında üretilen anten ve literatürde yer alan benzer dairesel polarizasyonlu antenlerin performans karşılaştırması Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tez kapsamında tasarlanan antenin, literatürde bulunan mikroşerit yama anten [30] ve parazitik yamalı tek katmanlı mikroşerit yamalı antene [33] göre daha yüksek kazançlı ve daha geniş frekans bandına sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışma kapsamında tasarlanıp üretilen dörtlü mikroşerit yama anten dizisi ve parazitik yama dizisinin, literatürde bulunan dizi anten sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, bant genişliği ve kazanç olarak [34] makalesinde verilen değerlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Eksenel oran değeri, analiz sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Elde edilebilen en iyi eksenel oran, 2.5 GHz frekansında 5.8 dB olarak ölçülmüştür.

Gerçekleştirilen anten, doğrusal polarizasyona sahip benzer antenlerle karşılaştırıldığında ([12], [13]); bant genişliği ve kazancının daha yüksek ([12]) olduğu; [13] ile karşılaştırıldığında ise kazancının daha yüksek olduğu ancak bant genişliğinin daha az olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, mikroşerit yama anten dizilerinde, parazitik yama katman kullanılarak, kazanç ve bant genişliğinin artırılabilceği, tasarım, analiz ve üretim sonuçlarıyla gösterilmiş ve literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılarak elde edilen performans değerleri değerlendirilmiştir.

Tablo 5.1: Bu tezde tasarlanan Antenin Referans Antenle Karşılaştırılması

Referanslar	Frekans (GHz)	Polarizasyon	10 dB Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dBi)
Tez Çalışması	2.4	Dairesel	250 (%11)	12.8
[30] M. Ahmad	2.4	Dairesel	100 (%4)	7.3
[32] M.S. Khan	2.2	Dairesel	360 (%16)	17
[33] Nestoros	0.88	Dairesel	95 (%11)	9.3
[34] Varma	10.48	Dairesel	250 (%2.4)	10.1
[12] Santiko	2.35	Doğrusal	100 (% 4.3)	4.64
[13] K.P. Reddy	8.5	Doğrusal	2.07, (% 24)	9.32

KAYNAKLAR

- [1] Balanis, C. A., Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
- [2] Anil Pandey, Practical Microstrip and Printed Antenna Design, Artech House, 2019
- [3] Caron, W. N. (1993). Antenna impedance matching, American radio relay league.
- [4] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., & Ittipiboon, P. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, Boston, London.
- [5] Kumar, G., Ray, K. (2002). Broadband microstrip antennas, Artech House.
- [6] Lee, T. H. (2004). Planar microwave engineering, a practical guide to theory, measurement, and circuits (Vol. 1), Cambridge University Press.
- [7] Kai Da Xu, Han Xu¹, Yanhui Liu¹, Jianxing Li⁴, And Qing Huo Liu⁵, (2017) Microstrip Patch Antennas With Multiple Parasitic Patches and Shorting Vias for Bandwidth Enhancement
- [8] Arora A, et al. Design of microstrip patch antenna at 2.4 GHz for Wi-Fi and Bluetooth applications. J Phys Conf Ser. 2021;1921(1). IOP Publishing
- [9] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Fourth Edition, NY, USA, JOHN WILEY & SONS INC., 2012.
- [10] K. F. Lee and K. M. Luk, *Microstrip Patch Antennas*. London, U.K.: Imperial College Press, 2011.
- [11] J.-Y. Sze and K.-L. Wong, "Slotted rectangular microstrip antenna for bandwidth enhancement," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 8, pp. 1149-1152, Aug. 2000.
- [12] Santiko, A, Paramayudha, Ken., Wahyu, Y. (2016). Design and Realization Multi-Layer Parasitic for Gain Enhancement of Microstrip Patch Antenna, Indonesia Institute of Sciences Bandung, Indonesia
- [13] Reddy, K.P, Sai S.S., Rakesh, P., Reddy, Y.S., (2023), "Design of Microstrip Patch Antenna for Bandwidth and Gain Enhancement using Parasitic Patches in Superstrate", 2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET) Belgaum, India. May 26-28, 2023
- [14] Li, Junlong., Liu, H., Zhang, S., Luo, M., Zhang, Y, He, S. (2017). A Wideband Single-Fed, Circularly-Polarized Patch Antenna with Enhanced Axial Ratio Bandwidth for UHF RFID Reader Applications, the National Natural Science Foundation of China
- [15] Khan, M.U., Sharawi, M.S. and Mittra, R., 2015. Microstrip patch antenna miniaturization techniques: a review. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 9(9), pp.913-922.
- [16] Al-Ahmadi, A. and Khraisat, Y.S., 2019. Bandwidth enhancement of microstrip patch antenna. *Applied Physics Research*, 11(1), pp.35-40.

- [17] Arora A, et al. Design of microstrip patch antenna at 2.4 GHz for Wi-Fi and Bluetooth applications. J Phys Conf Ser. 2021;1921(1). IOP Publishing
- [18] J. Jayanth, H. K. Ravikiran, M. Shivakumar, Manasa Mahadevaswamy, K. S. Gururaj, 2023. Antenna Gain Improvement for Wi-Fi Applications Using Parasitic Patch. Original Research
- [19] Parizi, S. A. R. (2017) “Trends in Research on Microstrip Antennas”, Trends in Research on Microstrip Antennas (1), pp. 8
- [20] Chowdhury, M. H., Hossain, Q. D., Hossain, M. A., & Cheung, R. C. C. (2019). Single feed circularly polarized crescent-cut and extended corner square microstrip antennas for wireless biotelemetry. Int. J. Electr. Comput. Eng, 9(3), 1902-1909.
- [21] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. ve Ittipiboon, A., Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, Norwood, MA, 2001.
- [22] Pozar, D. M. ve Kaufman, B., “Increasing the Bandwidth of a Microstrip Antenna by Proximity Coupling”, Electronics Letters, vol. 23, s. 368-369, 1987
- [23] Stutzman, W. L. ve Thiele, G. A., Antenna Theory and Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2013
- [24] Zhang, X., Zhu, L., Liu N., (2017), “Pin-Loaded Circularly-Polarized Patch Antennas With Wide 3-dB Axial Ratio Beamwidth”, IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 65, No. 2, February 2017
- [25] Quresh, J.U., Das, D., Hossain, A., (2024) “ Design and Performance Analysis of a Broadband Microstrip Patch Antenna for 5G Applications”,
- [26] Veerendra, K., Padma Ratna, G., Nagakishore Bhavanam, S., (2019). Design of Microstrip Patch Antenna with Parasitic Elements for Wideband Applications, International Journal of Innovative Research in Technology
- [27] Surya Deo Choudhary, (2023), “Design of Microstrip Rectangular Patch Antenna Using Coplanar Parasitic Rod Elements with Two-Layer Substrate Coupled Integrated Feeding Line Technique”, Wireless Personal Communications (2023) 131:3073–3087
- [28] H. G. Akhavan and D. M. Syahkal, —Study of coupled slot antennas fed by microstrip lines, 10th International Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh, UK, vol. 1, pp. 1290–1292, 1997
- [29] G. V. Trentini, Partially reflecting sheet arrays, IRE Trans. Antennas Propag. 4, pp. 666–667, 1956.
- [30] Ahmad, M., Khalil, F. A., (2021), “Design and Fabrication of a 2.4 GHz Right Hand Circular Polarized Micro-Strip Patch Antenna”, Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: Physical and Computational Sciences 58(4): 1-10
- [31] Khalid Muzaffer, (2011), “Design off 8GHz Circullarly Polarized Patch Antenna”, International Journal of Electronics Engineering, 3 (2), 2011, pp. 353– 357

- [32] M. Saad Khan; Farooq A. Tahir, “A circularly polarized stacked patch antenna array for tracking applications in S-band”, 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), August 2015 Lisbon, Portugal
- [33] Marios Nestoros, Marios A. Christou, and Anastasis C. Polycarpou, “Design of wideband, circularly polarized patch antennas for RFID applications in the FCC/ETSI UHF bands”, Progress In Electromagnetics Research, C, Vol. 78, 115–127, January 2017
- [34] G. Anjaneyulu; J. Siddartha Varma “Design of a corner truncated patch antenna array with four elements for wireless applications” International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS 2019) Palladam, India, Şubat 2019

