



T.C.

ALTINBAŞ ÜNİVERSİTESİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği

**X BANT MİKROŞERİT HALKA YAMA ANTEN
TASARIMI VE BESLEME TÜRLERİNE GÖRE
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Melih HACİMEHMET

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Yasa EKŞİOĞLU ÖZOK

İstanbul, 2021

**X BANT MİKROŞERİT HALKA YAMA ANTEN TASARIMI VE
BESLEME TÜRLERİNE GÖRE PERFORMANSLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Melih HACİMEHMET

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği

Yüksek Lisans Tezi

ALTINBAŞ ÜNİVERSİTESİ

2021

“Melih HACİMEHMET” tarafından hazırlanmış ve 25.02.2021 tarihinde sunulmuş “X BANT MİKROŞERİT HALKA YAMA ANTEN TASARIMI VE BESLEME TÜRLERİNE GÖRE PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tez Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak **oy birliği/oy çokluğu** ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Yasa EKŞİOĞLU ÖZOK

Danışman

Tez Savunma Sınavı Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Yasa EKŞİOĞLU ÖZOK

Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Altınbaş Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Çağatay AYDIN

Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Altınbaş Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Cihan ERBAŞ
DÖĞÜŞGEN

Mühendislik Mimarlık
Fakültesi,
İstanbul Yeni Yüzyıl
Üniversitesi

Bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak bütün şartları sağladığımı beyan ederim.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü kabul tarihi:

____/____/____

TEZ ETİK BEYANI

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışlara uygun olarak edinildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde, bu çalışmada, orijinal olmayan tüm materyalleri ve sonuçları tamamen alıntı yaptığımı ve referans gösterdiğimi de beyan ederim.

Melih HACİMEHMET



İTHAF

Bu tez çalışmamı, bu günlere gelmemde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, her zaman maddi ve manevi olarak bana destekte bulunan aileme ithaf ediyorum.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca benimle ilgilenen, destekleriyle yol gösteren, değerli bilgilerini benimle paylaşan tez danışmanım Doç. Dr. Yasa EKŞİOĞLU ÖZOK'a ve yüksek lisans öğrenimim boyunca üzerimde emeği bulunan diğer hocalarıma şükranlarımı sunarım.



ÖZET

X BANT MİKROŞERİT HALKA YAMA ANTEN TASARIMI VE BESLEME TÜRLERİNE GÖRE PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

HACİMEHMET, Melih

Yüksek Lisans, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği, Altınbaş Üniversitesi

Danışman: Doç. Dr. Yasa EKŞİOĞLU ÖZOK

Tarih: Şubat/2021

Sayfa: 93

Bu tez çalışmasında, x bandında çalışabilen mikroşerit halka yama anten tasarımı yapılmış ve anten koaksiyel prob, mikroşerit hat, yakınlık kuplajlı ve açıklık kuplajlı besleme yöntemleri kullanılarak beslenmiştir. Antenlerin yama boyutları ve dielektrik taban kalınlıkları sabit tutulmuş, sadece besleme yöntemleri ve besleme boyutları değiştirilmiş, böylelikle besleme yöntemlerinin anten performanslarını nasıl etkilediği gözlenmiştir. Tasarımlarda, FR – 4 ve Rogers RT – 5880 dielektrik taban malzemeleri tercih edilmiştir. Tasarlanan antenlerin bant genişlikleri 260 MHz ile 1160 MHz arasında, kazanç değerleri ise 4.6 dB ile 9.35 dB arasında değişmektedir. Anten tasarımları, elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile çözen Ansys HFSS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroşerit Anten, Halka Yama, Besleme Türleri, X Bant

ABSTRACT

X BAND MICROSTRIP LOOP PATCH ANTENNA DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION ACCORDING TO FEEDING TYPES

HACIMEHMET, Melih

M.Sc., Electrical and Computer Engineering, Altinbas University

Supervisor: Doç. Dr. Yasa EKŞİOĞLU ÖZOK

Date: February/2021

Pages: 93

In this thesis, x band microstrip patch loop antenna was designed and fed by using coaxial probe, microstrip line, proximity coupled and aperture coupled methods. In order to understand, how the feeding methods affects the antenna performances, the patch dimensions of antennas and dielectric base thickness were kept constant while feeding methods and dimensions were changed. In these designs, FR – 4 and Rogers RT – 5880 delectric materials were used. The bandwidth of the designed anttennas was between 260 MHz and 1160 MHz and the gain was between 4.6 dB and 9.35 dB. The antenna designs were carried out by using Ansys HFSS programme which solves electromagnetic strucures by finite elements method.

Keywords: Microstrip Antenna, Loop Patch, Feeding Types, X Band

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
TABLO LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR.....	xvi
SEMBOL LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
1.2 TEZİN AMACI.....	3
1.3 HİPOTEZ.....	4
2. ANTEN TEORİSİ.....	5
2.1 ANTENİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	5
2.2 TEMEL ANTEN PARAMETRELERİ.....	7
2.2.1 Işıma Örüntüsü.....	7
2.2.2 Hüzme Genişliği	8
2.2.3 Işıma Güç Yoğunluğu	8
2.2.4 Işıma Şiddeti	9
2.2.5 Yönlülük	9
2.2.6 Polarizasyon.....	9
2.2.7 Anten Verimliliği	10
2.2.8 Anten Yansıma Sabiti	10
2.2.9 Kazanç.....	11
2.2.10 Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)	11
2.2.11 Giriş Empedansı.....	11
2.2.12 Bant Genişliği	13
2.3 ANTEN ÇEŞİTLERİ	14
2.3.1 Tel Antenler	14
2.3.1.1 Doğrusal tel antenler	14

2.3.1.2	Eğrisel tel antenler.....	15
2.3.2	Açıklık Antenler.....	15
2.3.3	Dizi Antenler.....	16
2.3.4	Yansıtıcı (Reflektör) Antenler	17
2.3.5	Lens (Mercek) Antenler	17
2.3.6	Mikroşerit Antenler.....	18
3.	MİKROŞERİT ANTENLER.....	20
3.1	MİKROŞERİT ANTENLERİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	21
3.2	MİKROŞERİT ANTEN ÇEŞİTLERİ	22
3.2.1	Mikroşerit Yama Antenler	22
3.2.2	Mikroşerit Dipol Antenler.....	22
3.2.3	Mikroşerit Yarıklı Antenler.....	22
3.2.4	Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler	23
3.3	MİKROŞERİT ANTENLERİ BESLEME YÖNTEMLERİ	24
3.3.1	Mikroşerit Hat Besleme	25
3.3.2	Koaksiyel Hat Besleme	26
3.3.3	Yakınlık Kuplajlı Besleme.....	27
3.3.4	Açıklık Kuplajlı Besleme.....	28
3.4	DİELEKTRİK TABAN MALZEMESİ.....	30
3.5	MİKROŞERİT ANTENLERİ ANALİZ YÖNTEMLERİ.....	31
3.5.1	İletim (Transmisyon) Hattı Modeli	31
3.5.2	Boşluk (Kavite) Modeli	33
3.5.3	Tam Dalga Modeli	36
3.5.3.1	Sonlu elemanlar yöntemi.....	36
3.6	HFSS SİMÜLASYON PROGRAMI.....	37
3.7	ANTEN BOYUTLARININ HESAPLANMASI.....	38
3.7.1	Dairesel Mikroşerit Anten Boyutlarının Hesaplanması	38
3.7.2	Halka Mikroşerit Anten Boyutlarının Hesaplanması.....	38
4.	ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ	40
4.1	X BANT MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI	40
4.2	TASARIM – 1	40
4.2.1	Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı	44

4.2.2	Yama Boyutlarının Değiştirilmesi	45
4.2.3	Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı	46
4.3	TASARIM – 2	46
4.3.1	Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı	50
4.3.2	Yama Boyutlarının Değiştirilmesi	51
4.3.3	Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı	52
4.4	TASARIM – 3	52
4.4.1	Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı	56
4.4.2	Yama Boyutlarının Değiştirilmesi	58
4.4.3	Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı	59
4.5	TASARIM – 4	60
4.5.1	Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı	64
4.5.2	Yama Boyutlarının Değiştirilmesi	66
4.5.3	Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı	67
4.6	BESLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	68
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
	REFERANSLAR.....	72
	EK A MAXWELL DENKLEMLERİ	76
	ÖZGEÇMİŞ.....	77
	DİZİN	78

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları	21
Tablo 3.2: Mikroşerit antenlerin farklı besleme yöntemlerinin karşılaştırılması	29
Tablo 3.3: Çeşitli dielektrik taban malzemelerinin karşılaştırılması.....	30
Tablo 4.1: Halka yamanın iç (R_1) ve dış (R_2) yarıçapları (milimetre).....	40
Tablo 4.2: X bandında çalışan koaksiyel beslemeli antenin parametreleri	41
Tablo 4.3: Koaksiyel beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları.....	44
Tablo 4.4: Taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin koaksiyel beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	45
Tablo 4.5: Yama boyutlarının değiştirilmesinin koaksiyel beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	46
Tablo 4.6: Farklı taban malzemesi kullanımının koaksiyel beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	46
Tablo 4.7: X bandında çalışan mikroşerit beslemeli antenin parametreleri	47
Tablo 4.8: Mikroşerit beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları	50
Tablo 4.9: Taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin mikroşerit beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	51
Tablo 4.10: Yama boyutlarının değiştirilmesinin mikroşerit beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	52
Tablo 4.11: Farklı taban malzemesi kullanımının mikroşerit beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	52
Tablo 4.12: X bandında çalışan yakınlık beslemeli antenin parametreleri	53
Tablo 4.13: Yakınlık beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları	56
Tablo 4.14: Birinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	57
Tablo 4.15: İkinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	58
Tablo 4.16: Yama boyutlarının değiştirilmesinin yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	59

Tablo 4.17: Farklı yapıda birinci dielektrik taban malzemesi kullanımının yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri	59
Tablo 4.18: Farklı yapıda ikinci dielektrik taban malzemesi kullanımının yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri	60
Tablo 4.19: X bandında çalışan açıklık beslemeli antenin parametreleri.....	61
Tablo 4.20: Açıklık beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları	64
Tablo 4.21: Birinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	65
Tablo 4.22: İkinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	66
Tablo 4.23: Yama boyutlarının değiştirilmesinin açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.....	67
Tablo 4.24: Farklı yapıda birinci dielektrik taban malzemesi kullanımının açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri	67
Tablo 4.25: Farklı yapıda ikinci dielektrik taban malzemesi kullanımının açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri	68
Tablo 5.1: Tasarlanan antenlerin performans değerleri.....	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Elektromanyetik deneylerde Hertz tarafından kullanılan orijinal cihazlar	5
Şekil 2.2: Üç boyutlu anten ışıma örüntüsü	7
Şekil 2.3: İki boyutlu anten ışıma örüntüsü.....	7
Şekil 2.4: Hüzme genişliği	8
Şekil 2.5: Polarizasyon çeşitleri	9
Şekil 2.6: Antenin eşdeğer devresi üzerinde empedans dağılımı	12
Şekil 2.7: Bant genişliğinin geri dönüş kaybı grafiğinde gösterimi	14
Şekil 2.8: Dipol doğrusal tel anten	15
Şekil 2.9: Çevrimsel ve heliks anten	15
Şekil 2.10: Piramit, konik ve dikdörtgen yapıli açıklık antenler.....	16
Şekil 2.11: (a) Yagi – uda dizi anteni, (b) dikdörtgen dalga kılavuzu dizi anteni, (c) mikroşerit yamalı dizi anteni ve (d) slotlu dalga kılavuzu dizi antenleri.....	16
Şekil 2.12: Yansıtıcı (reflektör) antenler	17
Şekil 2.13: $n > 1$ olan mercek antenler; (a) dış bükey – düz, (b) dış bükey – dış bükey ve (c) dış bükey – iç bükey	18
Şekil 2.14: $n < 1$ olan mercek antenler; (a) iç bükey – düz, (b) iç bükey – iç bükey ve (c) iç bükey – dış bükey.....	18
Şekil 2.15: Mikroşerit anten örnekleri.....	19
Şekil 3.1: Genel mikroşerit dikdörtgen yama anten yapısı.....	20
Şekil 3.2: Mikroşerit antenlerde tercih edilen yama yapıları	20
Şekil 3.3: Merkez beslemeli genel bir mikroşerit dipol anten.....	22
Şekil 3.4: Mikroşerit beslemeli yarık anten.....	23
Şekil 3.5: Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri	24
Şekil 3.6: Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme yöntemleri.....	25
Şekil 3.7: Mikroşerit hat besleme	25
Şekil 3.8: Empedans uyumlandırma yöntemleri; (a) girintili besleme, (b) kuplaj besleme	26
Şekil 3.9: Koaksiyel hat besleme	27
Şekil 3.10: Yakınlık kuplajlı besleme	28

Şekil 3.11: Açıklık kuplajlı besleme	29
Şekil 3.12: T tipi iletim hattı eşdeğer devresi.....	31
Şekil 3.13: Mikroşerit antenin boşluk (kavite) modeli kullanılarak temsili.....	34
Şekil 3.14: Mikroşerit yama anten üzerinde oluşan yük dağılımları ve akım yoğunlukları.....	35
Şekil 3.15: Bazı örnek problemlerin küçük bileşenlere ayrılması.....	37
Şekil 3.16: HFSS programı ile yapılmış tasarım ve simülasyon örnekleri.....	37
Şekil 4.1: Tasarlanan koaksiyel beslemeli mikroşerit halka yama anten (a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri	42
Şekil 4.2: Koaksiyel beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği	43
Şekil 4.3: Koaksiyel beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.....	43
Şekil 4.4: Koaksiyel beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği	44
Şekil 4.5: Tasarlanan mikroşerit beslemeli mikroşerit halka yama anten (a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri	48
Şekil 4.6: Mikroşerit beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.....	49
Şekil 4.7: Mikroşerit beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği	49
Şekil 4.8: Mikroşerit beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği	50
Şekil 4.9: Tasarlanan yakınlık beslemeli mikroşerit halka yama anten (a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri	54
Şekil 4.10: Yakınlık beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.....	55
Şekil 4.11: Yakınlık beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.....	55
Şekil 4.12: Yakınlık beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği	56
Şekil 4.13: Tasarlanan açıklık beslemeli mikroşerit halka yama anten (a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri	62
Şekil 4.14: Açıklık beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.....	63
Şekil 4.15: Açıklık beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.....	63
Şekil 4.16: Açıklık beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği	64
Şekil 4.17: Besleme yöntemlerinin bant genişliklerinin karşılaştırılması	68
Şekil 4.18: Besleme yöntemlerinin kazanç değerlerinin karşılaştırılması	69

KISALTMALAR

A	: Amper
BW	: Band Width (Bant Genişliği)
COMSAT	: Communications Satellite Corporation
Coul	: Coulomb
CPW	: Coplanar Waveguide (Eř Düzlemlı Dalga Kılavuzu)
DARPA	: Defense Advanced Research Project Agency
dB	: desibel
F	: Farad
FCC	: Federal Communication Commission
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
FIM	: Finite Integration Method (Sonlu İntegral Metodu)
FNBW	: First Null Beam Width (İlk Sıfır Hüzme Genişliği)
GHz	: GigaHertz
H	: Henry
HFSS	: High Frequency Structural Simulator (Yüksek Frekans Yapı Simülatörü)
HPBW	: Half Power Beam Width (Yarı Güç Hüzme Genişliği)
Hz	: Hertz
IC	: Integrated Circuit (Entegre Devre)
KHz	: KiloHertz
KW	: KiloWatt
m	: metre
m ²	: metrekare
m ³	: metreküp
MHz	: MegaHertz
mm	: milimetre
MoM	: Method of Moments (Momentler Metodu)
PCB	: Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
rad	: radyan
RF	: Radyo Frekansı
s	: saniye
S	: Siemens

sr	: steradyan
UHF	: Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
V	: Volt
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)
Ω	: Ohm
W	: Watt
Wb	: Weber
WLAN	: Wireless Local Area Network (Kablosuz Yerel Alan Ağı)



SEMBOL LİSTESİ

ε	: Permittivite [F/m]
ε_0	: Boş uzayın elektrik geçirgenliği [F/m] ($\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$)
ε_r	: Bağıl dielektrik sabiti [F/m]
ε_{r_1}	: Birinci dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti [F/m]
ε_{r_2}	: İkinci dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti [F/m]
μ	: Manyetik permeabilite [H/m]
μ_0	: Boş uzayın manyetik geçirgenliği [H/m] ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$)
θ	: Küresel koordinat sistemi enlem açısı (yükselme açısı)
ϕ	: Küresel koordinat sistemi boylam açısı (azimut açısı)
ρ	: Elektrik yük yoğunluğu [Coul/m ³]
Γ	: Antenin yansımaya katsayısı
λ	: Dalga boyu [m]
λ_0	: Boşluğun dalga boyu [m]
ω	: Açısal frekans [rad/s] ($2\pi f$)
a	: Yamanın gerçek yarıçapı [m]
a_e	: Etkin yarıçap [m]
$\vec{B}$	: Manyetik akı yoğunluğu vektörü [Wb/m ²]
BW	: Bant genişliği [Hz]
c	: Işık hızı [m/s] ($c = 3 \times 10^8$)
C	: Birim uzunluk başına paralel kapasitans [F/m]
$\vec{D}$	: Elektrik akı yoğunluğu vektörü [Coul/m ²]
D	: Anten yönlülüğü
D_0 ($D_{\max}$)	: Maksimum anten yönlülüğü [dB] ($10\log D_0$)
e_0	: Toplam anten verimliliği ($e_{\text{ref}} e_c e_d$)
e_c	: İletim verimliliği
e_d	: Dielektrik verimliliği
e_r	: Anten verimliliği ($e_c e_d$)
e_{ref}	: Yansımaya (uyumsuzluk) verimliliği ($1- \Gamma ^2$)
$\vec{E}$	: Elektrik alan vektörü [V/m]
E_z	: Elektrik alan bileşeni (z yönündeki)

f_o	: Anten çalışma frekansı [Hz]
f_r	: Rezonans frekansı [Hz]
$f_1 (f_2)$	: Antenin alt (üst) çalışma frekansı [Hz]
G	: Anten kazancı
G	: Birim uzunluk başına paralel iletkenlik [S/m]
h	: Dielektrik tabaka kalınlığı [m]
h_1	: Birinci dielektrik tabanın kalınlığı [mm]
h_2	: İkinci dielektrik tabanın kalınlığı [mm]
$\vec{H}$	: Manyetik alan vektörü [A/m]
H_x	: Manyetik alan bileşeni (x yönündeki)
H_y	: Manyetik alan bileşeni (y yönündeki)
I	: Akım [A]
J	: Elektrik akım yoğunluğu vektörü [A/m ²]
J_b	: Yamanın alt yüzeyindeki dielektrik tabaka içerisindeki akım yoğunluğu [A/m ²]
J_t	: Yamanın üst yüzeyindeki akım yoğunluğu [A/m ²]
k	: Dalga sayısı (propagasyon sabiti) [1/m]
l	: İletim hattının uzunluğu [m]
L	: Yama uzunluğu [m]
L	: Birim uzunluk başına seri endüktans [H/m]
L_f	: Besleme hattının uzunluğu [mm]
L_o	: Açıklığın uzunluğu [mm]
L_s	: Yarığın uzunluğu [mm]
$\vec{M}$	: (Sanal) Manyetik akım yoğunluğu vektörü [V/m ²]
n	: Kırılma indisi
$\hat{n}$	: Birim normal vektör
P_{rad}	: Işıma güç yoğunluğu [W/m ²]
r	: Uzaysal noktalar arası mesafe [m]
r_i	: Koaksiyel beslemenin iç yarıçapı [mm]
r_o	: Koaksiyel beslemenin dış yarıçapı [mm]
$R_1 (R_2)$	: Yamanın iç (dış) yarıçapı [m]
R	: Birim uzunluk başına seri direnç [Ω/m]
R	: Direnç [Ω]

R_a	: Anten direnci [Ω]
R_g	: Kaynak direnci [Ω]
R_L	: Kayıp direnci [Ω]
R_r	: Radyasyon direnci [Ω]
S	: Taban malzemesi ve toprak düzlemi boyutu [mm]
S_{11}	: Geri dönüş kaybı [dB]
$\tan \delta$	: Kayıp tanjantı
$\tan \delta_1$	: Birinci dielektrik taban malzemesinin kayıp tanjantı
$\tan \delta_2$	: İkinci dielektrik taban malzemesinin kayıp tanjantı
U	: Işıma şiddeti [W/sr]
$U_{\max}$	: Maksimum ışıma şiddeti [W/sr]
V_g	: Kaynak gerilimi [V]
V_i	: Antene iletilen gerilim [V]
$V_{\max}$	: Maksimum gerilim [V]
$V_{\min}$	: Minimum gerilim [V]
V_r	: Antenden yansıyan gerilim [V]
W	: Yama genişliği [m]
W_f	: Besleme hattının genişliği [mm]
W_o	: Açıklığın genişliği [mm]
W_s	: Yarığın genişliği [mm]
X	: Besleme noktasının konumu (x, y, z) [mm]
X_a	: Anten reaktansı [Ω]
X_g	: Kaynak reaktansı [Ω]
Y	: Yamanın konumu (x, y, z) [mm]
Z_0	: İletim hattının karakteristik empedansı [Ω]
$Z_a (Z_{in})$	: Anten giriş empedansı [Ω]
Z_g	: kaynak empedansı [Ω]
Z_t	: Toplam empedans [Ω]

1. GİRİŞ

Genel olarak metal olan anten (çubuk ya da tel), radyo dalgalarını iletmek ya da almak amacıyla kullanılan bir cihazdır [1]. Kablosuz haberleşme teknolojilerindeki gelişme antenlerin daha da ön plana çıkmasını sağlamıştır. Günümüzde boyut, ağırlık, maliyet, verim ve performans açısından daha elverişli antenler tercih edilmektedir. Bu ihtiyaçları karşılayabilmek için mikroşerit antenler kullanılabilmektedir [2]. Uydu, uçak, füze gibi uygulamalarda küçük boyutlu antenlere ihtiyaç duyulması sebebiyle bu alanlarda aktif olarak kullanılmaktadırlar [3].

Mikroşerit yama anten fikri ilk 1953 yılında G. A. Deschamps [4] tarafından öne sürülmüş, 1955 yılında Gutton ve Baissinot [5] tarafından patenti alınmış ancak 1970'li yıllardan itibaren büyük ilgi görmeye başlamıştır. İlk mikroşerit anten çalışmaları, Howell'ın 1972'de ve Munson'un 1974'te yapmış oldukları çalışmalarda görülmüştür [6, 7]. Mikroşerit antenler düzlemsel ve düzlemsel olmayan zeminlere monte edildiği zaman fiziksel olarak sağlamdır ve baskı devre teknolojisi kullanılarak üretildikleri için maliyetleri düşüktür. Bu antenler pek çok kez yama anten olarak da adlandırılmaktadırlar. Işıma yapan yama; kare, dikdörtgen, ince şerit (dipol), daire, elips, üçgen veya herhangi bir geometrik yapıda tasarlanabilirler. Işıma yapan yamanın geometrik yapısı ve moduna göre rezonans frekansı, kutuplanma, örüntü ve empedans uyumlandırma yapılan tasarımlara göre değişiklik gösterebilmektedir. Geometrik yapı bakımından kare, dikdörtgen, şerit (dipol) ve daire yapısı analiz, üretim proseslerinin basit olması ve ışıma karakteristiklerinin yüksek olması nedeniyle en çok tercih edilenler arasındadır [2].

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Tez hakkında genel bir bakış sağlamak amacıyla her bölümün içeriği aşağıda sunulmuştur.

İlk bölümde; anten tanımı, kullanım alanları, yapısı hakkında öz bilgiler verilmiş, daha önce bu konu üzerine yapılmış literatür çalışmaları incelenmiş ve tezin amaçlarından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde; antenin tarihsel gelişim süreci incelenmiş, temel anten parametreleri ve anten çeşitleri detaylı olarak ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde; mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları, çeşitleri, kullanım alanları, besleme yöntemleri, analiz yöntemleri detaylı olarak incelenmiş, dielektrik taban malzemelerinin özellikleri araştırılmış, Ansys HFSS simülasyon programından bahsedilmiş ve

tasarımı yapılacak antenin boyutları hesaplanmıştır.

Dördüncü bölümde; bu tezde amaçlanan antenin tasarımı Ansys HFSS simülasyon programı kullanılarak yapılmış, tasarımı yapılan dört adet antende farklı kalınlıklarda ve çeşitlerde taban malzemesi kullanarak ve yama boyutlarını değiştirerek anten parametrelerinin nasıletkilendiği detaylı olarak sunulmuş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde ise; genel olarak besleme yöntemlerinin anten performansları üzerindeki etkileri karşılaştırılmış ve çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

1.1 LİTERATÜR ÖZETİ

Askeri uydu haberleşmede kullanılmak üzere x bandında 7.2 – 8.4 GHz frekans aralıklarında çalışan mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Anten, mikroşerit hat besleme tekniği kullanılarak beslenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre anten 7.06 – 8.41 GHz frekans aralıklarında çalışmakta ve yaklaşık olarak 1.35 GHz = %17.25 bant genişliğindedir. 7.825 GHz merkez frekansında yaklaşık 7.2 dB kazanç sağlanmıştır. Tasarlanan antenin bant genişliğini arttırmak için yama kısmı ve mikroşerit hat beslemenin boyutları iyileştirilerek ikinci bir anten tasarlanmıştır. İyileştirmeler sonucunda anten 6.74 – 9.69 GHz frekans aralıklarında çalışmakta ve yaklaşık olarak 2.95 GHz = %37.7 bant genişliğindedir. 7.825 GHz merkez frekansında yaklaşık 6.63 dB kazanç sağlanmıştır [3].

5 GHz WLAN uygulamaları için mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Anten, mikroşerit hat, koaksiyel prob, açıklık bağlaşım ve yakınlık bağlaşım besleme teknikleriyle beslenerek performansları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, mikroşerit antenlerden beklenen bant genişliğinde yani %2 – 5 arasında değerler elde edildiği görülmüştür. Bant genişliği en fazla yakınlık bağlaşım beslemeden %4 olarak elde edilmiştir. Geri dönüş kayıplarına bakıldığında en düşük seviyede olduğu değer -28.67 dB ile koaksiyel prob besleme olmuştur. Açıklık bağlaşım besleme tekniğinde ise kazanç ve bant genişliğinin en düşük seviyede olduğu görülmüştür. Genel olarak koaksiyel prob besleme tekniği kullanılarak en iyi sonuçlar alınmıştır [8].

2.4 GHz frekansında çalışan iki adet dikdörtgen mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Antenler (60 mm x 40 mm ve 50 mm x 45 mm) boyutlarındadır. Besleme tekniği olarak mikroşerit hat ve koaksiyel prob besleme tekniği uygulanmış ve performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, koaksiyel prob besleme tekniğinde, besleme noktasının antenin çalışması ve parametrelerini etkilediği görülmüştür. Simülasyon programında koaksiyel prob ile beslenen antenin geri dönüş kaybı -21 dB iken uygulamada -10 dB olarak ölçülmüştür. Yine simülasyon programında mikroşerit hat ile beslenen antenin geri dönüş kaybı -19 dB iken uygulamada -11 dB olarak ölçülmüştür. Genel olarak koaksiyel prob besleme tekniğinin mikroşerit hat besleme tekniğine göre daha iyi anten parametreleri verdiği görülmüştür [9].

Ultra geniş bant uygulamaları için 3 – 11 GHz frekans aralıklarında çalışan mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Anten, eş düzlemsel hat besleme (CPW – fed) tekniği kullanılarak beslenmiştir. Anten (24 mm x 40 mm) boyutlarındadır. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum bant genişliği, S_{11} , kazanç ve ışıma örüntüsü parametrelerini veren anten yapısı belirlenerek uygulama aşamasına geçilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda 3 – 11 GHz frekans aralıklarında geri dönüş kaybı $|S_{11}| < -10$ dB, kazancının ise 1 – 3.7 dB aralığında olduğu görülmüştür. Ayrıca eş düzlemsel hat beslemesinin boşluk miktarının değişimi ile anten kazancının değişmediği ancak başlangıç rezonans frekansının değiştiği görülmüştür [10].

Mikroşerit hat, koaksiyel prob, açıklık bağlaşım, yakınlık bağlaşım ve koplanar dalga kılavuzlu besleme teknikleri kullanılarak mikroşerit anten tasarımı yapılmış ve bu besleme tekniklerinin performansları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, açıklık bağlaşım besleme tekniği hariç diğer besleme tekniklerinin dünya standartları için geniş bant olarak kabul edilen %25 bant genişliğinin üzerinde olduğu görülmüştür. En yüksek bant genişliği %60 ve 5 dB kazanç ile koplanar dalga kılavuzlu besleme tekniği olduğu görülmüştür. Besleme noktasında yapılan değişiklikler, antenin parametrelerinde ufak değişikliklere sebep olurken, diğer besleme tekniklerinin kullanılmasıyla bu parametrelerde önemli değişiklikler olduğu görülmüştür [11].

1.2 TEZİN AMACI

Bu çalışmada öncelikli hedef x bandında çalışan mikroşerit halka yama anten tasarımı yapmak ve besleme türlerini de tasarlanan anten üzerinde deneyerek bant genişliği, geri dönüş kaybı, kazanç gibi parametrelerin nasıl değiştiğini karşılaştırmak ve tasarlanan anten için besleme türleri arasından en iyi performansı veren anteni bulmaktır.

Anten tasarımı ve sayısal sonuçları için Ansys HFSS simülasyon programı kullanılacaktır [12]. HFSS, elektromanyetik yapıları FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi – Finite Element Method) ile çözen simülasyon programıdır. Mikroşerit antenleri beslemek için birçok tasarım yapılabilir. Ancak en yaygın kullanılan dört adet besleme türlerinden bahsedilebilir. Bunlar; mikroşerit hat besleme, koaksiyel prob besleme, açıklık bağlaşım besleme ve yakınlık bağlaşım besleme türleridir [2, 8, 11]. Literatüre bakıldığında besleme türlerinin antenlerin parametrelerini doğrudan etkilediği görülmektedir [3, 8 – 11].

1.3 HİPOTEZ

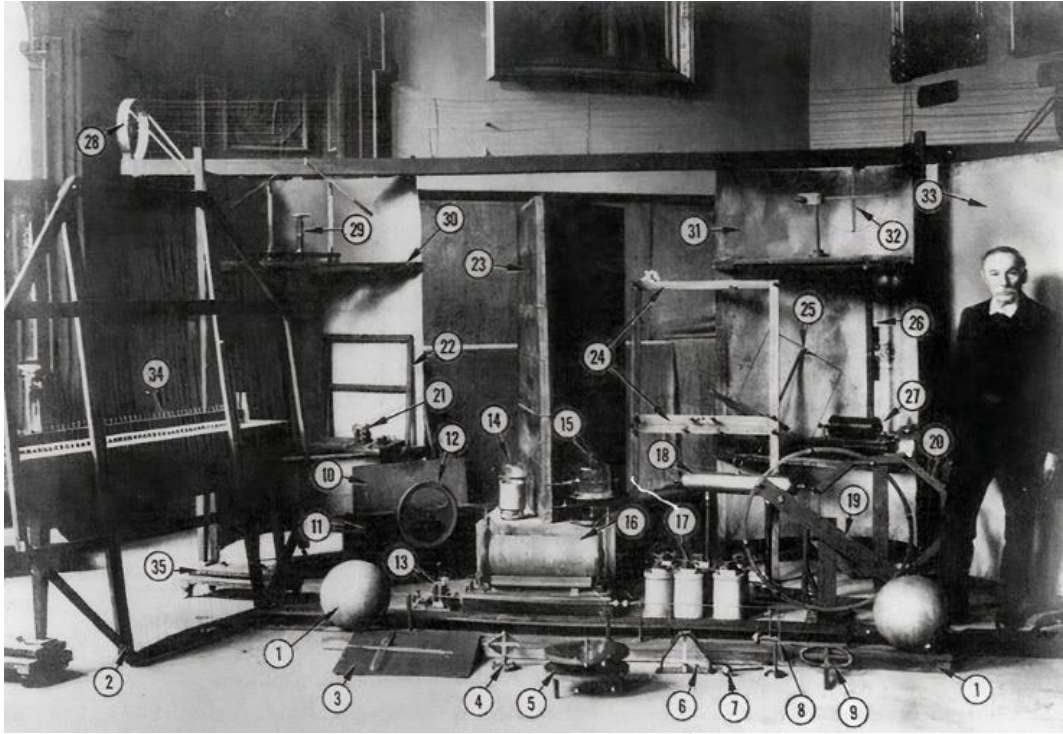
Bu çalışmada, x bandında (8 – 12 GHz) çalışabilecek mikroşerit anten halka yama yapısında tasarlanacak ve anten farklı besleme yöntemleri uygulanarak beslenecektir. İlk olarak, x bandında çalışabilecek şekilde halka yama geometrisini oluşturabilmek için matematiksel eşitlikler kullanılarak anten boyutları hesaplanacaktır. Daha sonra anten koaksiyel prob, mikroşerit hat, yakınlık kuplajlı ve açıklık kuplajlı besleme yöntemleri ele alınarak modellenecektir. Her modelleme için farklı kalınlıklarda ve çeşitlerde taban malzemesi kullanılarak ve yama boyutlarını değiştirerek rezonans frekansı, bant genişliği, kazanç, gerilim duran dalga oranı (VSWR) ve geri dönüş kaybı parametreleri elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Böylelikle antenlerin haberleşme kalitesi bakımından en optimum konfigürasyonu tespit edilmiş olacaktır.

2. ANTEN TEORİSİ

2.1 ANTENİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Antenin tarihi James Clerk Maxwell'e kadar uzanmaktadır [2]. 1873 yılında Maxwell elektromanyetik teorisinin temellerini oluşturmuştur [13]. Maxwell bu teoride matematiksel temellere, elektromanyetik yayılıma ve ışığın bir elektromanyetik dalga biçimi olduğuna dayanan bir hipotez oluşturmuştur. Maxwell'in bu hipotezi Olivier Heaviside tarafından 1885 – 1887 yılları arasında daha kullanışlı hale getirilerek birçok zorluğu ortadan kaldırmıştır [14].

İyi bir fizik profesörü aynı zamanda üstün yeteneklere sahip deneyci olan Heinrich Hertz, Maxwell'in teorisini anlayarak 1887 – 1891 yılları arasında elektromanyetik dalga teorisini gösteren deneyler gerçekleştirmiştir [14]. Bu deneyler, Heinrich Hertz'in 1886 yılında tanıtımını yaptığı "ilk kablosuz elektromanyetik sistem" üzerinde yapılmıştır. Deneyde, dalga boyu 4 m olan $\lambda/2$ dipolün ortasında kıvılcım yaratıp yakınında olan bir döngüde kıvılcım gözlenmiştir [2]. Şekil 2.1'de elektromanyetik deneylerde Hertz tarafından kullanılan orijinal cihazlar gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Elektromanyetik deneylerde Hertz tarafından kullanılan orijinal cihazlar [14].

Şekil 2.1’de Heinrich Hertz’in kullandığı cihazlar sırasıyla şu şekildedir. (1) 50 MHz verici kıvılcım boşluğu ve yüklü dipol anten. (2) Polarizasyon deneyleri için tel ağ. (3) Katot ışın deneyleri için vakum cihazları. (4) Sıcak-tel galvanometre. (5) Reiss veya Knochenhauer spiralleri. (6) Yuvarlanmış-kağıt galvanometre. (7) Metal küre prob. (8) Reiss kıvılcım mikrometre. (9) Eş eksenli hat. (10-12) Dielektrik kutuplanma etkilerini sergilemek için cihazlar. (13) Civalı indüksiyon bobin engelleyici. (14) Meidinger hücresi. (15) Bell kavanozu. (16) İndüksiyon bobini. (17) Bunsen hücreleri. (18) Yük depolamak için büyük alanlı iletken. (19) Dairesel döngü alıcı anten. (20) Sekiz kenarlı alıcı sezici. (21) Döner ayna ve civa engelleyici. (22) Kare döngü alıcı anten. (23) Kırılma ve dielektrik sabit ölçümü için cihazlar. (24) Kare döngü iki alıcı anten. (25) Kare döngü alıcı anten. (26) Verici dipol. (27) İndüksiyon bobini. (28) Eş eksenli hat. (29) Yüksek-gerilim boşaltıcı. (30) Silindirik parabolik yansıtıcı/alıcı. (31) Silindirik parabolik yansıtıcı/verici. (32) Dairesel döngü alıcı anten. (33) Düzlemsel yansıtıcı. (34,35) Akümülatör bataryası [14].

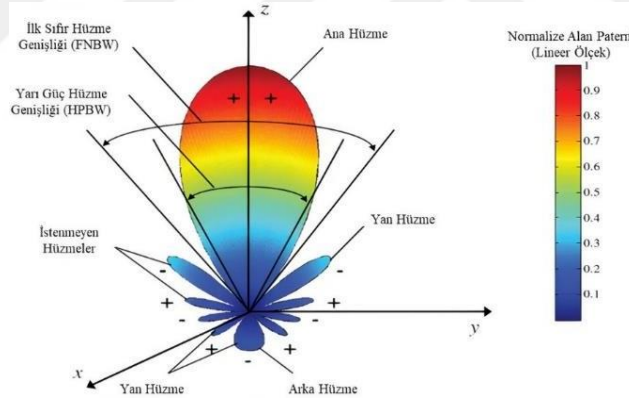
1900’lerin başında Guglielmo Marconi tarafından, 15 KW gücünde 820 KHz fan monopol anten ile İngiltere – Amerika arasında sinyal gönderilmiş ve böylece anten kelimesi literatüre kazandırılmıştır [15]. 1907 yılında Zenneck, sadece iyi bir şekilde tasarlanmış antenin iletişim için tek başına yeterli olmayacağını, bununla birlikte yer sistemlerinin de uygun şekilde tasarlanmasının antenlerin verimini daha da arttıracığını ileri sürmüştür [16]. Marconi’nin başlangıcından 1940’lı yıllara kadar geçen zamanda anten teknolojilerindeki gelişmeler UHF (300 MHz – 3 GHz)’ye kadar olan frekans aralığında gerçekleşmiştir. 2. Dünya savaşı’nın başlaması ile anten teknolojilerindeki gelişmeler hız kazanmış ve yeni anten elemanları (dalga kılavuzu açıklığı, huni, yansıtıcı antenler vb.) tanıtılmıştır.

1960 – 1990 yılları arasında bilgisayar mimarisinin ve teknolojisinin gelişimi modern anten teknolojileri üzerinde büyük değişikliğe sebep olmuştur. 1960’lı yılların başında nümerik yöntemlerin kullanılmasıyla birlikte karmaşık anten yapıları düzgün şekilde tasarlanıp doğru analizler yapılmaya başlanmıştır [2]. 1965 yılında COMSAT tarafından ilk jeosenkronize uydusu yörüngeye oturtulmuştur. Böylece uydu ile haberleşme gelecek yıllar için umutlandırmıştır [16]. Geçmişte anten tasarımına önem verilmezken artık günümüzde boyut, ağırlık, maliyet, verim ve performans açısından daha elverişli anten tasarımı yapmak ön plana çıkmaktadır [2].

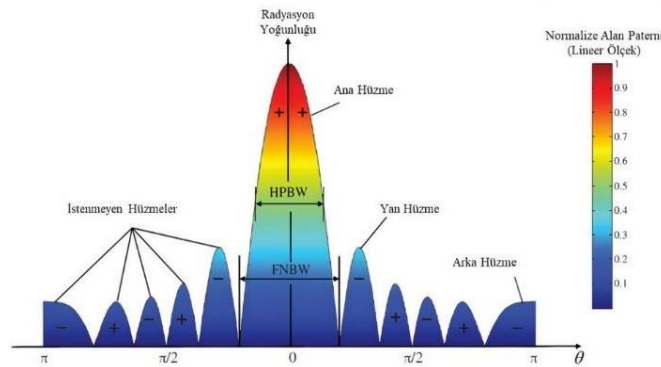
2.2 TEMEL ANTEN PARAMETRELERİ

2.2.1 Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü ya da anten örüntüsü, bir antenin yaydığı elektromanyetik alan şiddetinin, antenin uzak alan bölgesinde, sabit bir uzaklıktaki açısal değişimini gösteren grafiksel veya matematiksel ifadelerdir. Işıma örüntüsü ana, yan ve arka hüzmeler olarak adlandırılan bölümlerden oluşmaktadır. Ana hüzmeye; antenin maksimum ışıma yaptığı yönü gösteren hüzmeye denir. Amaç tüm enerjiyi ana hüzmeye yönlendirmektir. Ancak bazı istenmeyen ve engellenemeyen yan ve arka hüzmeler oluşmaktadır. Oluşan bu hüzmeler yan hüzmeler olarak adlandırılır. Arka hüzmeye; ana hüzmeye zıttı (180°) yönünde oluşan hüzmeye denir. İstenmeyen yan ve arka hüzmeler üzerinde harcanan enerjinin ana hüzmeye aktarılması mümkün olmadığı için ana hüzmeye yan ve arka hüzmelerden daha büyük olması gerekmektedir [17]. Işıma örüntüsü, üç boyutlu olarak ya da E ve H düzlemlerinde iki boyutlu olarak gösterilebilir [18]. Şekil 2.2’de üç boyutlu anten ışıma örüntüsü, Şekil 2.3’te ise aynı örüntünün iki boyutlu görüntüsü gösterilmiştir.



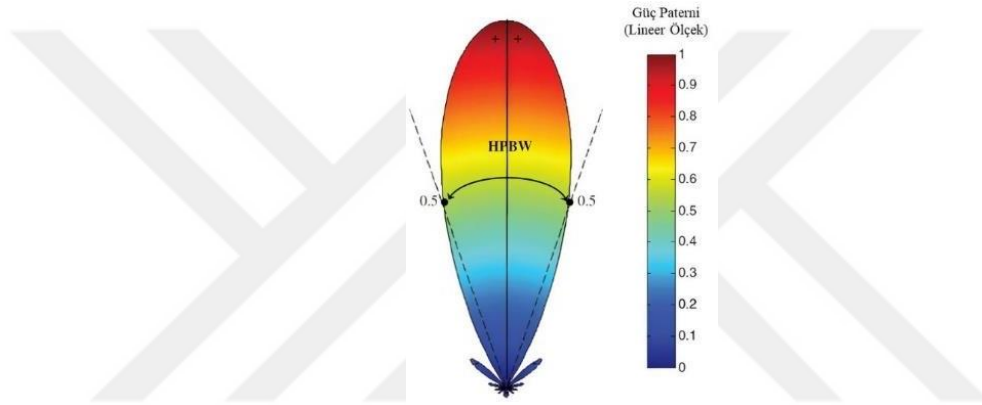
Şekil 2.2: Üç boyutlu anten ışıma örüntüsü [17].



Şekil 2.3: İki boyutlu anten ışıma örüntüsü [17].

2.2.2 Hüzme Genişliği

Hüzme genişliği, maksimum ışıma örüntüsünün yarıya düştüğü özdeş noktalar arasındaki açıdır. Yarı güç hüzme genişliği (HPBW), Şekil 2.3'te görüldüğü gibi radyasyon yoğunluğunun yarıya düştüğü ana hüzmenin her iki yanındaki noktalardan geçen istenmeyen hüzmeler arasındaki açıdır. İlk sıfır hüzme genişliği (FNBW) ise, ışıma örüntüsünün ilk sıfırları arasındaki açısal genişliktir. İlk sıfır hüzme genişliği (FNBW) ile yarı güç hüzme genişliği (HPBW) arasında matematiksel olarak $(FNBW/2 \approx HPBW)$ eşitliği elde edilir [19]. Şekil 2.4'te hüzme genişliği gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Hüzme genişliği [17].

2.2.3 Işıma Güç Yoğunluğu

Antenler tarafından yayılan elektromanyetik dalgalar bilgiyi bir ortamdan veya bir noktadan diğer noktaya iletmekte kullanılırlar [2]. Elektromanyetik dalgalarla birlikte elektromanyetik alanlara eşlik eden güç ve enerjinin bulunduğu varsayılmaktadır. Elektromanyetik alanlarla birlikte yayılan güç yoğunluğu, poynting vektörü olarak adlandırılır ve elektrik alan vektörü ile manyetik alan vektörünün vektörel çarpımı ile bulunur. Bulunan poynting vektörünün normal bileşeninin tüm yüzey üzerinden integralinin alınmasıyla yüzeyden geçen toplam anlık güç bulunabilir. Denklem 2.1'de ortalama güç yoğunluğu matematiksel olarak verilmiştir [19]. Birimi (Watt/m²)'dir [20].

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}(E \times H^*) \cdot dS \quad (2.1)$$

2.2.4 Işıma Şiddeti

Işıma şiddeti, birim katı açı (steradyan) başına antenden ışıyan güç olarak tanımlanabilir [20]. Genel olarak ışıma güç yoğunluğunun ölçüldüğü nokta ile anten arasındaki mesafenin karesi ile çarpılmasıyla bulunabilir. Denklem 2.2’de ışıma şiddeti matematiksel olarak verilmiştir [19]. Birimi (Watt/steradyan)’dır [20].

$$U = \frac{r^2}{2} \oint_S \text{Re}(E \times H^*) \cdot ds \quad (2.2)$$

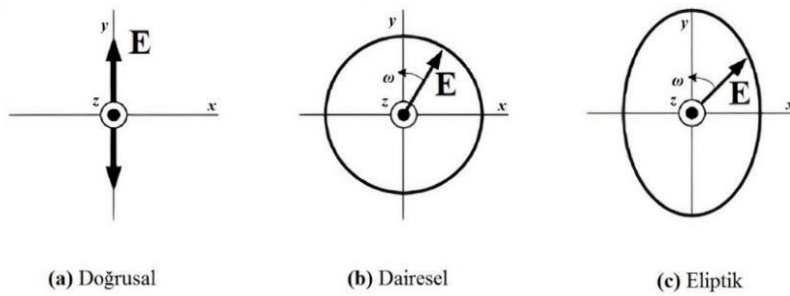
2.2.5 Yönlülük

Yönlülük, antenin maksimum ışıma şiddetinin tüm yönler üzerindeki ortalama ışıma yoğunluğuna oranı olarak tanımlanabilir. Antenin kaynaktan gelen gücü hangi açı ile yönlendirdiğini ifade eder [21]. Kayıpsız bir antende yönlülük anten kazancına eşittir. Denklem 2.3’te yönlülük matematiksel olarak verilmiştir [19]. Yönlülük birimsiz bir büyüklüktür [20].

$$D_{max} = D_0 = \frac{4\pi \times U_{max}}{p_{rad}} \quad (2.3)$$

2.2.6 Polarizasyon

Polarizasyon ya da kutuplanma, anten tarafından yayılan elektrik alan dağılımı ile ilgili bir parametredir [21]. Üç çeşit polarizasyon yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; doğrusal (linear), dairesel (circular) ve eliptik (elliptic) polarizasyon yöntemleridir [19]. Burada önemli olan verici ve alıcı anten arasındaki polarizasyon uyumudur. Eğer uyumsuzluk olursa, antenler arasında bilgi alışverişi yapılamaz ve uyumsuzluk polarizasyonu durumu oluşur [18]. Şekil 2.5’te polarizasyon çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Polarizasyon çeşitleri [19].

2.2.7 Anten Verimliliği

Anten verimliliği ya da ışıma verimliliği, antenin yaydığı ışıma gücünün, antene uygulanan elektriksel güce oranıdır ve e_0 ile gösterilir. Anten verimliliği söz konusu olduğunda birkaç tane verimlilikten bahsedilebilir [17]. Toplam verimlilikten bahsedebilmek için diğer tüm verimliliklerin de bulunması gerekmektedir [19]. Genelde tasarlanan antenin verimliliğinin 1'e eşit olması beklenir ancak anten tarafından yayılan güç, besleme gücünden küçük olduğundan dolayı genelde anten verimi 1'den küçüktür ($e_0 < 1$) [17, 22]. Anten veriminin düşmesinin sebebi, anten ve iletim hattındaki istenmeyen kayıplardır. Bu kayıplar; anten ile iletim hattı arasındaki uyumsuzluktan ve $R.I^2$ (iletim hattındaki dirençler üzerinde harcanan güç kayıpları) biçimindeki iletim ve dielektrik kayıplarından dolayı oluşmaktadır [22]. Denklem 2.4'te anten verimliliği matematiksel olarak verilmiştir [19]. Verimlilik birimsiz bir büyüklüktür [20].

$$e_0 = e_{ref} e_c e_d = (1 - |\Gamma|^2) e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) e_r \quad (2.4)$$

Bu denklemde; e_c iletim verimliliği, e_d dielektrik verimliliği, e_{ref} yansıma (uyumsuzluk) verimliliği, Γ ise yansıma katsayısını ifade etmektedir.

2.2.8 Anten Yansıma Sabiti

Yansıma katsayısı ya da sabiti, bir antenden yansıyan gerilimin antene iletilen gerilime oranı olarak tanımlanabilir [23]. Denklem 2.5'te antenin yansıma sabiti matematiksel olarak verilmiştir [19]. Yansıma sabiti birimsiz bir büyüklüktür [20].

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.5)$$

Bu denklemde; V_r antenden yansıyan gerilimi, V_i antene iletilen gerilimi, Z_{in} antenin giriş empedansını, Z_0 ise iletim hattının karakteristik empedansını ifade etmektedir.

2.2.9 Kazanç

Tasarlanan antenin performansını önemli düzeyde etkileyen kazanç parametresi, ışıyan gücün besleme gücüne oranı olarak tanımlanabilir. Kazanç, yönlülük ve anten verimliliği parametrelerinin çarpımıyla bulunabilir. Kayıpsız antenlerde kazanç ve yönlülük parametreleri birbirlerine eşittir [23]. Denklem 2.6’da kazanç formülasyonu matematiksel olarak verilmiştir [19]. Kazanç birimsiz bir büyüklüktür [20].

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (2.6)$$

2.2.10 Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)

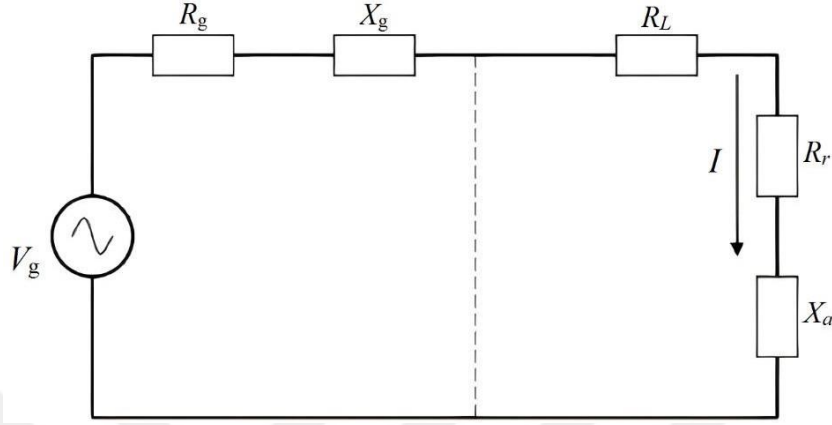
VSWR, sonlandırılmış iletim hattındaki maksimum gerilim seviyesinin minimum gerilim seviyesine oranı olarak tanımlanabilir [8]. Antenin giriş empedansı ile iletim hattının karakteristik empedansının eşit olmadığı durumda yani yük uydurulmadığında ($Z_{in} \neq Z_0$, $\Gamma \neq 0$) üreticiden alınan gücün tamamı yüke aktarılamadığı için bir kısmı iletim hattı üzerinden üreticiye geri dönmektedir, bu “dönüş kaybı” olarak adlandırılır. İletim hattından gönderilen dalgalar ile geri dönen dalgalar karşılaşarak “duran dalga” oluşturmaktadır [19]. Esasen VSWR antenin giriş empedansı ile iletim hattının karakteristik empedansı arasındaki uyumu gösterir. Yansıma sabitinin 1 veya -1 değerlerini aldığı durumlarda VSWR’e sonsuza gitmektedir ve bu kabul edilebilen bir durum değildir. Normal şartlarda istenen durum VSWR’nin 1 değerini almasıdır. Denklem 2.7’de gerilim duran dalga oranı (VSWR) matematiksel olarak verilmiştir [8]. Gerilim duran dalga oranı (VSWR) birimsiz bir büyüklüktür [20].

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.7)$$

2.2.11 Giriş Empedansı

Giriş empedansı, antenin terminallerindeki gerilimin akıma oranı ya da elektrik alanın manyetik alana oranı olarak tanımlanabilir [24]. Maksimum enerji transferi sağlayabilmek için, anten giriş empedansı ile iletim hattının karakteristik empedansının uyumlandırılması gerekmektedir.

Aksi halde antenin terminallerinde kaynak yönüne doğru geri yansıyan dalgalar oluşur ve bu dalgalar antenin parametrelerini olumsuz yönde etkiler [20]. Şekil 2.6’da antenin eşdeğer devresi üzerinde empedans dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Antenin eşdeğer devresi üzerinde empedans dağılımı [19].

Şekil 2.6’da görülen sembollerin açıklamaları birimleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

V_g : Kaynak gerilimi [V]

R_g : Kaynak direnci [Ω]

X_g : Kaynak reaktansı [Ω]

R_L : Kayıp direnci [Ω]

R_r : Radyasyon direnci [Ω]

X_a : Anten reaktansı [Ω]

$R_a = R_r + R_L$: Anten direnci [Ω]

$Z_a = R_a + jX_a$: Anten giriş empedansı [Ω]

$Z_g = R_g + jX_g$: Kaynak empedansı [Ω]

Görüldüğü gibi anten ve kaynak empedansları reel (gerçek) ve imajiner (sanal) bileşenlerden oluşmaktadır. Bir anten tasarlanırken imajiner (sanal) kısmın 0 olması istenir. Eğer, imajiner (sanal) kısım bu gerekliliği yerine getiremiyorsa antende kayıplar meydana gelebilir ya da antenin istenilen frekansta ışıma yapamadığı görülebilir.

Denklem 2.8’de antenin eşdeğer devresi üzerinden geçen akım (I) matematiksel olarak verilmiştir [20].

$$I = \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_g + Z_a} = \frac{V_g}{(R_g + R_L + R_r) + j(X_g + X_a)} \quad (2.8)$$

Antene maksimum güç aktarımı yapabilmek için (2.9) ve (2.10)’da verilen eşitliklerin sağlanması gerekmektedir.

$$R_g = R_L + R_r \quad (2.9)$$

$$jX_g = -jX_a \quad (2.10)$$

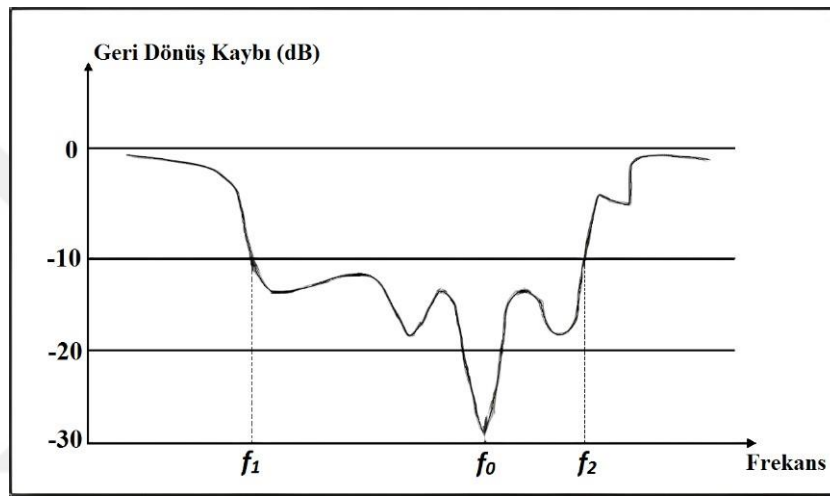
Maksimum güç aktarımı yapabilmek için ideal empedans değeri 30Ω ’dur. Ancak tasarlanan antenin minimum kayıp sağlayabilmesi için ideal empedans değeri 77Ω ’dur. Bu empedans değerleri göz önüne alınarak, tasarlanacak anten için optimum giriş empedans değerinin 50Ω seçilmesi uygun olmaktadır [19].

2.2.12 Bant Genişliği

Bant genişliği, belirli bir merkez çalışma frekansında antenin elektromanyetik dalgalar yaydığı veya aldığı alt ve üst frekans aralığı olarak tanımlanabilir. Antenin giriş empedansı, ısıma karakteristikleri, geri dönüş kaybı gibi değerlerinin frekansa bağlı olarak değiştiği bilinmektedir, bu sebeple bant genişliği önemli bir anten parametresidir [25]. Haberleşme sistemlerinde genellikle S_{11} yani geri dönüş kaybı -10 dB ’nin altına indiği değerler için bant genişliği hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla -10 dB ’nin üzerinde değerler alınırsa, alıcı ve verici antenler arasında iletişim kopuklukları oluşacaktır, zira verici antenden gönderilen elektromanyetik dalgalar yansımaya uğrayacak ve antenler arasındaki iletişimi engelleyecektir [20].

Uluslararası standartlar tarafından bir antenin geniş bant kabul edilebilmesi için, Defense Advanced Research Project Agency (DARPA)'ya göre %25, Federal Communication Commission (FCC)'ye göre %20 bant genişliğine sahip olması gerekmektedir [11]. Denklem 2.11'de bant genişliği matematiksel olarak, Şekil 2.7'de ise bant genişliğinin geri dönüş kaybı grafiği üzerinde gösterimi verilmiştir.

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{f_2 + f_1}} \times 100\% \quad (2.11)$$



Şekil 2.7: Bant genişliğinin geri dönüş kaybı grafiğinde gösterimi [19].

2.3 ANTEN ÇEŞİTLERİ

2.3.1 Tel Antenler

Tel antenler sıklıkla karşılaştığımız anten türlerinden biridir [24]. Basit yapısı ve ucuz olması sebebiyle uzun süredir çeşitli alanlarda kullanılmış ve hâlihazırda kullanımına devam edilmektedir [8]. Bu antenler otomobillerde, uçaklarda, gemilerde, binalarda ve uzay araçlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar [20]. Tel antenler şekillerine göre ikiye ayrılır. Bunlar; doğrusal ve eğrisel tel antenlerdir [8].

2.3.1.1 Doğrusal tel antenler

Doğrusal tel antenler değişken akımla indüklenirler ve iki ucu bulunmaktadır. Bu uçlardan biri işaret diğeri toprak ucudur ve açık devre ile sonlanıyormuş gibi görünürler [26].

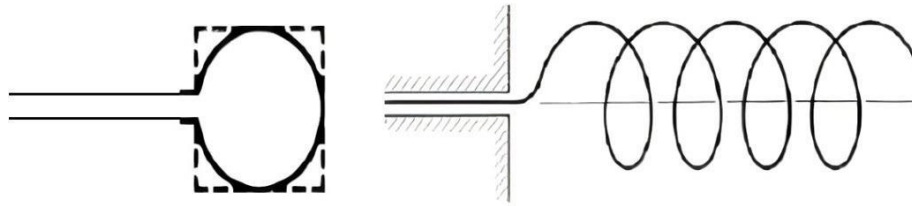
Monopol ve dipol olanları mevcuttur [8]. Eğer; işaret ucu tel, toprak ucu da iletkenliği yüksek olan metal bir plakaya bağlı ise buna monopol tel anten denir. Monopol ve dipol anten arasındaki tek fark, dipol antenin daha az akım çekmesi nedeniyle daha az gücü elektromanyetik dalgaya aktarabilmesidir. En sık kullanılan çeşidi yarım – dalga dipol antendir [26]. Şekil 2.8’de dipol doğrusal tel anten gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Dipol doğrusal tel anten [8].

2.3.1.2 Eğrisel tel antenler

Eğrisel tel antenlerde, akım doğrusal bir tel yerine, doğrusal olmayan tel üzerinden geçerek elektromanyetik dalga yayınlr. Bu antenlere örnek olarak çevrimsel (kısa devre ile sonlanıyormuş gibi) ve heliks antenler verilebilir [26]. Şekil 2.9’da sırasıyla çevrimsel ve heliks anten yapıları gösterilmiştir.

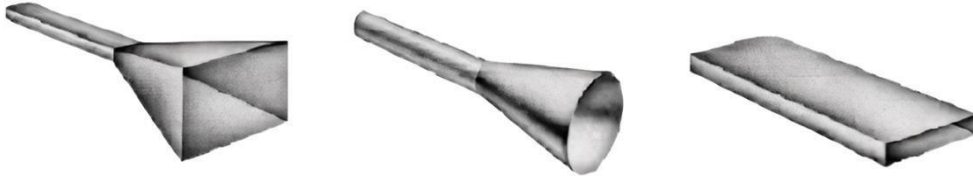


Şekil 2.9: Çevrimsel ve heliks anten [8].

2.3.2 Açıklık Antenler

Açıklık antenler, yüksek frekanslarda kullanılabilirlikleri ve karmaşık anten yapılarına sahip olmaları sebebiyle ihtiyaç duyulan alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Açıklık antenlerin birden çok çeşitleri mevcuttur. Bunlar; dikdörtgen ağızlı piramit açıklık anten, dairesel ağızlı konik açıklık anten ve dalga kılavuzlu açıklık anten yapılarıdır.

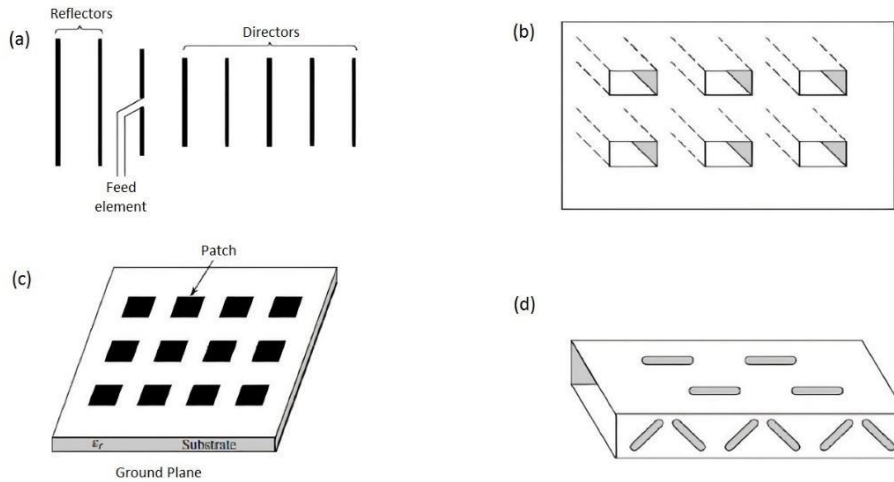
Bu yapıları sayesinde dışarıdan gelebilecek olumsuz durumlara karşı koruma sağlamak için dış kısımları dielektrik malzemeler ile kaplanarak üretilirler [27]. Ayrıca hava ve uzay araçlarına montajları da mümkündür [24]. Şekil 2.10’da sırasıyla piramit, konik ve dikdörtgen yapılı açıklık antenler gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Piramit, konik ve dikdörtgen yapılı açıklık antenler [27].

2.3.3 Dizi Antenler

Dizi antenler, birden çok aynı yapıdaki antenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş yapılardır. Bu antenlerin dizi şeklinde yapılmalarının sebebi ise, bir anten ile sağlanamayan ışıma karakteristiklerinin birden çok anten ile beraberce sağlanabilmesidir [27]. Bu bağlamda istenen ışıma karakteristiklerini oluşturabilmek için elektriksel ve geometrik düzenlemelerle ışıma elemanlarını bir araya getirmek mümkündür. Bu antenler tasarlanırken ışıma belirli yönlerden maksimum, belirli yönlerden ise minimum olacak şekilde tasarlanabilirler [28]. Şekil 2.11’de dizi anten çeşitlerine örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.11: (a) Yagi – uda dizi anteni, (b) dikdörtgen dalga kılavuzu dizi anteni, (c) mikroşerit yamalı dizi anteni ve (d) slotlu dalga kılavuzu dizi antenleri [27].

2.3.4 Yansıtıcı (Reflektör) Antenler

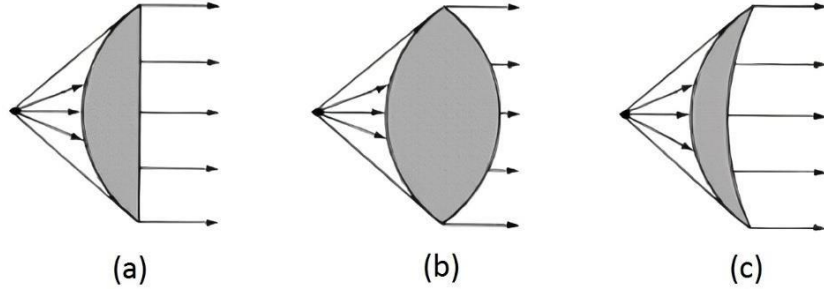
Yansıtıcı (reflektör) antenler, dar hüzme genişlikleri ve yüksek kazançlı ışıma karakteristiklerinden dolayı radar sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Ayrıca yansıtıcı yüzey geometrisinde değişiklikler yapılarak istenilen ışıma karakteristikleri elde edilebilmektedir [29]. En sık kullanılan çeşidi parabolik yansıtıcılardır [24]. Parabolik yansıtıcılar dışında köşe yansıtıcı antenler de mevcuttur. Çok uzak mesafelere sinyal gönderebilmek veya alabilmek için parabolik antenlerin çapı büyüktür (305 m'ye kadar olabilir) [28]. Şekil 2.12'de yansıtıcı (reflektör) antenler gösterilmektedir.



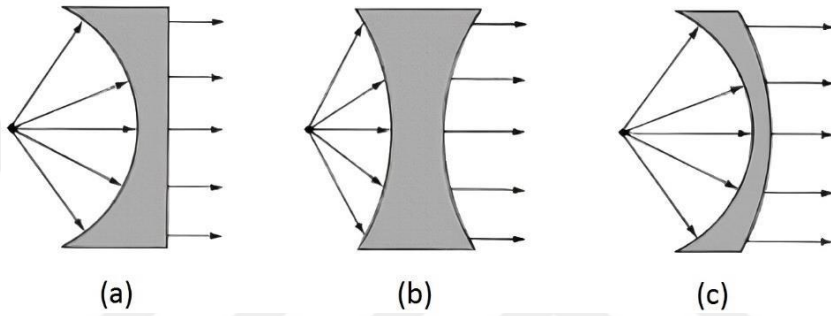
Şekil 2.12: Yansıtıcı (reflektör) antenler [30].

2.3.5 Lens (Mercek) Antenler

Lens (mercek) antenler, istenmeyen yönlerde enerjinin yayılmasını önlemek ve enerjiyi paralel duruma getirmek için kullanılan anten çeşididir. Uygun malzeme seçimiyle ve geometrik yapılarıyla mercekler, ıraksayan enerjiyi toparlayarak düzlemsel dalgalara dönüştürebilirler. Mercek yapıları özellikle yüksek frekanslarda yansıtıcı (reflektör) antenlerle birlikte kullanılırlar. Düşük frekanslarda boyut ve ağırlıkları oldukça fazladır [28]. Bu antenler yapıldıkları malzemeye ve geometrik yapılarına göre kırılma indislerinin (n) 1'den büyük ya da 1'den küçük olması durumlarına göre ince ve kalın mercekli anten olarak adlandırılmaktadırlar. Şekil 2.13'te kırılma indisinin 1'den büyük olduğu, Şekil 2.14'te ise kırılma indisinin 1'den küçük olduğu mercek antenler gösterilmektedir.



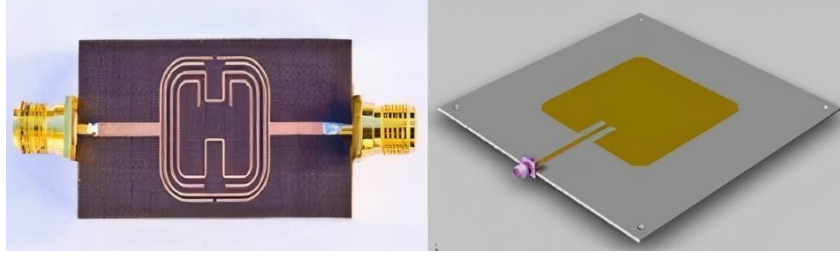
Şekil 2.13: $n > 1$ olan mercek antenler; (a) dış bükey – düz, (b) dış bükey – dış bükey ve (c) dış bükey – iç bükey [27].



Şekil 2.14: $n < 1$ olan mercek antenler; (a) iç bükey – düz, (b) iç bükey – iç bükey ve (c) iç bükey – dış bükey [27].

2.3.6 Mikroşerit Antenler

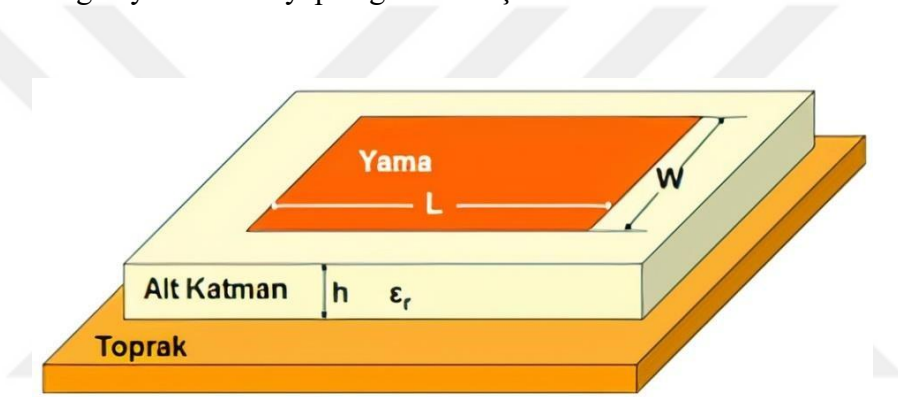
Mikroşerit antenler, 1970’li yılların başından itibaren büyük ilgi gören anten çeşidi olmuştur. Genel olarak yapısı, dielektrik taban malzemesinin üzerine ışıma yapan bir yamanın yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu antenler, yama anten olarak da bilinmektedir. Baskı devre teknolojisiyle üretilmesi, maliyetinin düşük olması, az yer kaplaması ve sert yüzeylere monte edilmesinin kolay olması gibi sebeplerle tercih edilmektedirler. Günlük yaşantımızda kullandığımız cep telefonları, bilgisayarlar ve haberleşme uydu sistemlerinde mikroşerit antenler tercih edilmektedir. Şekil 2.15’te mikroşerit antenlere örnekler gösterilmektedir. Mikroşerit antenler tezin üçüncü bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 2.15: Mikroşerit anten örnekleri [31].

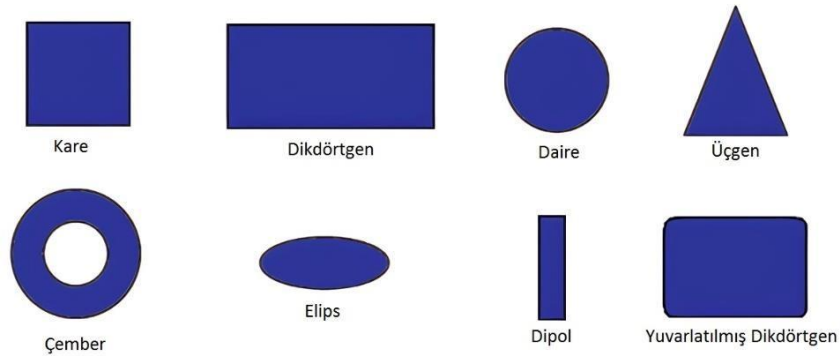
3. MİKROŞERİT ANTENLER

Mikroşerit antenler, uzay araçları, uçaklar, radarlar, uydu haberleşmesi, güdümlü mermi sistemleri gibi birçok askeri alanda, adaptif anten dizilerinde ve biyomedikal teknolojilerinde sıklıkla tercih edilmektedirler [32]. Bu antenler, her iki yüzeyi bakır kaplı dielektrik malzemenin üst yüzeyine baskı devre teknikleri uygulanarak üretilmektedirler [33]. Düşük profil yapısına sahip olduklarından dolayı, uçak, roket, insan vücudu gibi düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeylerde rahatlıkla kullanılabilirler. Genel olarak yapısı, en üstte yamanın bulunduğu ışıma yapan iletken tabaka, orta kısımda bulunan dielektrik tabaka ve en altta bulunan toprak tabaka olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır [19]. Şekil 3.1’de genel mikroşerit dikdörtgen yama anten yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Genel mikroşerit dikdörtgen yama anten yapısı [34].

İşıma yapan yama; kare, dikdörtgen, ince şerit (dipol), daire, elips, üçgen veya herhangi bir geometrik yapıda tasarlanabilir. Mikroşerit antenlerde genellikle tercih edilen yama yapıları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Mikroşerit antenlerde tercih edilen yama yapıları [34].

3.1 MİKROŞERİT ANTENLERİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 3.1’de verilmiştir [17].

Tablo 3.1: Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları.

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Az hacim kaplar ve hafiftirler.	Bant genişlikleri dardır.
Üretim maliyetleri düşüktür ve üretim prosesleri kolaydır.	Bazı kayıplar sebebiyle kazanç seviyeleri düşüktür. Genellikle 5 – 6 dB seviyelerindedir.
Mikrodalga devrelere kolaylıkla entegre edilebilirler.	Yüzey dalgaları uyarımı olabilmektedir.
İki veya üç frekanslı antenler kolaylıkla yapılabilir.	Düşük frekans bant genişliğine sahiptirler.
Doğrusal ve dairesel kutuplanmış ışıma yapabilirler.	Besleme ve eklem noktalarında istenmeyen ışımlar olabilmektedir.
Düzlemsel yapıya sahip oldukları için kullanışlıdır.	Güç kapasiteleri düşüktür.
Uçak, uydu, roket, uzay araçları gibi düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeylere kolaylıkla monte edilebilirler.	Verimlilikleri düşüktür.
Radar kesit alanları (RKA) düşüktür.	Mikroşerit antenlerin çoğu yarı düzlem içinde ışırlar.

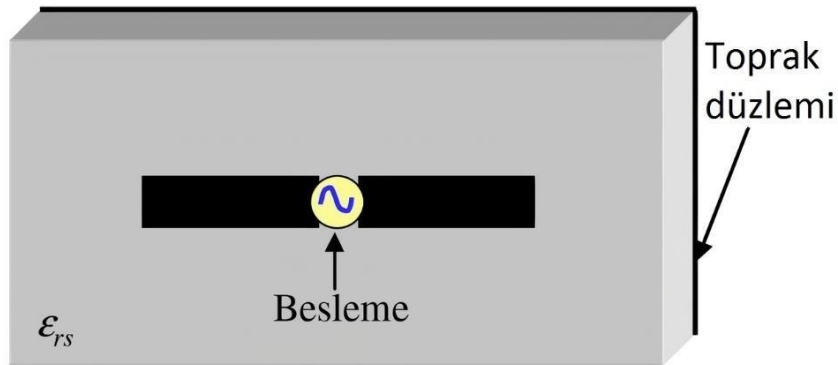
3.2 MİKROŞERİT ANTEN ÇEŞİTLERİ

3.2.1 Mikroşerit Yama Antenler

Mikroşerit yama antenler, ışımayı sağlayan yama yapısının, dielektrik taban malzemesinin üzerine istenilen geometrilerde işlenmesi ile oluşturulmaktadır. Işımayı sağlayan geometrik yapı genellikle düzlemsel yapıda olup, düzlemsel olmayan geometriler de kullanılabilir [35]. Genel olarak kazançları 5 – 6 dB seviyelerinde olup, $70^0 - 90^0$ arasında 3 dB hüzme genişliğine sahiptirler [25].

3.2.2 Mikroşerit Dipol Antenler

Mikroşerit dipol antenler, uzunluk – genişlik oranları sebebiyle iki kategoride sınıflandırılabilirler. Bu antenin genişliği, genellikle boş uzay dalga boyunun 0.05 katından daha küçük olarak ($< 0.05\lambda_0$) seçilmektedir. Akım dağılımlarının benzerliklerinden dolayı dipol ve dikdörtgen yama anten yapılarının ışıma örüntüleri ile benzerlik göstermektedir. Ancak ışıma dirençleri, bant genişlikleri ve çapraz polarizasyon ışıması gibi parametreleri büyük oranda farklılık göstermektedir. Bu antenler, diğer mikroşerit antenlere göre daha az yer kaplamaları ve doğrusal polarizasyona sahip olmaları sebebiyle tercih edilmektedirler. Şekil 3.3'te mikroşerit dipol antenin genel yapısı gösterilmiştir.

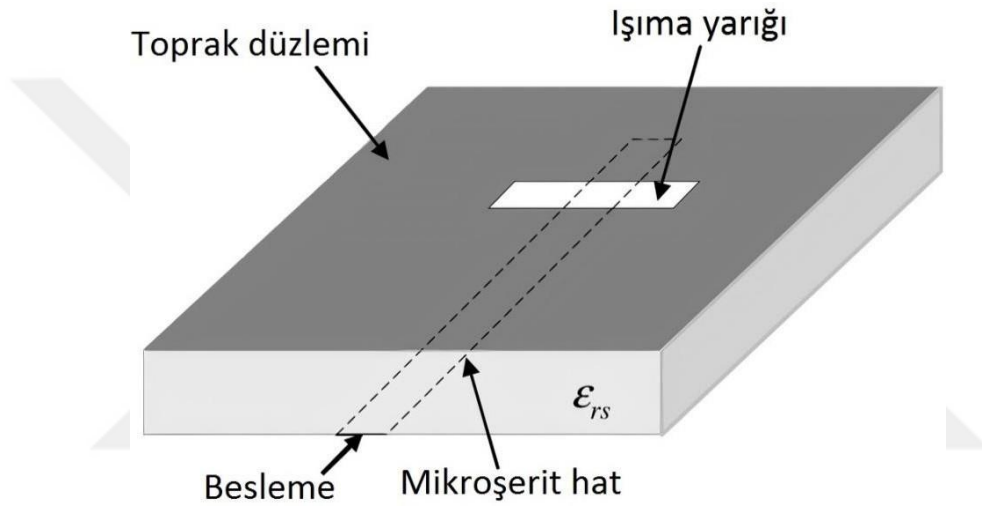


Şekil 3.3: Merkez beslemeli genel bir mikroşerit dipol anten [36].

3.2.3 Mikroşerit Yarık Antenler

Mikroşerit yarık antenler, dielektrik taban malzemesinin bir yüzeyinde geometrik bir yapıdan oluşan ışıma boşluğuna sahip toprak düzlemi, diğer yüzeyinde ise mikroşerit besleme hattı bulunmaktadır.

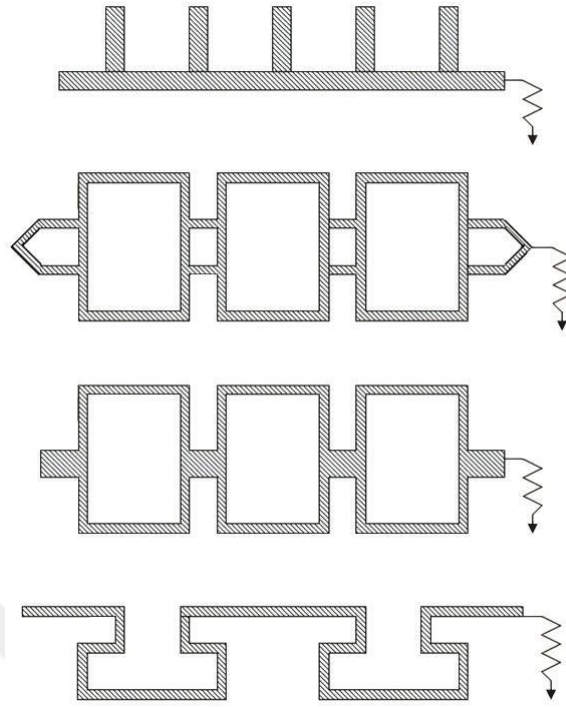
Işıma boşluğu, dairesel veya dikdörtgensel yapılardan oluşabileceği gibi, farklı yapılarda da tasarlanabilmektedir. Bu antenler genellikle mikroşerit hat ya da eş düzlemlı dalga kılavuzu tekniği kullanılarak beslenmektedirler. Diğer mikroşerit yama antenlerle kıyaslandıklarında çapraz – polarizasyon seviyeleri (~ -35 dB) oldukça düşüktür. Bu tür antenlerde ışıma, yarığın her iki yüzeyinden çift yönlü gerçekleşmektedir. Ayrıca, yarığın bir yüzeyinde kullanılacak iletken yansıtıcı ile tek yönlü ışıma da elde edilebilir. Şekil 3.4’te mikroşerit beslemeli yarık anten gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Mikroşerit beslemeli yarık anten [36].

3.2.4 Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler

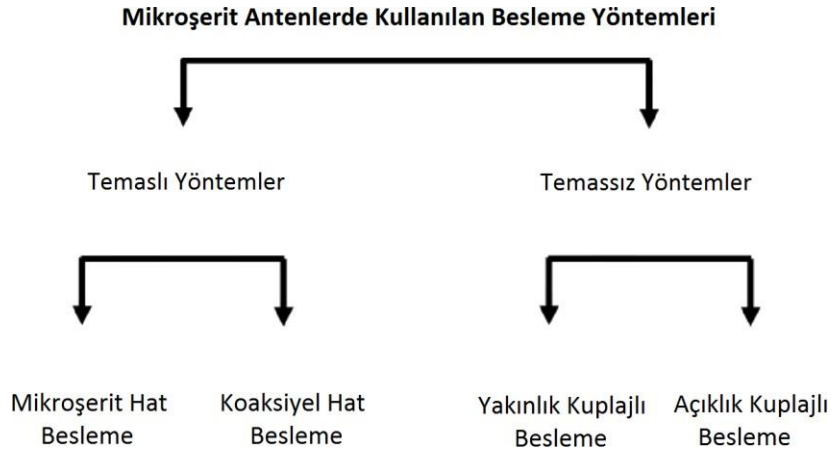
Mikroşerit yürüyen dalga antenler, genel olarak periyodik yapıya sahiptirler. Bu antenler, yürüyen dalga anten ve duran dalga anten olmak üzere iki grupta incelenmektedirler. Yürüyen dalga anten rezistif bir yük ile sonlandırılır ve ışıma yönü istenilen şekilde ayarlanabilir. Duran dalga antenler ise açık devre ya da kısa devre olarak sonlandırılır ve geniş yönlü ışıma yaparlar. En sık tercih edilen mikroşerit yürüyen dalga anten türleri; zincir – hatlı, trapezoidal – hatlı, tarak – hatlı, rampa – hatlı’dır. Şekil 3.5’te mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri [37].

3.3 MİKROŞERİT ANTENLERİ BESLEME YÖNTEMLERİ

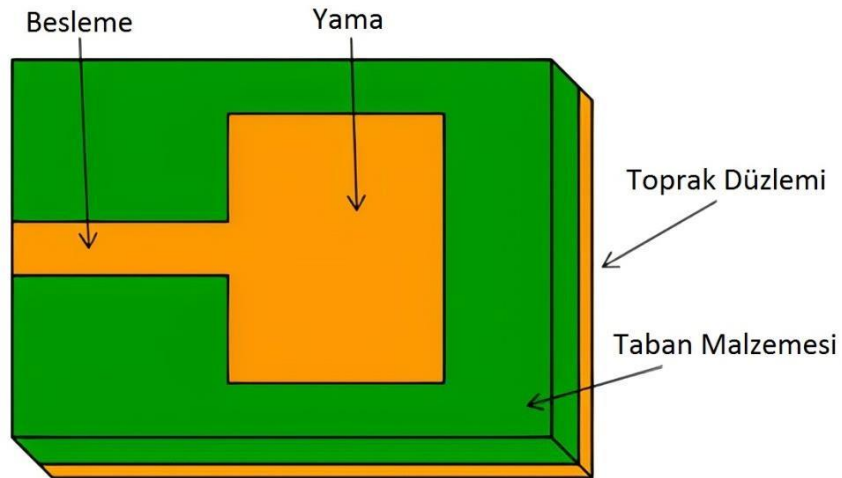
Mikroşerit antenleri beslemek için çeşitli yöntemler uygulanabilmektedir. Genel olarak sınıflandırılırsa temaslı besleme ve temassız besleme olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Temaslı besleme yönteminde; kaynaktan üretilen enerjinin taşındığı hat doğrudan ışıma yapan yama elemanına bağlıdır. Temassız besleme yönteminde ise; kaynaktan üretilen enerji ışıma yapan yamaya elektromanyetik kuplaj ile aktarılır. Temaslı besleme yöntemleri, kolay üretilebilirlikleri açısından, temassız besleme yöntemlerine göre daha sık tercih edilmektedirler. Mikroşerit antenleri beslemek için en yaygın kullanılan yöntemler mikroşerit hat, koaksiyel hat, yakınlık kuplajlı ve açıklık kuplajlı besleme yöntemleridir. Mikroşerit anten tasarımlarında genellikle mikroşerit hat ve koaksiyel hat besleme yöntemleri kullanılmış daha sonraları temassız besleme yöntemleri de tercih edilmeye başlanmıştır. Buradaki amaç; empedans uyumunu sağlayarak, aktarılan gücün büyük oranda ışıma yapan yamaya iletilebilmesini sağlamaktır. Şekil 3.6’da besleme yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme yöntemleri [17].

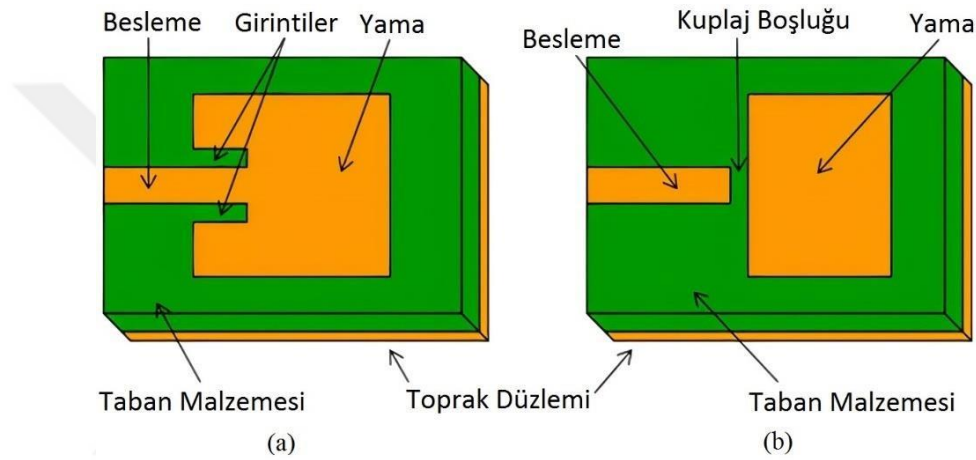
3.3.1 Mikroşerit Hat Besleme

Mikroşerit hat besleme yöntemi, yama antenlerdeki en basit besleme yöntemidir. Bu besleme yönteminde Şekil 3.7’de görüleceği üzere mikroşerit yama ile besleme hattı aynı yüzey üzerindedir. Bu yöntem genellikle dar bant genişliği sunmaktadır. Bu sebeple bant genişliğini arttırmak için taban malzemesinin yüksekliği artırılabilir. Ancak, yükseklik arttırıldıkça istenmeyen yüzey dalgaları ve besleme merkezli parazitik ışımlar oluşabilmektedir. Ayrıca, mikroşerit hattın genişliği yamanın genişliğinden daha az olduğu için empedans uyumu da oldukça zordur. Bu empedans uyumsuzluğunun giderilebilmesi için empedans uyumlaştırıcı devre kullanmadan giderebilmenin iki yöntemi mevcuttur. Şekil 3.7’de mikroşerit hat besleme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Mikroşerit hat besleme [25].

Bu yöntemlerden ilki; mikroşerit besleme hattının yama ile birleştiği noktada girinti oluşturmaktır. Bu girintinin konumu ve uzunluğu mikroşerit hattın empedansı ile uyumlu seçilmelidir. Bir diğer yöntem ise; mikroşerit besleme hattının yama ile birleştiği noktada boşluk bırakmaktır. Burada sinyal elektromanyetik kuplaj yoluyla yamaya iletilmektedir. Ancak kuplaj boşluğunu ayarlamak önemlidir ve boşluk mesafesi arttıkça güç kayıpları da artmaktadır. Ayrıca, istenmeyen ışımlar da oluşabilmektedir. Bu yöntem empedans uygunluğu bakımından ilk yönteme göre daha etkili sonuçlar vermektedir. Şekil 3.8’de empedans uyumlandırma yöntemleri gösterilmektedir.

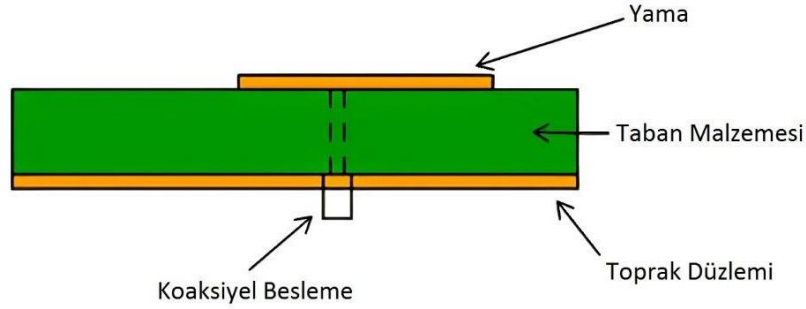


Şekil 3.8: Empedans uyumlandırma yöntemleri; (a) girintili besleme, (b) kuplaj besleme [25].

3.3.2 Koaksiyel Hat Besleme

Koaksiyel hat besleme yönteminde, besleme koaksiyel kablo ile toprak düzleminde yapılmaktadır. Bu beslemede, koaksiyel kablonun içinde bulunan iletkenin toprak ile teması yoktur. İletken dielektrik taban malzemesinin içerisinden geçirilerek doğrudan iletken yamaya temas etmektedir. Şekil 3.9’da görüleceği üzere koaksiyel kablonun dış yüzeyi toprak düzlemine temas etmektedir. Empedans uyumluluğu beslemenin konumunda yapılan değişiklikler sayesinde kolay bir şekilde ayarlanabilmektedir. Bu sebepten sıklıkla tercih edilen besleme yöntemleri arasında tercih edilmektedir. Ancak, toprak düzleminin ve taban malzemesinin delinerek iletken kablonun yamaya lehimlenerek birleştirilmesi uygulama aşamasında bu besleme yöntemini zorlaştırmaktadır. Genellikle bu besleme tekniği uygulanarak beslenen antenlerin bant genişlikleri dardır. Bant genişliğini arttırmak için taban malzemesinin yüksekliği artırılabilir. Ancak, yükseklik arttırıldıkça besleme merkezli istenmeyen ışımlar ve yüzey dalgaları oluşabilmektedir.

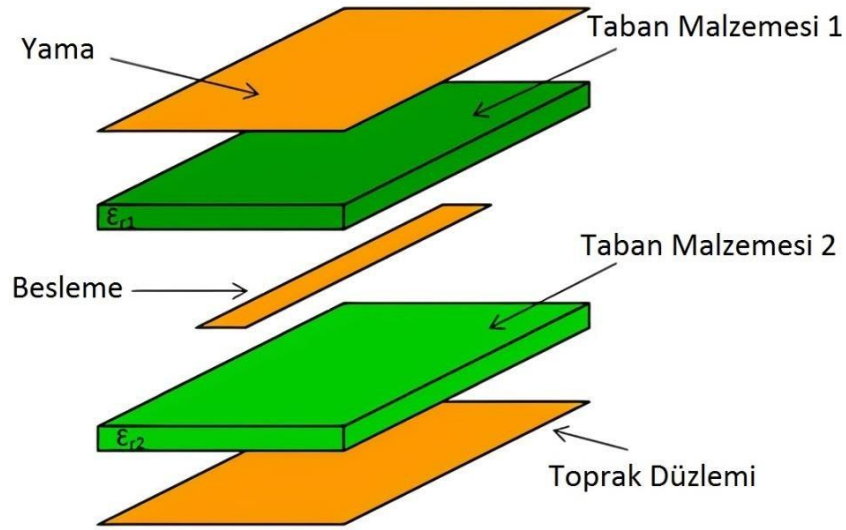
Şekil 3.9’da koaksiyel hat besleme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Koaksiyel hat besleme [25].

3.3.3 Yakınlık Kuplajlı Besleme

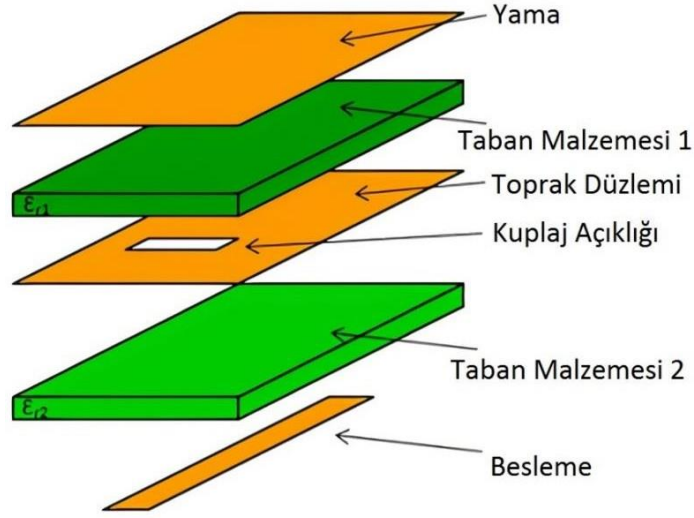
Yakınlık kuplajlı besleme yönteminde, iki adet dielektrik taban malzemesi kullanılmaktadır. Anten, dielektrik malzemelerin tam ortasından beslenmektedir. Toprak düzlemi en altta bulunan dielektrik taban malzemesinin altında yer almaktadır. Işıma yapan yama ise, en üstte bulunan dielektrik taban malzemesinin üstünde yer almaktadır. Bu yöntem Şekil 3.10’da görüleceği üzere beş katmandan oluşmaktadır. Besleme hattı ile ışıma yapan yama arasında bir bağlantı yoktur dolayısıyla sinyal elektromanyetik kuplaj yoluyla yamaya iletilmektedir. Mikroşerit hat ve koaksiyel hat besleme yöntemlerinin asimetrik olmasından dolayı istenmeyen çapraz polarizasyon ve besleme merkezli parazitik ışımlar yakınlık kuplajlı besleme yönteminde oluşmamaktadır. Işıma yapan yamanın altındaki dielektrik taban malzemesi kalın seçilerek bant genişliği artırılabilir. Besleme hattının uzunluğu, ışıma yapan yamanın uzunluğu ve genişliği, dielektrik taban malzemelerinin özellikleri ve kalınlıklarının ayarlanması ile empedans uyumlandırma yapılabilir. Besleme yapısının üretimi oldukça zordur. Ancak lehimleme işlemine ihtiyaç duyulmaması büyük avantajdır. Şekil 3.10’da yakınlık kuplajlı besleme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Yakınlık kuplajlı besleme [25].

3.3.4 Açıklık Kuplajlı Besleme

Açıklık kuplajlı besleme yöntemi, yakınlık kuplaj besleme yöntemine benzer olarak beş katmandan oluşmaktadır. En belirgin farkları Şekil 3.11’de görüldüğü üzere toprak düzlemi ile mikroşerit besleme hattının yer değiştirmiş olması ve toprak düzleminde elektromanyetik kuplaj için açıklığın bulunmasıdır. Bu açıklık ışıma yapan yamanın merkezine gelecek şekilde ayarlanarak simetri oluşturmak hedeflenmektedir. Bu hedefle çapraz polarizasyon seviyesi azaltılmaktadır. Ayrıca, toprak düzleminde bulunan açıklığın geometrik yapısı ve boyutu değiştirilerek elektromanyetik kuplaj gücü, empedans uyumu, bant genişliği gibi parametreler ayarlanabilmektedir. Bir diğer avantajı ise, toprak düzleminin ortada yer alması sebebiyle besleme merkezli parazitik ışımlar minimize edilmektedir. Bu tür besleme yöntemlerinde, besleme hattının üzerindeki dielektrik taban malzemesinin ince ve büyük dielektrik sabitine sahip olması, ışıma yapan yamanın altındaki dielektrik taban malzemesinin ise kalın ve küçük dielektrik sabitine sahip olması hedeflenmektedir. Bu besleme yönteminin dezavantajı da yakınlık kuplaj besleme yönteminde olduğu gibi fazla katman yapısından dolayı hizalanmasının zor olmasıdır. Şekil 3.11’de açıklık kuplajlı besleme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Açıklık kuplajlı besleme [25].

Mikroşerit antenlerin farklı besleme yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 3.2’de verilmiştir [17, 25].

Tablo 3.2: Mikroşerit antenlerin farklı besleme yöntemlerinin karşılaştırılması.

Karakteristik Özellikleri	Mikroşerit Hat Besleme	Koaksiyel Hat Besleme	Yakınlık Kuplajlı Besleme	Açıklık Kuplajlı Besleme
Konfigürasyon	Eş düzlemli	Farklı düzlemli	Paralel düzlemli	Paralel düzlemli
İstenmeyen Yan-Arka Lob Işınması	Çok	Az	Az	Yok
Polarizasyon Saflığı	İyi	Kötü	Kötü	Mükemmel
İmalat Zorluğu	Kolay	Delme ve titiz lehimleme gerekli	Paralel hizalama gerekli	Paralel hizalama gerekli
Dayanıklılık	Daha iyi	Lehimleme nedeniyle kötü	İyi	İyi
Empedans Uydurma	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant Genişliği (Empedans uyumunun sağlanması şartıyla)	~ %2 – 5	~ %2 – 5	~ %13	~ %21

3.4 DİELEKTRİK TABAN MALZEMESİ

Anten tasarımında dielektrik taban malzeme seçimi oldukça önemlidir. Mikroşerit yama antenlerin, anten parametreleri dielektrik taban malzemesine bağlıdır. Ayrıca, dielektrik sabiti ve taban malzemesinin kalınlığı antenin genel performansını etkilemektedir. Genellikle, RF devrelerinde, $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığında dielektrik sabitine sahip dielektrik taban malzemesi kullanılır. Işıma yapan yamanın genişliğini ve uzunluğunu kabaca hesaplayabilmek için, dielektrik taban malzemesinin kalınlığı ve dielektrik sabitinden yararlanılmaktadır. Tasarımda her şey frekansa bağlı olduğundan dolayı dielektrik taban malzemesinin karakteristik özellikleri dikkate alınmaktadır. Uygulamada, yüksek dielektrik sabitine sahip dielektrik taban malzemeleri ucuz oldukları için sıklıkla tercih edilmektedir ve mikroşerit yama antenlerin ışıma verimliliğini de azaltmaktadır. Aksine, düşük dielektrik sabitine sahip dielektrik taban malzemelerinin kullanılmasıyla birlikte mikroşerit yama antenlerin performansları artmaktadır. Üst düzey uygulamalar için (radar sistemleri, uzay mekiğindeki görüntüleme sistemleri vb.) tasarımcılar düşük dielektrik sabitine sahip, yüksek kalitede dielektrik taban malzemeleri tercih etmelidirler. Ancak bu malzemeler nadir bulunur, pahalıdır ve bant genişlikleri dardır. Tablo 3.3'te çeşitli dielektrik taban malzemelerinin anten parametreleri üzerindeki performanslarını gösteren sayısal veriler verilmiştir [38]. Bu tezde, tasarımı yapılan antenler için aşağıdaki taban malzemeleri kullanılmış ve alınan sonuçlar dördüncü bölümde verilmiştir.

Tablo 3.3: Çeşitli dielektrik taban malzemelerinin karşılaştırılması.

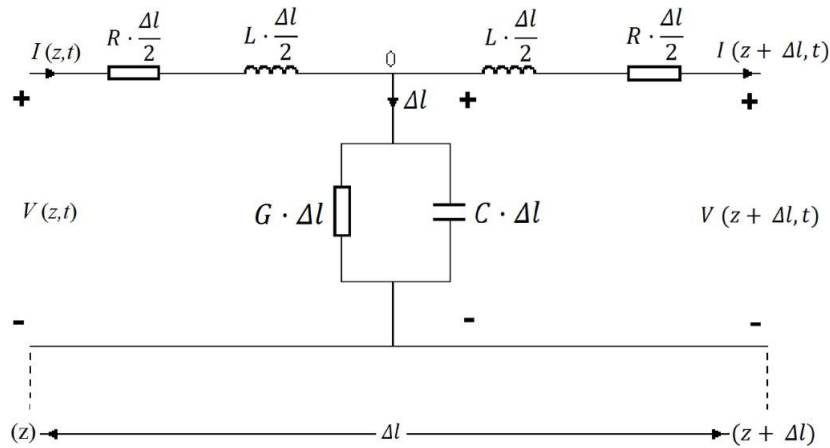
Anten Parametreleri	Rogers RT Duroid™	Taconic TLC	Rogers RO4003	FR-4 Epoksi	Bakelite
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	2.2	3.2	3.5	4.4	4.8
Geri Dönüş Kaybı, S_{11} (dB)	-25.02	-26.26	-31.06	-20.64	-30.68
Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)	1.26	1.61	1.68	1.28	1.78
Kazanç (dB)	3.429	5.11	5.20	1.89	3.286

3.5 MİKROŞERİT ANTENLERİ ANALİZ YÖNTEMLERİ

Mikroşerit antenlerin analizinde birçok farklı yöntem kullanılabilmektedir. Ancak, sıklıkla tercih edilen yöntemler; iletim (transmisyon) hattı modeli, boşluk (kavite) modeli ve tam dalga modeli'dir.

3.5.1 İletim (Transmisyon) Hattı Modeli

İletim hattı modeli, 1970 yılında P. B. Johns tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde, elektromanyetik alan teorisi ve devre teorisi kullanılarak çözüme ulaşılmaktadır [39]. Devre teorisiyle iletim hattı teorisi arasındaki temel fark, elektriksel büyüklüktür. Devre teorisinde devrenin fiziksel boyutlarının elektriksel dalga boyundan çok daha küçük olduğu varsayılır. Oysa iletim hatlarının büyüklüğü dalga boyuna yakındır. Dolayısıyla, iletim hattı uzunluğu boyunca gerilim (V) ile akımın (I) genliği ve fazı değişir [14]. Bu modellemede, yapı birim hücrelere bölünerek her hücre ayrı ayrı çözüme ulaştırılmaktadır. Bu hücrelere, Kirchhoff'un gerilim ve akım yasası uygulanarak hücrelerin giriş ve çıkış gerilimleri bulunur. Bu modellemede, T tipi iletim hattı eşdeğer devresi kullanılmaktadır. Bu eşdeğer devreler daha sonra bir araya getirilerek sistem çözümlenir [39]. İletim hattı modeli; kare, dikdörtgen gibi geometrik yapıların analizinde sıklıkla tercih edilen basit analitik yöntemdir ve iyi bir fiziksel bakış açısı sağlar [17, 19]. Şekil 3.12'de T tipi iletim hattının eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.12: T tipi iletim hattı eşdeğer devresi [39].

Şekil 3.12’de görülen sembollerin açıklamaları birimleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

R : Birim uzunluk başına seri direnç [Ω/m]

L : Birim uzunluk başına seri endüktans [H/m]

G : Birim uzunluk başına paralel iletkenlik [S/m]

C : Birim uzunluk başına paralel kapasitans [F/m]

Şekil 3.12’deki devreye Kirchhoff’un gerilim yasası uygulanırsa, gerilim eşitliği;

$$V(z, t) = R \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot I(z, t) + L \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} + V\left(z + \frac{\Delta l}{2}, t\right) \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) düzenlenirse;

$$-\frac{V\left(z + \frac{\Delta l}{2}, t\right) - V(z, t)}{\frac{\Delta l}{2}} = R \cdot I(z, t) + L \cdot \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

$\Delta l \rightarrow 0$ limitinin alınması aşağıdaki diferansiyel denklemi verir;

$$-\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} = R \cdot I(z, t) + L \cdot \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

Şekil 3.12’deki devreye Kirchhoff’un akım yasası uygulanırsa, akım eşitliği;

$$I(z, t) = I\left(z + \Delta l, t\right) + \Delta I \quad (3.4)$$

Denklem (3.4) düzenlenirse;

$$I(z, t) = I\left(z + \Delta l, t\right) + G \cdot \Delta l \cdot V\left(z + \frac{\Delta l}{2}, t\right) + C \cdot \Delta l \cdot \frac{\partial V\left(z + \frac{\Delta l}{2}, t\right)}{\partial t} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) düzenlenirse;

$$-\frac{I(z + \Delta l, t) - I(z, t)}{\Delta l} = G \cdot V(z + \frac{\Delta l}{2}, t) + C \cdot \frac{\partial V(z + \frac{\Delta l}{2}, t)}{\partial t} \quad (3.6)$$

$\Delta l \rightarrow 0$ limitinin alınması aşağıdaki diferansiyel denklemi verir;

$$-\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = G \cdot V(z, t) + C \cdot \frac{\partial V(z, t)}{\partial t} \quad (3.7)$$

Denklem (3.3) ve (3.7) iletim hattı denklemlerinin zaman domenindeki karşılıklarıdır ve “telgrafçı denklemleri” olarak da bilinirler. Denklem (3.3) ve (3.7) sinüzoidal durgun – durum koşulu için, kosinüs tabanlı fazörler ile ifade edilirse;

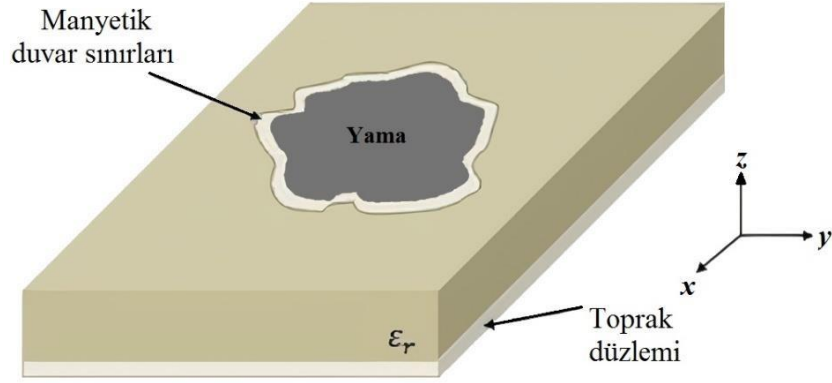
$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (3.8)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (3.9)$$

olarak sadeleşir. Denklem (3.8) ve (3.9)’un biçimi ile EK A bölümündeki (A.7) ve (A.8)’deki Maxwell dönel denklemlerinin benzerliğine dikkat edilmelidir [14].

3.5.2 Boşluk (Kavite) Modeli

Boşluk (kavite) modeli veya bir başka adıyla rezonatör modeli, iletim (transmisyon) hattı modelinden farklı olarak sadece kare, dikdörtgen gibi geometrik yapılar yerine birçok geometriye uygulanabilen analitik yöntemdir [32]. Ayrıca, iletim (transmisyon) hattı modeline göre daha doğru sonuçlar verir. Ancak, iletim (transmisyon) hattı modeline göre daha karmaşık analitik bir yöntemdir [17]. Bu modellemeye, iletken yama ile toprak düzlemi arasında kalan bölüm boşluk olarak kabul edilir ve manyetik duvarlarla çevrilidir. Burada, dielektrik taban malzemesinin kalınlığı (h) azdır [40]. Şekil 3.13’te manyetik duvar ile sınırlandırılan rezonans boşluğu görülmektedir.

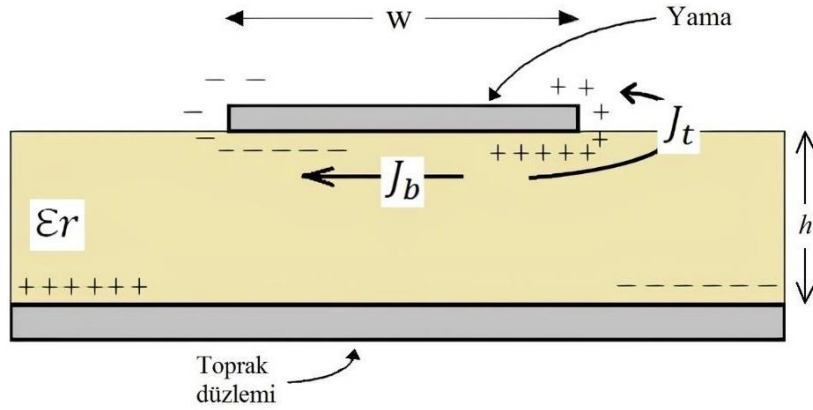


Şekil 3.13: Mikroşerit antenin boşluk (kavite) modeli kullanılarak temsili [19].

Bu model, ince dielektrik taban malzemesi için şu gözlemleri varsaymaktadır [19, 41]:

- Dielektrik taban malzemesi çok ince ($h \ll \lambda_0$) olduğundan dolayı, kavitenin iç bölgesindeki alanlar z ekseninde yayılım göstermezler ($\frac{\partial}{\partial z} = 0$).
- Elektrik alanı yalnızca z eksen yönündedir (E_z), manyetik alanı ise ışıma yapan yama ile toprak düzlemi arasında sınırlandırılan bölgede birbirine dik iki düzlem olan H_x ve H_y bileşenlerine sahiptir.
- Elektrik akımı, herhangi bir yönde ışıma yapan iletken yamanın kenarında yüzey normal bileşeni oluşturmaz ($\frac{\partial E_z}{\partial n} = 0$).

Yamaya enerji verildiğinde, Şekil 3.14'te görüldüğü gibi yamanın alt ve üst yüzeyi ile zemin yüzeyinde yük dağılımı oluşur. Oluşan bu yük dağılımı çekici ve itici mekanizma tarafından kontrol edilir. Çekici mekanizma, ışıma yapan yama ile zemin yüzeyinde eş zıt yükler arasındadır. Bu mekanizma, yamanın altındaki yük yoğunluğunu korumayı hedeflenmektedir ve yamanın alt yüzeyindeki dielektrik tabaka içerisinde J_b akım yoğunluğu oluşturur. İtici mekanizma ise, ışıma yapan yamanın alt yüzeyi üzerinde benzer yükler arasındadır. Bu mekanizma, ışıma yapan yamanın alt yüzeyindeki bazı yükleri yamanın kenarından üst yüzeye doğru itmeyi hedeflemektedir ve yamanın üst yüzeyinde J_t akım yoğunluğu oluşturur [2]. Şekil 3.14'te mikroşerit yama anten üzerinde oluşan yük dağılımları ve akım yoğunlukları gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Mikroşerit yama anten üzerinde oluşan yük dağılımları ve akım yoğunlukları [42].

Boşluktaki elektrik ve manyetik alanlar E_z , H_x ve H_y olmak üzere üç alan bileşeni mevcuttur. Buna göre;

- Dalga sayısının karesi: $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r$
- Besleme hattı tarafından yamayı besleyen elektrik akım yoğunluğu: J
- Yama düzlemine normal bir birim vektörü: $\hat{z}$

tanımları yapılırsa elektromanyetik dalga denklemi, Denklem (3.10) ve (3.11)'de görüldüğü gibi yeniden yazılabilir [42].

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k^2 \vec{E} = -j\omega\mu_0 J \quad (3.10)$$

$$\nabla^2 E_z + k^2 E_z = j\omega\mu_0 \hat{z} \cdot J \quad (3.11)$$

Dalga denklemiyle birlikte elektrik ve manyetik alanlar, Denklem (3.12) ve (3.13)'te bulunan sınır koşullarını yani dielektrik sınırdaki yüzeyin yüzey akım yoğunluğunun bulunmadığı koşulunu da sağlanması gerekmektedir [19].

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (3.12)$$

$$\hat{n} \times H = 0 \quad (3.13)$$

3.5.3 Tam Dalga Modeli

Tam dalga modeli, iletim (transmisyon) hattı ve boşluk (kavite) modelleri arasında en doğru sonuçları veren, ancak en karmaşık analiz yöntemine sahip bir modellemedir. İletim (transmisyon) hattı ve boşluk (kavite) modelleri dalga veya yarı dalga kılavuzlarını (ilerleme tipleri; mod) kullanırken, tam dalga modeli ise tam dalga kılavuzunu kullanmaktadır, dolayısıyla analiz sonuçları yüksek doğruluk (%100'e yakın) göstermektedir [17]. Bu sebeple karmaşık yapıların analizinde tam dalga modelinin kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir [39]. Elektromanyetik simülasyon programları genellikle şu yöntemleri kullanarak sonuç elde ederler;

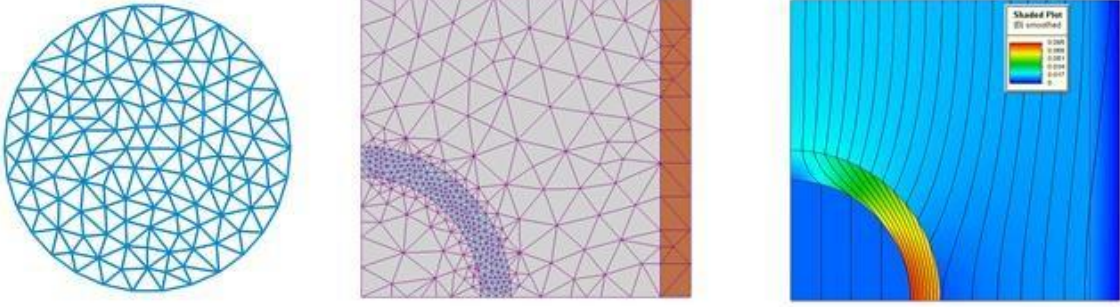
- Momentler Yöntemi (MoM)
- Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)
- Sonlu İntegral Yöntemi (FIM)

Bu tez çalışmasında, Ansys HFSS simülasyon programı kullanılmıştır. HFSS, elektromanyetik yapıları FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi – Finite Element Method) ile çözen simülasyon programıdır [12].

3.5.3.1 Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, matematiksel fiziğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntem denge ve titreşim problemlerini çözmek için ilk olarak 1940'larda önerilmiş ve 1950'li yıllarda uçak tasarımlarında kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraları yöntem geliştirilerek yapısal analiz sorunları, akışkanlar dinamiği, esneklik, elektromanyetik problemler gibi diğer alanlardaki sorunlarda giderek daha fazla kullanılmıştır. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik ve matematik problemlerinde yaygın olarak kullanılan genel bir yöntem olarak kabul edilmektedir [43]. Bu yöntem, bir sistemi sonlu eleman olarak adlandırılan küçük bileşenlere ayırır. Öncelikle, sistemin problem uzayının ayrıklaştırılması ile sistem küçük bölgelere bölünür.

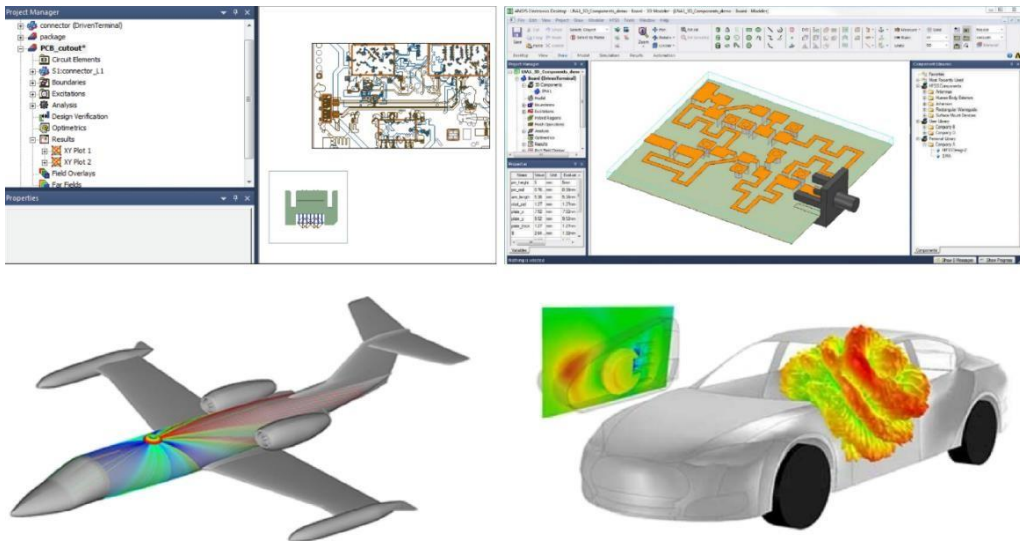
Daha sonra sınır değer probleminin formülasyonu sonucu denklem sistemleri oluşturulur. Bu denklemler Rayleigh – Ritz ya da Galerkin gibi çeşitli metodlar kullanılarak çözülür. Buradan elde edilecek sonuçlar temel fonksiyon cinsindendir. Yani fonksiyonlar kullanılarak asıl çözümün interpolasyonu yapılır. Şekil 3.15'te sonlu elemanlar yöntemi kullanılan bazı örnek problemlerin küçük bileşenlere ayrıldığı görülmektedir.



Şekil 3.15: Bazı örnek problemlerin küçük bileşenlere ayrılması [44].

3.6 HFSS SİMÜLASYON PROGRAMI

Ansys HFSS yazılımı, antenler, anten dizileri, RF veya mikrodalga bileşenleri, filtreler, IC (entegre devre) paketleri ve PCB (baskı devre kartları) gibi yüksek frekanslara sahip ürünleri tasarlamak ve simüle etmek için kullanılan üç boyutlu tam dalga elektromanyetik simülasyon yazılımıdır. Şekil 3.16'da HFSS programı ile yapılmış tasarım ve simülasyon örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.16: HFSS programı ile yapılmış tasarım ve simülasyon örnekleri [12].

3.7 ANTEN BOYUTLARININ HESAPLANMASI

Mikroşerit anten boyutlarının hesaplanabilmesi için bazı eşitliklerin kullanılması gerekmektedir. Bu eşitlikler bize kabaca sayısal değerler vererek iyi bir bakış açısı sağlayacaktır. Bu değerler üzerinde ufak değişiklikler yaparak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

3.7.1 Dairesel Mikroşerit Anten Boyutlarının Hesaplanması

Dairesel yamanın gerçek yarıçapı (a), etkin yarıçapı (a_e), dielektrik tabanın kalınlığı (h), taban malzemesinin dielektrik sabiti (ϵ_r) ve rezonans frekansı (f_r) olarak tanımlanırsa; yamanın gerçek yarıçapı Denklem 3.14'te verilmiştir [45].

$$a = \frac{F}{\pi \epsilon_r F \left\{ 1 + \frac{2h}{(2h)} [\ln \frac{\pi F}{2h} + 1.7726] \right\}^{1/2}} \quad (3.14)$$

Bu denklemde, $F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$ olarak tanımlanır. Yamanın etkin yarıçapı Denklem 3.15'te verilmiştir.

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon a} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (3.15)$$

3.7.2 Halka Mikroşerit Anten Boyutlarının Hesaplanması

Halka yamanın iç yarıçapı (R_1) ve dış yarıçapı (R_2) olarak tanımlanırsa; R_1 ve R_2 değerlerinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitliklerin kullanılması gerekmektedir [46].

$$R = 0.5(R_1 + R_2) \quad (3.16)$$

$$\frac{R_2 - R_1}{R} = 0.8 \quad (3.17)$$

$$kR = 2 \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)'de, $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ propagasyon sabitidir ve $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ olarak bulunabilir. Burada; boş uzaydaki dalga boyu (λ_0), ışık hızı (c) ve çalışma frekansı (f) olarak tanımlanır.



4. ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

4.1 X BANT MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

Bu tezde, x bandında çalışabilen mikroşerit halka yama anten tasarımı yapılmış ve Ansys HFSS simülasyon programı üzerinden elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Tasarlanan halka yama anten; koaksiyel hat, mikroşerit hat, yakınlık kuplajlı ve açıklık kuplajlı besleme yöntemleri kullanılarak beslenmiştir. Halka yama boyutları, eşitlikler (3.16) – (3.18) kullanılarak elde edilmiş ve en optimum konfigürasyon kullanılmıştır. Dielektrik taban malzemesi için sıklıkla kullanılan FR – 4 ve Rogers RT – 5880 malzemeleri tercih edilmiştir. Tasarlanan halka yamanın iç ve dış yarıçapları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Halka yamanın iç (R_1) ve dış (R_2) yarıçapları (milimetre).

R_1	R_2
13.2	32.8

Bu tezde tasarladığımız x bant mikroşerit halka yama antenler 4 farklı besleme biçimine göre incelenmiştir. Aşağıda bu 4 farklı besleme şekline göre adlandırdığımız tasarımlar ve sonuçları ile ilgili detaylı açıklamalar verilmektedir.

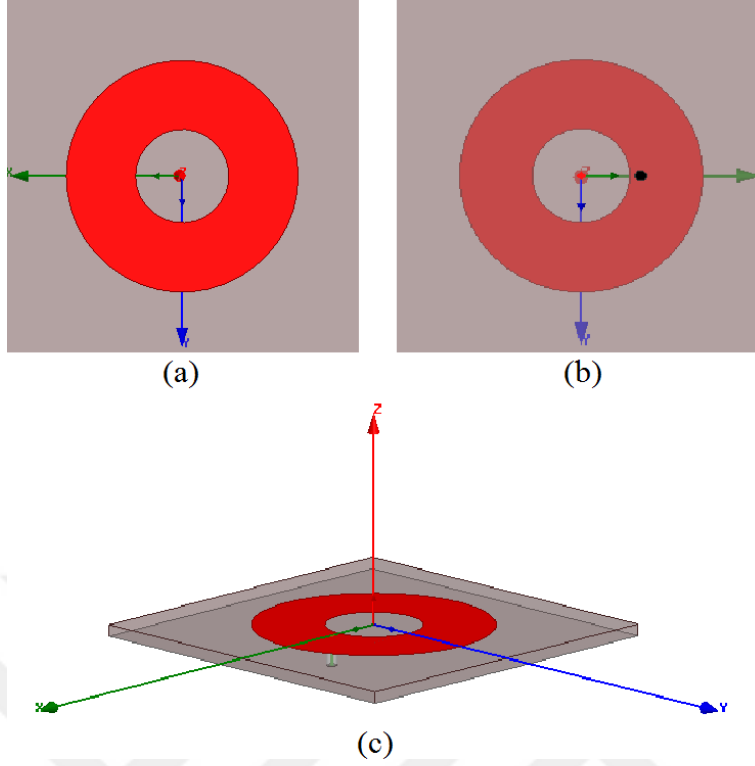
4.2 TASARIM – 1

İlk tasarımda, x bandında çalışan mikroşerit halka yama anten koaksiyel besleme yöntemi ele alınarak modellenmiştir. Tasarımda, Rogers RT – 5880 dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. Anten parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: X bandında çalışan koaksiyel beslemeli antenin parametreleri.

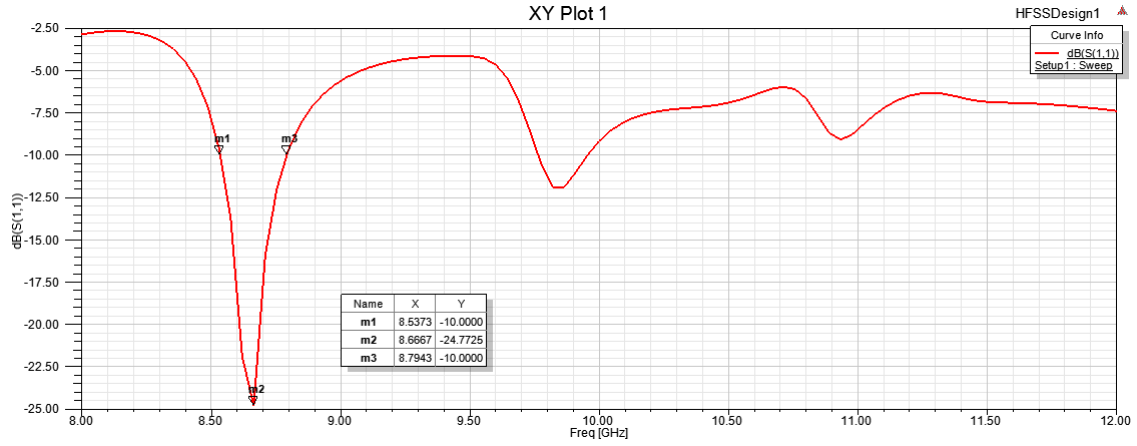
Parametre	Tanım	Uzunluk
R_1	Yamanın iç yarıçapı	13.2 mm
R_2	Yamanın dış yarıçapı	32.8 mm
h	Dielektrik tabanın kalınlığı	3.175 mm
X	Besleme noktasının konumu (x, y, z)	(16, 0, 0) mm
r_i	Koaksiyel beslemenin iç yarıçapı	0.56 mm
r_o	Koaksiyel beslemenin dış yarıçapı	1.5 mm
Y	Yamanın konumu (x, y, z)	(0, 0, 0) mm
S	Taban malzemesi ve toprak düzlemi boyutu	100 mm
ϵ_r	Dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti	2.2
$\tan \delta$	Kayıp tanjantı	0.0009

Tasarlanan anten Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



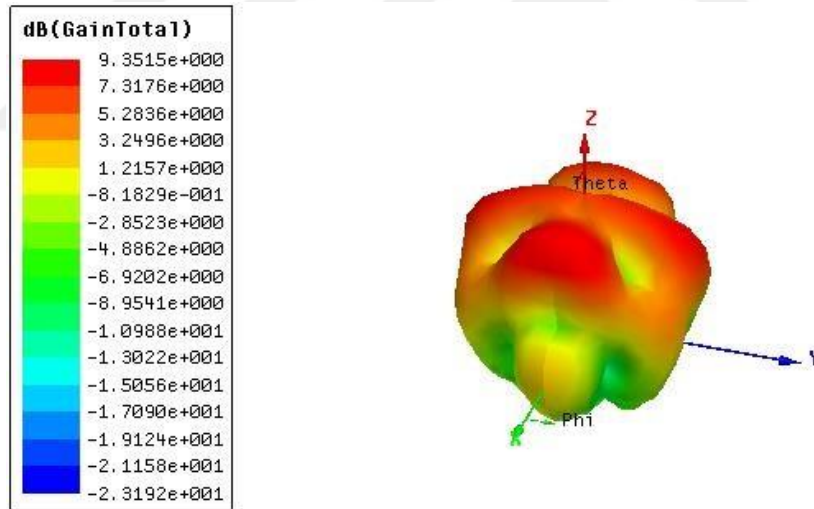
Şekil 4.1: Tasarlanan koaksiyel beslemeli mikroşerit halka yama anten
(a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri.

Simülasyon sonucuna göre geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Geri dönüş kaybı grafiği incelendiğinde rezonans frekansının 8.66 GHz olduğu görülmektedir. Anten rezonans frekansında -24.77 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Tasarlanan antenin -10 dB değerine karşılık gelen frekansları sırasıyla 8.53 GHz ve 8.79 GHz değerindedir. Bant genişliği değeri 260 MHz (%3) olarak hesaplanmıştır. Koaksiyel beslemede bant genişliğinin %2 – 5 aralığında olması beklenir. Dolayısıyla elde edilen bant genişliği kabul edilebilir sınırlar içerisinde.



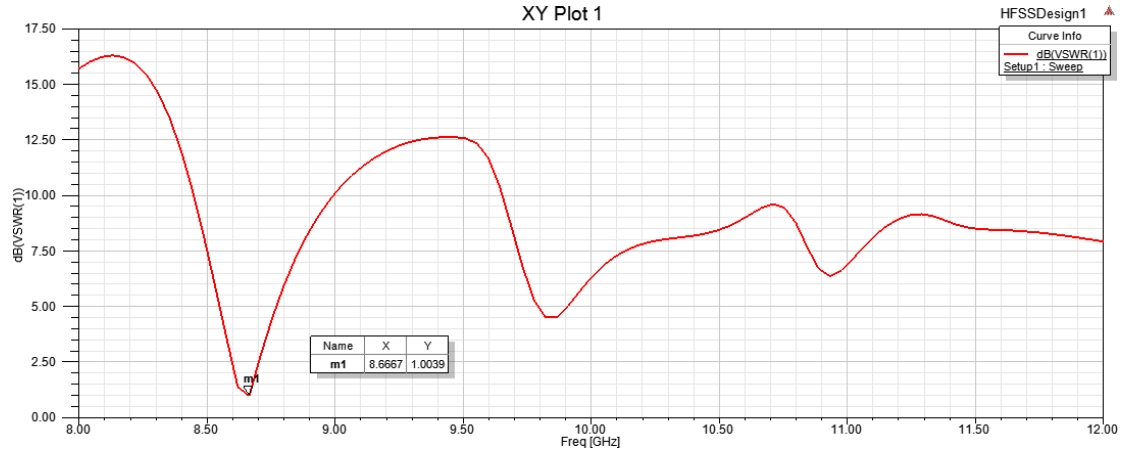
Şekil 4.2: Koaksiyel beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.

Tasarlanan antenin üç boyutlu kazanç grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Anten rezonans frekansında z yönünde 9.35 dB maksimum kazanç değerine sahiptir. Mikroşerit antenlerde kazanç değerinin 5 – 6 dB aralığında olduğu düşünülürse, elde edilen kazanç değerinin yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4.3: Koaksiyel beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.

Tasarlanan antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Antenin rezonans frekansındaki VSWR değeri yaklaşık olarak 1'dir. VSWR değerinin 1'e yakın sonuç vermesi antenin empedans uyumunun iyi bir şekilde sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.4: Koaksiyel beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği.

Tasarlanan antenin simülasyon sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, anten parametrelerinin iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 4.3: Koaksiyel beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları.

Parametreler		Sonuçlar
Frekans	f_r	8.6667 GHz
Geri dönüş kaybı	S_{11}	-24.7725 dB
Gerilim duran dalga oranı	VSWR	1.0039
Kazanç	G	9.3515 dB
Bant genişliği	BW	260 MHz

4.2.1 Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, dielektrik taban malzemesinin kalınlığı 0.175 mm hassasiyetle artırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4: Taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin koaksiyel beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Dielektrik Taban Malzemesi Kalınlığı (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Koaksiyel Besleme	2.125	9.8953	10	10.1333	240	9.2646	1.0444	-24.4302
	2.3	9.8533	9.9556	10.1104	260	9.2242	0.3935	-32.9000
	2.475	9.8438	9.9556	10.1095	260	9.2551	1.2138	-23.1282
	2.65	8.5919	8.7111	8.8402	250	9.2975	1.5522	-21.0012
	2.825	8.5729	8.6667	8.8319	260	9.3137	0.6969	-27.9387
	3	8.5469	8.6667	8.8105	263	9.3669	0.4574	-31.5933
	3.175	8.5373	8.6667	8.7943	260	9.3515	1.0039	-24.7725
	3.35	8.5200	8.6222	8.7708	250	9.3528	1.2217	-23.0720
	3.525	-	9.9111	-	-	9.3600	7.6053	-7.7059
	3.7	8.4889	8.5778	8.7240	240	9.3225	3.4065	-14.2612
	3.875	8.4714	8.5778	8.6675	190	9.1819	4.1432	-12.6127
	4.05	8.4723	8.5333	8.6037	130	9.0111	5.0074	-11.0407
	4.225	-	8.4889	-	-	8.9074	5.8037	-9.8378
	4.4	-	8.4889	-	-	8.5571	6.3872	-9.0702

4.2.2 Yama Boyutlarının Değiştirilmesi

Bu modellemede, yamanın iç ve dış yarıçap uzunlukları 0.5 mm hassasiyetle arttırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: Yama boyutlarının değiştirilmesinin koaksiyel beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İç Yarıçapı R_1 (mm)	Dış Yarıçapı R_2 (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Koaksiyel Besleme	11.7	31.3	10.4214	10.4889	10.5658	140	8.5254	1.6030	-20.7230
	12.2	31.8	11.4656	11.5111	11.5733	110	8.7324	0.8216	-26.5097
	12.7	32.3	11.2887	11.3333	11.4042	120	9.0860	0.4147	-32.4439
	13.2	32.8	8.5373	8.6667	8.7943	260	9.3515	1.0039	-24.7725
	13.7	33.3	9.8032	9.8667	10.0491	240	9.2174	1.0801	-24.1388
	14.2	33.8	9.6433	9.6889	9.9267	280	8.7855	1.9836	-18.8854
	14.7	34.3	9.5286	9.5556	9.6207	100	7.8504	4.2815	-12.3383

4.2.3 Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, uygulamalarda sıklıkla kullanılan taban malzemeleri tercih edilerek anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6: Farklı taban malzemesi kullanımının koaksiyel beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Dielektrik Taban Malzemesi	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Koaksiyel Besleme	Rogers RT Duroid™	8.5373	8.6667	8.7943	260	9.3515	1.0039	-24.7725
	Taconic TLC	9.5915	9.7333	9.9247	330	8.0898	2.3415	-17.4593
	Rogers RO4003	9.1592	9.2889	9.4608	310	8.9675	1.3327	-22.3195
	FR-4 Epoksi	9.3125	9.5111	9.7122	400	3.4217	1.5344	-21.1004
	Bakelite	9.7337	9.8222	9.9511	220	8.9032	0.7207	-27.6470

4.3 TASARIM – 2

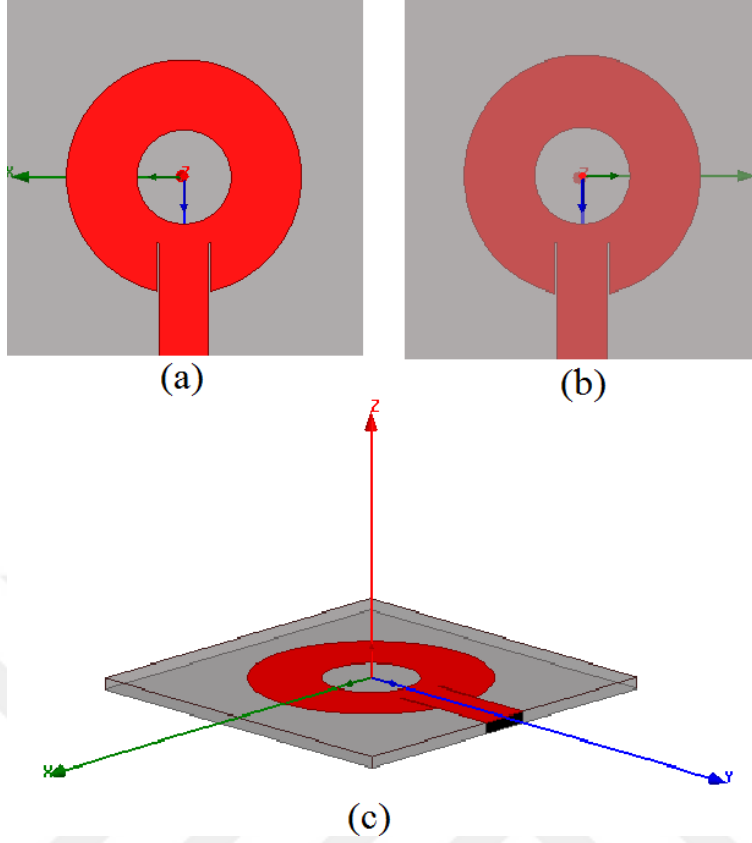
İkinci tasarımda, x bandında çalışan mikroşerit halka yama anten mikroşerit besleme yöntemi ele alınarak modellenmiştir. Tasarımda, Rogers RT – 5880 dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. Mikroşerit yama antenlerde, empedans uyumu, bant genişliği, rezonans frekansı gibi parametreleri iyileştirmek için ışıma yapan yama ile mikroşerit besleme hattının birleştiği nokta arasında yarıklar ve çentikler açılabilmektedir. Bu tasarımda da yama ile besleme hattının

birleştigi noktadan simetrik yarıklar açılmıştır. Anten parametreleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7: X bandında çalışan mikroşerit beslemeli antenin parametreleri.

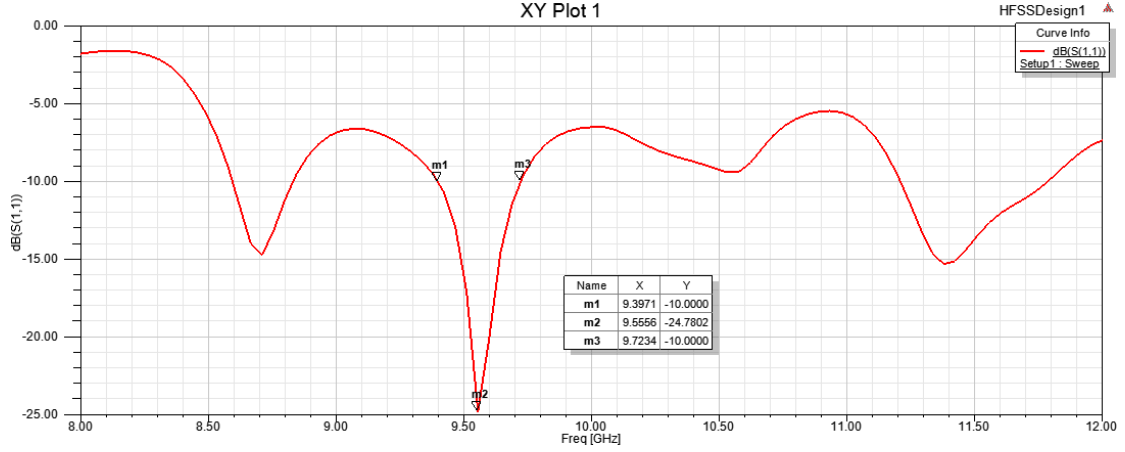
Parametre	Tanım	Uzunluk
R_1	Yamanın iç yarıçapı	13.2 mm
R_2	Yamanın dış yarıçapı	32.8 mm
h	Dielektrik tabanın kalınlığı	3.175 mm
L_s	Yarığın uzunluğu	14.4 mm
W_s	Yarığın genişliği	0.56 mm
L_f	Besleme hattının uzunluğu	17.2 mm
W_f	Besleme hattının genişliği	13.84 mm
Y	Yamanın konumu (x, y, z)	(0, 0, 0) mm
S	Taban malzemesi ve toprak düzlemi boyutu	100 mm
ϵ_r	Dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti	2.2
$\tan \delta$	Kayıp tanjantı	0.0009

Tasarlanan anten Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



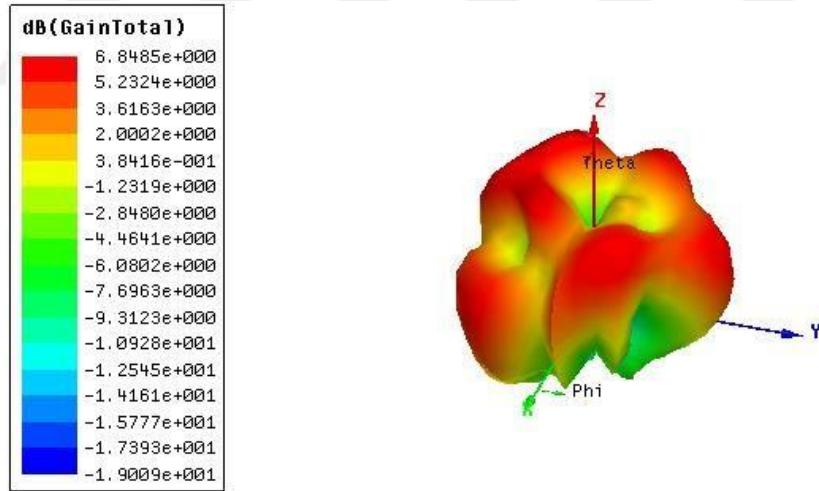
Şekil 4.5: Tasarlanan mikroşerit beslemeli mikroşerit halka yama anten
(a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri.

Simülasyon sonucuna göre geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Geri dönüş kaybı grafiği incelendiğinde rezonans frekansının 9.55 GHz olduğu görülmektedir. Anten rezonans frekansında -24.78 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Tasarlanan antenin -10 dB değerine karşılık gelen frekansları sırasıyla 9.39 GHz ve 9.72 GHz değerindedir. Bant genişliği değeri 330 MHz (%3.45) olarak hesaplanmıştır. Mikroşerit beslemede bant genişliğinin %2 – 5 aralığında olması beklenir. Dolayısıyla elde edilen bant genişliği kabul edilebilir sınırlar içerisinde.



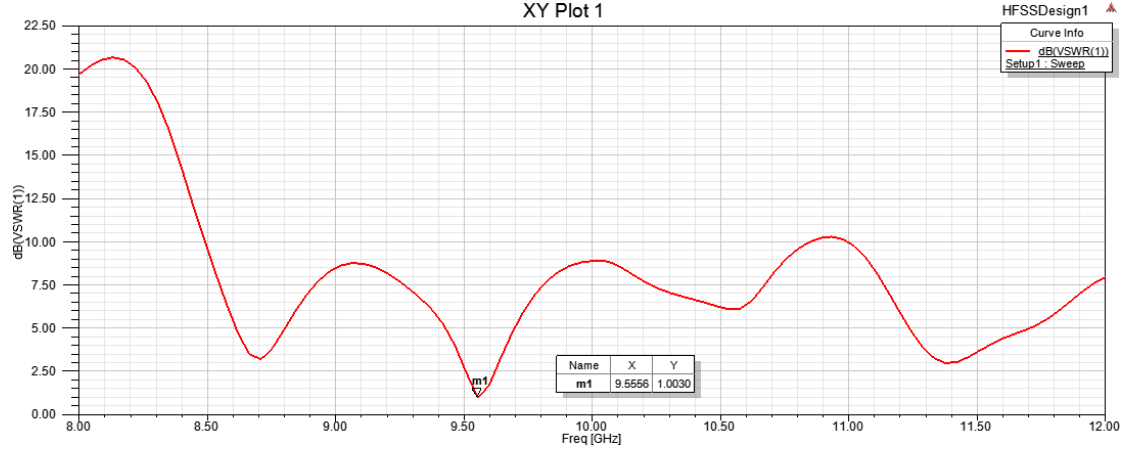
Şekil 4.6: Mikroşerit beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.

Tasarlanan antenin üç boyutlu kazanç grafiği Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Anten rezonans frekansında z yönünde 6.84 dB maksimum kazanç değerine sahiptir. Mikroşerit antenlerde kazanç değerinin 5 – 6 dB aralığında olduğu düşünülürse, elde edilen kazanç değerinin yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4.7: Mikroşerit beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.

Tasarlanan antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Anten rezonans frekansındaki VSWR değeri yaklaşık olarak 1’dir. VSWR değerinin 1’e yakın sonuç vermesi antenin empedans uyumunun iyi bir şekilde sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.8: Mikroşerit beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği.

Tasarlanan antenin simülasyon sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, anten parametrelerinin iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 4.8: Mikroşerit beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları.

Parametreler		Sonuçlar
Frekans	f_r	9.5556 GHz
Geri dönüş kaybı	S_{11}	-24.7802 dB
Gerilim duran dalga oranı	VSWR	1.0030
Kazanç	G	6.8485 dB
Bant genişliği	BW	330 MHz

4.3.1 Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, dielektrik taban malzemesinin kalınlığı 0.175 mm hassasiyetle artırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9: Taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin mikroşerit beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Dielektrik Taban Malzemesi Kalınlığı (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Mikroşerit Besleme	2.125	8.5817	8.8889	9.6228	1040	6.8697	0.6716	-28.2593
	2.3	8.6135	8.8000	9.6063	990	6.8225	0.3283	-34.4730
	2.475	8.6266	8.8889	9.1718	550	7.0851	0.9097	-25.6269
	2.65	8.6340	8.8000	9.0359	400	6.8444	1.5675	-20.9161
	2.825	9.3207	9.5556	9.7198	390	6.5732	1.2878	-22.6155
	3	9.3265	9.5556	9.7312	410	6.4158	0.2246	-37.7707
	3.175	9.3971	9.5556	9.7234	330	6.8485	1.0030	-24.7802
	3.35	9.3832	9.5556	9.7147	330	6.6748	1.7838	-19.8006
	3.525	9.4099	9.5556	9.7014	300	7.1677	2.6722	-16.3278
	3.7	9.4078	9.5111	9.6491	240	7.9033	3.5066	-14.0161
	3.875	9.4355	9.5111	9.6344	200	8.4083	4.6335	-11.6814
	4.05	9.4933	9.5556	9.5978	100	8.7090	5.4537	-10.3420
	4.225	-	9.5111	-	-	9.2365	5.9474	-9.6407
	4.4	-	9.5556	-	-	9.1964	6.3437	-9.1246

4.3.2 Yama Boyutlarının Değiştirilmesi

Bu modellemede, yamanın iç ve dış yarıçap uzunlukları 0.5 mm hassasiyetle arttırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10: Yama boyutlarının değiştirilmesinin mikroşerit beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İç Yarıçapı R_1 (mm)	Dış Yarıçapı R_2 (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Mikroşerit Besleme	11.7	31.3	9.6400	9.7778	9.9080	260	5.9811	2.4058	-17.2268
	12.2	31.8	9.5208	9.6889	9.8017	280	6.6582	2.6238	-16.4841
	12.7	32.3	8.7693	8.9778	9.1772	410	6.3920	0.8350	-26.3697
	13.2	32.8	9.3971	9.5556	9.7234	330	6.8485	1.0030	-24.7802
	13.7	33.3	8.9746	9.2000	9.3632	390	7.3957	1.7126	-20.1519
	14.2	33.8	8.9945	9.1556	9.2491	250	7.0107	3.4504	-14.1526
	14.7	34.3	9.3579	9.5556	9.6963	340	8.2023	2.9949	-15.3546

4.3.3 Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, uygulamalarda sıklıkla kullanılan taban malzemeleri tercih edilerek anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11: Farklı taban malzemesi kullanımının mikroşerit beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Dielektrik Taban Malzemesi	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Mikroşerit Besleme	Rogers RT Duroid™	9.3971	9.5556	9.7234	330	6.8485	1.0030	-24.7802
	Taconic TLC	8.6346	8.7111	8.8254	190	9.6238	1.4338	-21.6868
	Rogers RO4003	8.2173	8.3111	8.3745	160	8.4379	1.4748	-21.4431
	FR-4 Epoksi	8.3585	8.5778	8.6964	340	9.4093	0.8865	-25.8512
	Bakelite	9.2035	9.3333	9.4886	280	9.3876	2.5415	-16.7566

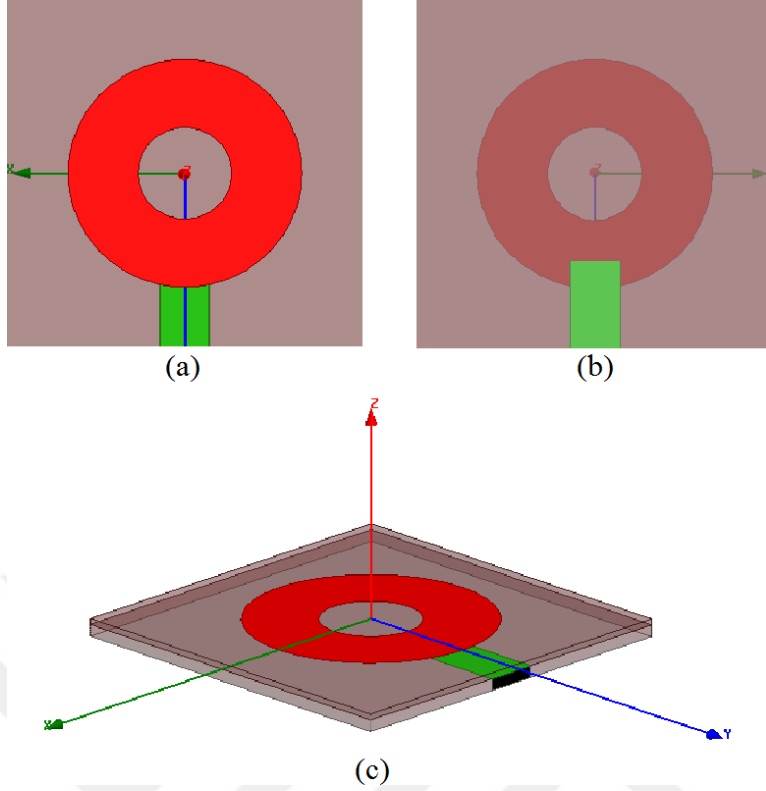
4.4 TASARIM – 3

Üçüncü tasarımda, x bandında çalışan mikroşerit halka yama anten yakınlık besleme yöntemi ele alınarak modellenmiştir. Tasarımda, iki adet dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki FR – 4, ikincisi ise Rogers RT – 5880 taban malzemeleridir. Anten parametreleri Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12: X bandında çalışan yakınlık beslemeli antenin parametreleri.

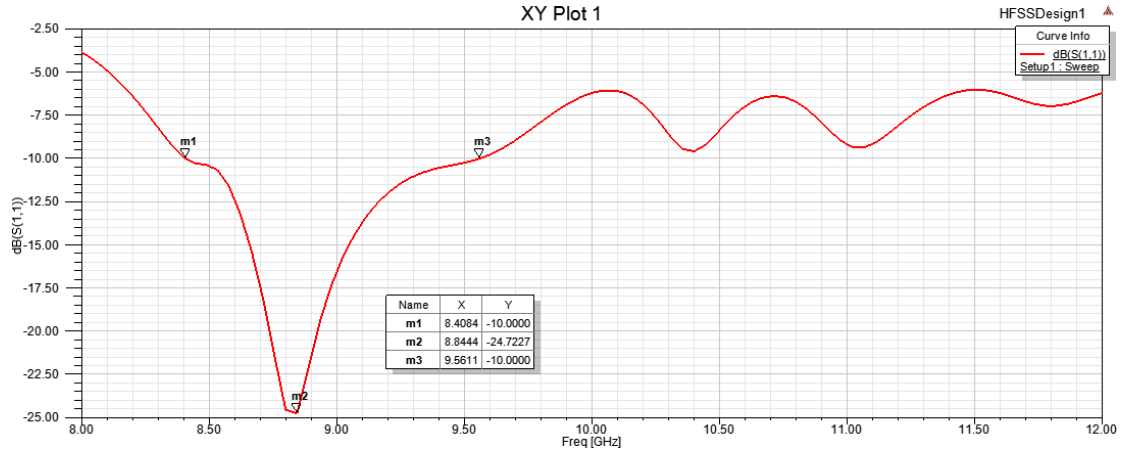
Parametre	Tanım	Uzunluk
R_1	Yamanın iç yarıçapı	13.2 mm
R_2	Yamanın dış yarıçapı	32.8 mm
h_1	Birinci dielektrik tabanın kalınlığı	1.6 mm
h_2	İkinci dielektrik tabanın kalınlığı	3.175 mm
L_f	Besleme hattının uzunluğu	25.2 mm
W_f	Besleme hattının genişliği	13.84 mm
Y	Yamanın konumu (x, y, z)	(0, 0, 0) mm
S	Taban malzemesi ve toprak düzlemi boyutu	100 mm
ϵ_{r_1}	Birinci dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti	4.4
$\tan \delta_1$	Birinci dielektrik taban malzemesinin kayıp tanjantı	0.02
ϵ_{r_2}	İkinci dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti	2.2
$\tan \delta_2$	İkinci dielektrik taban malzemesinin kayıp tanjantı	0.0009

Tasarlanan anten Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



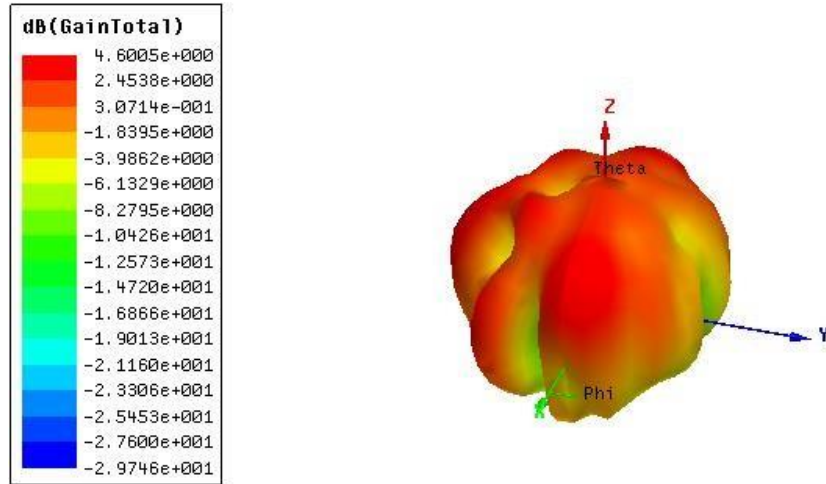
Şekil 4.9: Tasarlanan yakınlık beslemeli mikroşerit halka yama anten
(a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri.

Simülasyon sonucuna göre geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Geri dönüş kaybı grafiği incelendiğinde rezonans frekansının 8.84 GHz olduğu görülmektedir. Anten rezonans frekansında -24.72 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Tasarlanan antenin -10 dB değerine karşılık gelen frekansları sırasıyla 8.40 GHz ve 9.56 GHz değerindedir. Bant genişliği değeri 1160 MHz (%13.12) olarak hesaplanmıştır. Yakınlık kuplajlı beslemede bant genişliğinin %13 civarında olması beklenir. Dolayısıyla elde edilen bant genişliği kabul edilebilir bir değerdedir.



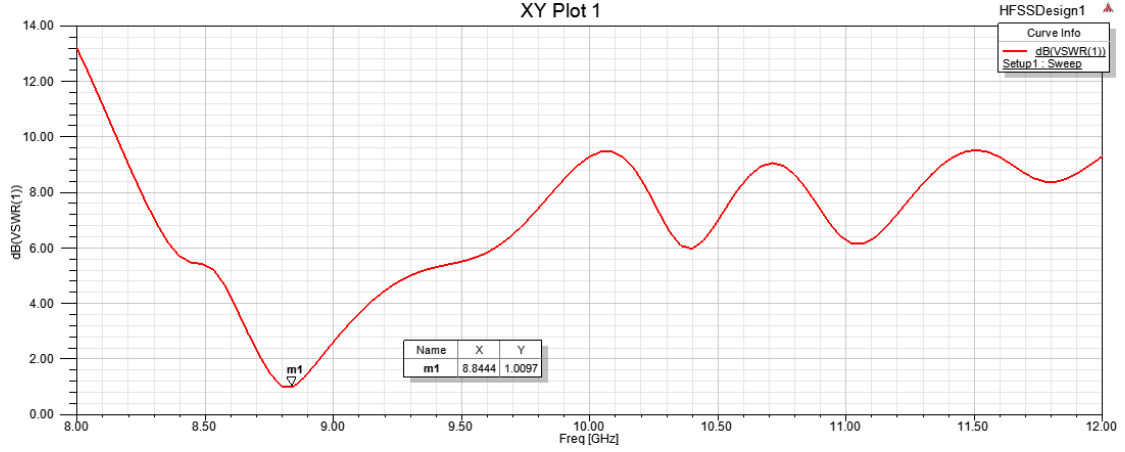
Şekil 4.10: Yakınlık beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.

Tasarlanan antenin üç boyutlu kazanç grafiği Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Anten rezonans frekansında z yönünde 4.6 dB maksimum kazanç değerine sahiptir. Mikroşerit antenlerde kazanç değerinin 5 – 6 dB aralığında olduğu düşünülürse, elde edilen kazanç değerinin biraz daha artırılması gerektiği söylenebilir. Bunun için kullanılan dielektrik taban malzemesinin kalınlığı değiştirilebilir ya da farklı dielektrik sabitine sahip olan taban malzemesi tercih edilebilir. Aşağıda dielektrik taban malzemesinin kalınlığı değiştirilmiş ve farklı dielektrik sabitine sahip taban malzemeleri seçilerek farklı kazanç değerleri alındığı görülmüştür.



Şekil 4.11: Yakınlık beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.

Tasarlanan antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Anten rezonans frekansındaki VSWR değeri yaklaşık olarak 1’dir. VSWR değerinin 1’e yakın sonuç vermesi antenin empedans uyumunun iyi bir şekilde sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.12: Yakınlık beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği.

Tasarlanan antenin simülasyon sonuçları Tablo 4.13’te verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, kazanç değerinin biraz daha arttırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, genel olarak anten parametrelerinin iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 4.13: Yakınlık beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları.

Parametreler		Sonuçlar
Frekans	f_r	8.8444 GHz
Geri dönüş kaybı	S_{11}	-24.7227 dB
Gerilim duran dalga oranı	VSWR	1.0097
Kazanç	G	4.6 dB
Bant genişliği	BW	1160 MHz

4.4.1 Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, dielektrik taban malzemesinin kalınlığı 0.175 mm hassasiyetle arttırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Tablo 4.14’te birinci dielektrik taban malzemesinin kalınlığı değiştirilmiş, ikinci dielektrik taban malzemesinin kalınlığı 3.175 mm olarak sabit tutulmuştur. Tablo 4.15’te ise bunun tam tersi yapılarak birinci dielektrik taban

malzemesinin kalınlığı 1.6 mm olarak sabit tutulmuş, ikinci dielektrik taban malzemesinin kalınlığı değiştirilmiştir.

Tablo 4.14: Birinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Birinci Dielektrik Taban Malzemesi Kalınlığı (mm)	f_l (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Yakınlık Besleme	1	8.6090	9.0222	9.4485	840	6.3698	0.3628	-33.6052
	1.1	8.5595	8.9778	9.3961	840	5.8245	0.4996	-30.8276
	1.2	8.5182	8.9333	9.3699	850	5.3330	0.5703	-29.6775
	1.3	8.4722	8.8889	9.3592	880	4.9075	0.7212	-27.6408
	1.4	8.2863	8.8000	9.2646	980	7.7871	2.3176	-17.5473
	1.5	8.3508	8.8444	9.5220	1170	5.9834	1.4096	-21.8337
	1.6	8.4084	8.8444	9.5611	1160	4.6005	1.0097	-24.7227
	1.7	8.4516	8.7556	9.5013	1050	5.1306	1.2548	-22.8405
	1.8	8.4332	8.7556	9.4785	1040	5.4359	1.4195	-21.7737
	1.9	8.4151	8.7111	9.4836	1070	5.5867	1.5289	-21.1320
	2	8.4063	8.7111	9.4457	1040	5.6279	1.6220	-20.6211
	2.1	8.3684	8.6667	9.4259	1060	5.7749	1.6344	-20.5555
	2.2	8.3264	8.6667	9.3839	1060	6.0390	1.9835	-18.8858
	2.3	8.3132	8.6667	9.3538	1040	5.9765	2.0614	-18.5544

Tablo 4.15: İkinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İkinci Dielektrik Taban Malzemesi Kalınlığı (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Yakınlık Besleme	2.125	8.6329	8.8444	9.0119	380	5.1084	4.3937	-12.1228
	2.3	8.5636	8.8444	9.1770	610	5.0192	3.1825	-14.8379
	2.475	8.4951	8.8444	9.6784	1180	4.9088	2.3167	-17.5509
	2.65	8.3917	8.8444	9.6738	1280	4.8222	1.4079	-21.8445
	2.825	8.4510	8.8889	9.6797	1220	4.6228	1.1853	-23.3337
	3	8.4066	8.8000	9.6016	1200	4.5444	0.3663	-33.5210
	3.175	8.4084	8.8444	9.5611	1160	4.6005	1.0097	-24.7227
	3.35	8.4972	8.8000	9.3344	840	4.8141	1.6668	-20.3858
	3.525	8.5125	8.8000	9.2844	770	6.8557	2.9808	-15.3949
	3.7	8.5465	8.8000	9.2365	690	6.2973	3.3013	-14.5268
	3.875	8.5876	8.8000	9.0959	510	7.4850	4.3117	-12.2797
	4.05	8.5953	8.7556	9.0598	460	6.7988	4.5959	-11.7490
	4.225	8.6465	8.8000	9.0042	360	7.0105	5.1100	-10.8741
	4.4	8.7067	8.8000	8.8618	160	6.9527	5.5590	-10.1866

4.4.2 Yama Boyutlarının Değiştirilmesi

Bu modellemede, yamanın iç ve dış yarıçap uzunlukları 0.5 mm hassasiyetle arttırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4.16: Yama boyutlarının değiştirilmesinin yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İç Yarıçapı R_1 (mm)	Dış Yarıçapı R_2 (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Yakınlık Besleme	11.7	31.3	8.7137	9.0222	9.3100	600	8.6943	0.9046	-25.6759
	12.2	31.8	8.6291	8.9333	9.2374	610	7.1890	1.2211	-23.0765
	12.7	32.3	8.5163	8.8444	9.2616	750	5.0801	0.3857	-33.0723
	13.2	32.8	8.4084	8.8444	9.5611	1160	4.6005	1.0097	-24.7227
	13.7	33.3	8.5140	8.8889	9.6436	1130	7.9878	2.4264	-17.1537
	14.2	33.8	8.5148	9.3778	9.6545	1140	8.8069	3.1659	-14.8824
	14.7	34.3	9.0722	9.3778	9.6289	550	8.8790	2.7369	-16.1231

4.4.3 Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, uygulamalarda sıklıkla kullanılan taban malzemeleri tercih edilerek anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Tablo 4.17’de birinci dielektrik taban malzemeleri farklı kullanılmış, ikinci dielektrik taban malzemesi ise Rogers RT – 5880 olarak sabit tutulmuştur. Tablo 4.18’de ise bunun tam tersi yapılarak birinci dielektrik taban malzemesi FR – 4 olarak sabit tutulmuş, ikinci dielektrik taban malzemeleri farklı kullanılmıştır.

Tablo 4.17: Farklı yapıda birinci dielektrik taban malzemesi kullanımının yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Birinci Dielektrik Taban Malzemesi	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Yakınlık Besleme	Rogers RT Duroid™	9.3605	9.5111	9.6453	280	7.7749	4.8683	-11.2726
	Taconic TLC	8.9946	9.1556	9.3755	380	8.4614	4.0478	-12.8077
	Rogers RO4003	8.7432	8.9778	9.3699	620	6.5811	2.3174	-17.5482
	FR-4 Epoksi	8.4084	8.8444	9.5611	1160	4.6005	1.0097	-24.7227
	Bakelite	8.3986	8.7111	9.1428	750	7.9152	2.1576	-18.1619

Tablo 4.18: Farklı yapıda ikinci dielektrik taban malzemesi kullanımının yakınlık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İkinci Dielektrik Taban Malzemesi	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Yakınlık Besleme	Rogers RT Duroid™	8.4084	8.8444	9.5611	1160	4.6005	1.0097	-24.7227
	Taconic TLC	9.9151	10.0889	10.2667	350	2.7842	2.4344	-17.1256
	Rogers RO4003	9.6929	10.1778	10.4444	750	2.9331	1.0182	-24.6499
	FR-4 Epoksi	10.2667	10.6667	10.9778	710	1.6940	0.3467	-33.9991
	Bakelite	9.9111	10.3556	10.6667	750	3.8463	0.2772	-35.5497

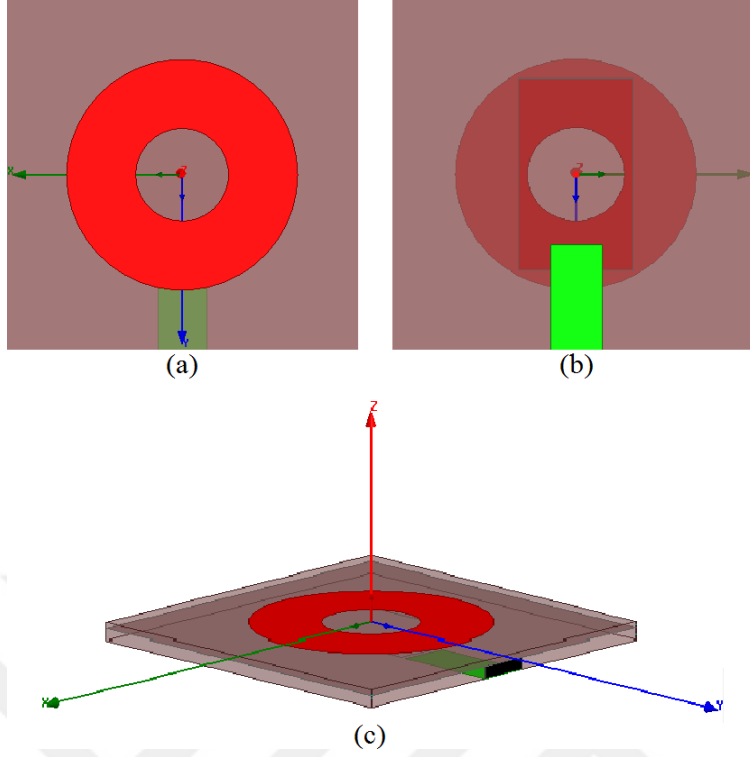
4.5 TASARIM – 4

Dördüncü tasarımda, x bandında çalışan mikroşerit halka yama anten açıklık besleme yöntemi ele alınarak modellenmiştir. Tasarımda, iki adet dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki FR – 4, ikincisi ise Rogers RT – 5880 taban malzemeleridir. Anten parametreleri Tablo 4.19’da verilmiştir.

Tablo 4.19: X bandında çalışan açıklık beslemeli antenin parametreleri.

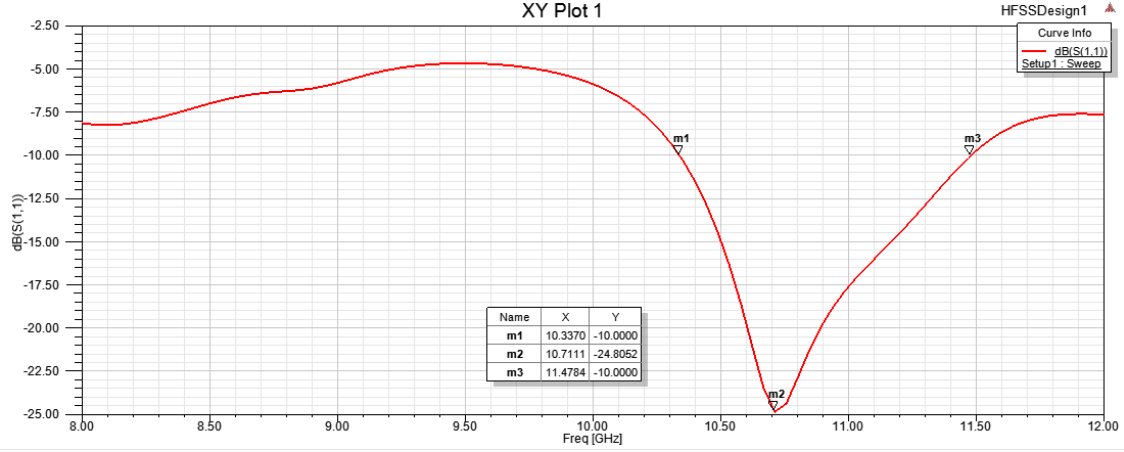
Parametre	Tanım	Uzunluk
R_1	Yamanın iç yarıçapı	13.2 mm
R_2	Yamanın dış yarıçapı	32.8 mm
h_1	Birinci dielektrik tabanın kalınlığı	1.6 mm
h_2	İkinci dielektrik tabanın kalınlığı	3.175 mm
L_o	Açıklığın uzunluğu	54.4 mm
W_o	Açıklığın genişliği	31 mm
L_f	Besleme hattının uzunluğu	30mm
W_f	Besleme hattının genişliği	13.8 mm
Y	Yamanın konumu (x, y, z)	(0, 0, 0) mm
S	Taban malzemesi ve toprak düzlemi boyutu	100 mm
ϵ_{r_1}	Birinci dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti	4.4
$\tan \delta_1$	Birinci dielektrik taban malzemesinin kayıp tanjantı	0.02
ϵ_{r_2}	İkinci dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti	2.2
$\tan \delta_2$	İkinci dielektrik taban malzemesinin kayıp tanjantı	0.0009

Tasarlanan anten Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



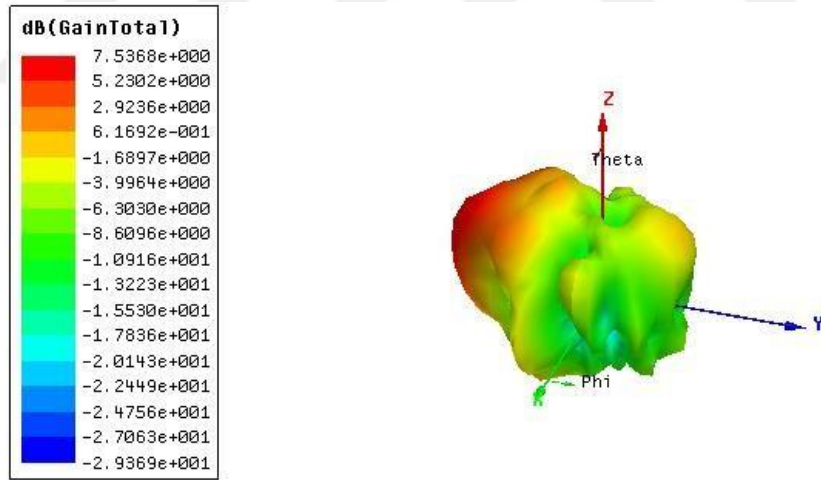
Şekil 4.13: Tasarlanan açıklık beslemeli mikroşerit halka yama anten
(a) üst, (b) alt, (c) yan görünümleri.

Simülasyon sonucuna göre geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Geri dönüş kaybı grafiği incelendiğinde rezonans frekansının 10.71 GHz olduğu görülmektedir. Anten rezonans frekansında -24.8 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Tasarlanan antenin -10 dB değerine karşılık gelen frekansları sırasıyla 10.33 GHz ve 11.47 GHz değerindedir. Bant genişliği değeri 1140 MHz (%10.64) olarak hesaplanmıştır. Açıklık kuplajlı beslemede bant genişliğinin %21 civarında olması beklenir. Dolayısıyla elde edilen bant genişliğinin arttırılması gerektiği söylenebilir. Bunun için yama boyutlarında değişiklik yapılabilir. Aşağıda yama boyutlarında değişiklik yapılmış ve farklı sonuçlar alınmıştır.



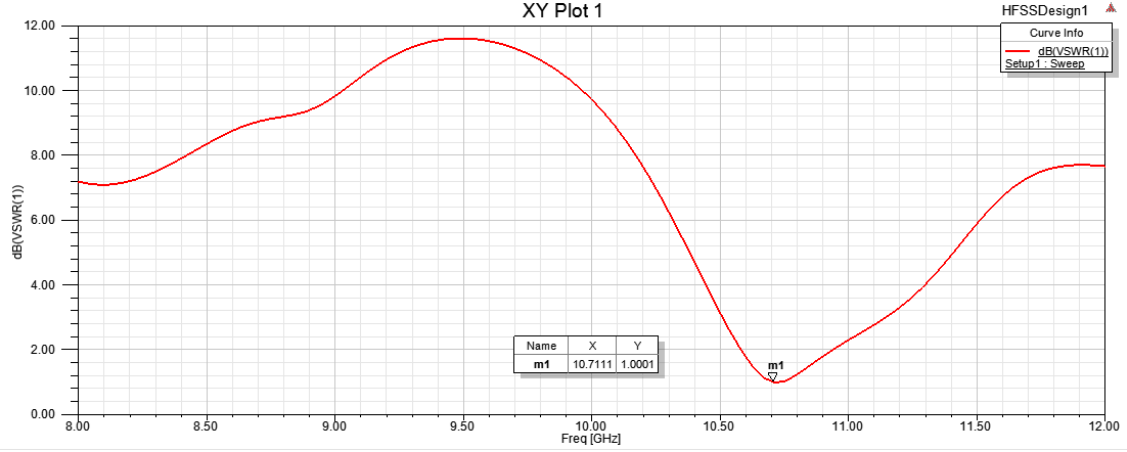
Şekil 4.14: Açıklık beslemeli antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.

Tasarlanan antenin üç boyutlu kazanç grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Anten rezonans frekansında z yönünde 7.53 dB maksimum kazanç değerine sahiptir. Mikroşerit antenlerde kazanç değerinin 5 – 6 dB aralığında olduğu düşünülürse, elde edilen kazanç değerinin yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4.15: Açıklık beslemeli antenin üç boyutlu kazanç grafiği.

Tasarlanan antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Antenin rezonans frekansındaki VSWR değeri yaklaşık olarak 1'dir. VSWR değerinin 1'e yakın sonuç vermesi antenin empedans uyumunun iyi bir şekilde sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.16: Açıklık beslemeli antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiği.

Tasarlanan antenin simülasyon sonuçları Tablo 4.20’de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, bant genişliğinin artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, genel olarak anten parametrelerinin iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 4.20: Açıklık beslemeli mikroşerit halka yama antenin sonuçları.

Parametreler		Sonuçlar
Frekans	f_r	10.7111 GHz
Geri dönüş kaybı	S_{11}	-24.8052 dB
Gerilim duran dalga oranı	VSWR	1.0001
Kazanç	G	7.5368 dB
Bant genişliği	BW	1140 MHz

4.5.1 Farklı Kalınlıklarda Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemede, dielektrik taban malzemesinin kalınlığı 0.175 mm hassasiyetle arttırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Tablo 4.21’de birinci dielektrik taban malzemesinin kalınlığı değiştirilmiş, ikinci dielektrik taban malzemesinin kalınlığı 3.175 mm olarak sabit tutulmuştur. Tablo 4.22’de ise bunun tam tersi yapılarak birinci dielektrik taban

malzemesinin kalınlığı 1.6 mm olarak sabit tutulmuş, ikinci dielektrik taban malzemesinin kalınlığı değiştirilmiştir.

Tablo 4.21: Birinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Birinci Dielektrik Taban Malzemesi Kalınlığı (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Açıklık Besleme	1	10.4718	10.8444	11.6514	1180	6.9859	1.0472	-24.4072
	1.1	10.5721	10.9333	11.6292	1050	7.1616	0.5341	-30.2475
	1.2	10.3679	10.7556	11.5974	1230	7.3357	1.4393	-21.6540
	1.3	10.4533	10.8444	11.5698	1110	7.4650	0.4284	-32.1613
	1.4	10.4389	10.5396	11.5396	1100	7.5206	0.3873	-33.0376
	1.5	10.4073	10.8000	11.5290	1120	7.5606	0.6670	-28.3191
	1.6	10.3370	10.7111	11.4784	1140	7.5368	1.0001	-24.8052
	1.7	10.2379	10.7111	11.4719	1240	7.3318	1.1091	-23.9096
	1.8	10.2608	10.7111	11.4371	1170	7.3589	0.9524	-25.2294
	1.9	10.2361	10.7111	11.4079	1170	7.1938	1.0163	-24.6661
	2	10.2233	10.7111	11.3829	1160	7.1209	1.0180	-24.6517
	2.1	10.1315	10.6222	11.6222	1210	6.8598	1.1825	-23.3540
	2.2	10.1150	10.6667	11.3202	1210	6.6878	1.1315	-23.7362
	2.3	10.0742	10.6667	11.3090	1230	6.4050	1.4710	-21.4656

Tablo 4.22: İkinci dielektrik taban malzemesinin kalınlıklarının değiştirilmesinin açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İkinci Dielektrik Taban Malzemesi Kalınlığı (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Açıklık Besleme	2.125	10.3068	10.8889	11.3997	1090	6.6035	3.6067	-13.7783
	2.3	10.3677	11.0667	11.4908	1130	6.7482	2.9613	-15.4508
	2.475	10.3191	10.8444	11.5355	1220	6.9868	1.7140	-20.1448
	2.65	10.3372	10.8000	11.5326	1200	7.0736	0.8805	-25.9096
	2.825	10.3482	10.8000	11.5222	1180	7.2676	0.3121	-34.9123
	3	10.3462	10.7556	11.5097	1160	7.4254	0.3021	-35.1952
	3.175	10.3370	10.7111	11.4784	1140	7.5368	1.0001	-24.8052
	3.35	10.3453	10.6667	11.4596	1110	7.6942	1.5386	-21.0772
	3.525	10.3320	10.6667	11.4371	1100	7.7721	2.2379	-17.8480
	3.7	10.3218	10.6222	11.3761	1050	7.8600	2.8096	-15.8992
	3.875	10.3650	10.6667	11.3610	1000	8.0358	3.1974	-14.7982
	4.05	10.3800	10.6222	11.2876	900	8.0909	3.6650	-13.6431
	4.225	10.3848	10.6222	11.2754	890	8.1612	4.3603	-12.1863
	4.4	10.3431	10.4889	10.6946	350	8.1629	5.2156	-10.7065

4.5.2 Yama Boyutlarının Değiştirilmesi

Bu modellemede, yamanın iç ve dış yarıçap uzunlukları 0.5 mm hassasiyetle artırılıp azaltılarak anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.23'te verilmiştir.

Tablo 4.23: Yama boyutlarının değiştirilmesinin açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İç Yarıçapı R_1 (mm)	Dış Yarıçapı R_2 (mm)	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Açıklık Besleme	11.7	31.3	10.3813	11.2000	11.7116	1330	7.9032	0.7992	-26.7503
	12.2	31.8	10.5181	11.0667	11.5642	1050	7.7353	0.1792	-39.7288
	12.7	32.3	10.4192	10.8889	11.4953	1080	7.5528	0.3726	-33.3726
	13.2	32.8	10.3370	10.7111	11.4784	1140	7.5368	1.0001	-24.8052
	13.7	33.3	10.1747	10.6222	11.5117	1340	7.3331	1.7479	-19.9758
	14.2	33.8	10.0212	11.0222	11.5152	1490	7.1225	2.2393	-17.8427
	14.7	34.3	9.9518	10.9778	11.5951	1640	7.0005	2.4118	-17.2055

4.5.3 Farklı Dielektrik Taban Malzemesi Kullanımı

Bu modellemelerde, uygulamalarda sıklıkla kullanılan taban malzemeleri tercih edilerek anten parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Tablo 4.24’te birinci dielektrik taban malzemeleri farklı kullanılmış, ikinci dielektrik taban malzemesi ise Rogers RT – 5880 olarak sabit tutulmuştur. Tablo 4.25’te ise bunun tam tersi yapılarak birinci dielektrik taban malzemesi FR – 4 olarak sabit tutulmuş, ikinci dielektrik taban malzemeleri farklı kullanılmıştır.

Tablo 4.24: Farklı yapıda birinci dielektrik taban malzemesi kullanımının açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	Birinci Dielektrik Taban Malzemesi	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Açıklık Besleme	Rogers RT Duroid™	10.8751	11.3333	11.8048	930	5.6652	0.2107	-38.3241
	Taconic TLC	10.5884	11.1111	11.5727	990	6.1246	0.3786	-33.2341
	Rogers RO4003	10.5852	11.0667	11.6123	1030	5.6145	0.6309	-28.8014
	FR-4 Epoksi	10.3370	10.7111	11.4784	1140	7.5368	1.0001	-24.8052
	Bakelite	10.2574	10.9333	11.4561	1200	7.0630	0.9114	-25.6108

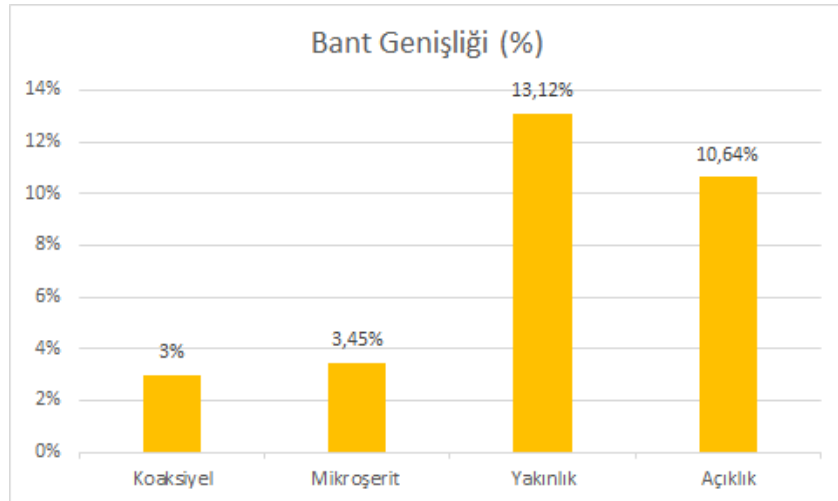
Tablo 4.25: Farklı yapıda ikinci dielektrik taban malzemesi kullanımının açıklık beslemeli anten performansı üzerine etkileri.

	İkinci Dielektrik Taban Malzemesi	f_1 (GHz)	f_r (GHz)	f_2 (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Gerilim Duran Dalgı Oranı	Geri Dönüş Kaybı (dB)
Açıklık Besleme	Rogers RT Duroid™	10.3370	10.7111	11.4784	1140	7.5368	1.0001	-24.8052
	Taconic TLC	8.6763	9.3333	9.8758	1200	6.0209	0.5730	-29.6367
	Rogers RO4003	8.2667	8.8444	9.5544	1290	7.2734	0.5823	-29.4967
	FR-4 Epoksi	7.6989	8.0889	8.4222	730	4.8094	0.2977	-35.3232
	Bakelite	8.4444	8.9333	9.1082	660	3.5627	4.7019	-11.5599

4.6 BESLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

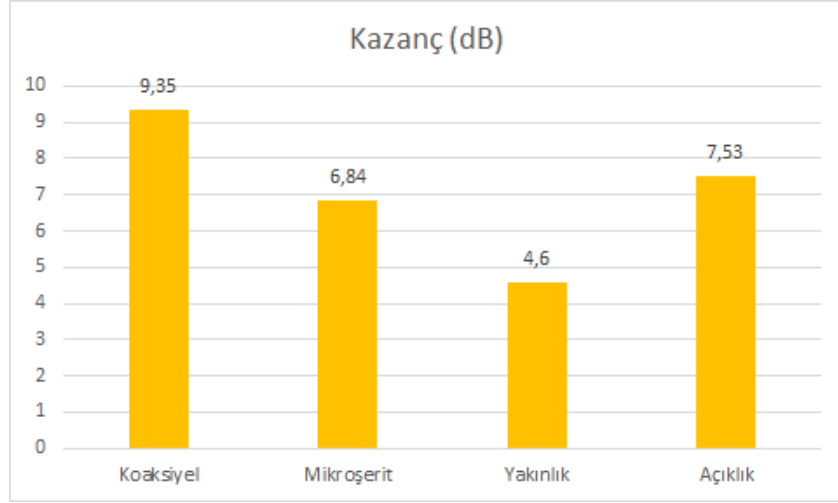
Bu bölümde, tasarlanan antenler için bant genişlikleri ve kazanç değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarımda, antenlerin yama boyutları ve dielektrik taban kalınlıkları sabit tutulmuş, sadece besleme yöntemleri ve besleme boyutları değiştirilmiş, bir nevi kontrollü deney yapılmıştır. Şekil 4.17’de bant genişliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Bu değerler incelendiğinde, yakınlık kuplajlı besleme yönteminin %13.12 oranı ile en iyi sonucu verdiği görülmektedir.



Şekil 4.17: Besleme yöntemlerinin bant genişliklerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.18’de kazanç değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, koaksiyel besleme yönteminin 9.35 dB kazanç değeri ile en iyi sonucu verdiği görülmektedir.



Şekil 4.18: Besleme yöntemlerinin kazanç değerlerinin karşılaştırılması.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, x bandında çalışabilen mikroşerit halka yama anten tasarımı yapılmıştır. Anten koaksiyel prob, mikroşerit hat, yakınlık kuplajlı ve açıklık kuplajlı besleme yöntemleri kullanılarak beslenmiş ve besleme yöntemlerinin anten performansları üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Tasarlanan antenlerin performans değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Tasarlanan antenlerin performans değerleri.

	Bant Genişliği	Kazanç	Gerilim Duran Dalga Oranı	Geri Dönüş Kaybı
Koaksiyel	260 MHz	9.35 dB	1.0039	-24.77 dB
Mikroşerit	330 MHz	6.84 dB	1.0030	-24.78 dB
Yakınlık	1160 MHz	4.6 dB	1.0097	-24.72 dB
Açıklık	1140 MHz	7.53 dB	1.0001	-24.8 dB

Tablo 5.1’deki veriler incelendiğinde, en yüksek bant genişliği 1160 MHz ile yakınlık kuplajlı besleme yöntemi olmuştur. Kazanç değerinin en fazla olduğu değer ise koaksiyel besleme yönteminde 9.35 dB elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirilirse, bilgi taşıma kapasitesi bakımından yakınlık kuplajlı besleme yöntemi ile daha iyi sonuç alınmıştır.

Açıklık kuplajlı besleme yönteminde beklenen bant genişliği (%21 civarında) elde edilememiştir. Bunun sebebi toprak düzlemindeki açıklığın akım yolunu uzatarak filtre etkisi yapmasıdır. Ancak, genel olarak mikroşerit antenlerde bant genişliğinin %2 – 5 aralığında olduğu düşünülürse, elde edilen bant genişliğinin iyi bir değer olduğu söylenebilir.

Gerilim duran dalga oranları (VSWR) incelendiğinde, 1’e yakın sonuçlar alındığı görülmüştür. Böylelikle antenlerin empedans uyumlarının iyi bir şekilde yapıldığı söylenebilir.

Besleme noktalarında ve boyutlarında yapılan değişimlerin antenlerin rezonans frekansları, bant genişlikleri, kazançları ve geri dönüş kayıplarını doğrudan etkilediği gözlenmiştir.

Mikroşerit besleme yönteminde besleme hattı ile ışıma yapan yamanın birleştiği noktadan yarıkların açılması bant genişliğini arttırmıştır.

Dielektrik taban malzemesinin kalınlığının değiştirilmesi ve farklı dielektrik sabitine sahip taban malzemelerinin seçimi anten kazancı, rezonans frekansı, bant genişliği gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir.

Yama boyutlarının değiştirilmesi rezonans frekansı, bant genişliği, kazanç gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir.



REFERANSLAR

- [1] R. F. Graf, *Modern Dictionary of Electronics*, 7th ed. USA: Newnes, 1999.
- [2] C. A. Balanis, *Anten Teorisi*, 3rd ed. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2013.
- [3] M. Koçer and M. E. Aydemir, "Microstrip Patch Antenna Design for Military Satellite Communication," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. Special Issue, pp. 142–147, 2020, doi: 10.31590/ejosat.802959.
- [4] G. A. Deschamps, "Microstrip Microwave Antennas," *Present. 3rd USAR Symp. Antennas*, vol. 1, pp. 189–195, 1953.
- [5] H. Gutton and G. Baissinot, "Flat Aerial for Ultra High Frequencies," French Patent No. 703113, 1995.
- [6] J. Q. Howell, "Microstrip Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 23, no. 1, pp. 90–93, 1975, doi: 10.1109/TAP.1975.1140995.
- [7] R. Munson, "Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 22, no. 1, pp. 74–78, Jan. 1974, doi: 10.1109/TAP.1974.1140723.
- [8] E. Sözen, "5 GHz Mikroşerit Anten Tasarımı ve Besleme Çeşitlerinin Karşılaştırılması," Haliç Üniv., 2019.
- [9] B. Güngör, M. Tekbaş, and A. Kayabaşı, "2.4 GHz Frekansında Çalışan Farklı Boyut ve Besleme Yöntemli Dikdörtgen Mikroşerit Anten Tasarımları ve Gerçekleştirilmesi," *KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilim. Derg.*, pp. 47–55, 2019.
- [10] M. A. Belen, "Ultra Geniş Band Uygulamaları için Düzlemsel Hat Beslemeli Mikroşerit Anten Tasarımı," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 6, no. 4, pp. 938–946, 2018, doi: 10.29109/gujsc.442489.
- [11] H. Kütük, "3.3 GHz Mikroşerit Anten Tasarımı ve Farklı Besleme Yöntemleri için Analizi," Sakarya Üniv., 2012.
- [12] "Ansys HFSS." <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (accessed Oct. 20, 2020).
- [13] J. C. Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. 1864.
- [14] D. M. Pozar, *Mikrodalga Mühendisliği*, 4th ed. Ankara: Palme Yayıncılık, 2014.
- [15] C. Canbay, "Antenlerin Teknolojik Gelişimi," 2004. <https://www.qsl.net/ta2mbd/elektronik/rf/antengelisim.htm> (accessed Oct. 26, 2020).

- [16] “Antenin Tarihçesi,” 2020. <http://elektriksa.com/antenin-tarihcesi/> (accessed Oct. 26, 2020).
- [17] C. Şen, “GPS L1, L2 ve L5 Bantlarında Çalışan Yığın Yapılı Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi,” Milli Savunma Üniv., 2020.
- [18] F. Sulıman, “24 GHz Otomotiv Radarlar için Anten Dizisi Tasarımı,” Karadeniz Teknik Üniv., 2020.
- [19] A. Çodur, “Konformal Yüzeylere Uygun Mikroşerit Yama Anten Tasarım ve Analizi,” Yıldız Teknik Üniv., 2019.
- [20] M. Çekingen, “Yapay Manyetik İletken Toprak Yüzeyli Genişbant Mikroşerit Anten Tasarımı,” İstanbul Teknik Üniv., 2011.
- [21] K. Sürmeli, “Yönlü Anten ve Anten Dizileri için Geniş Bantlı ve Geniş Tarama Açılı Doğrusal 45° Polarizör Tasarımı,” Yıldız Teknik Üniv., 2019.
- [22] A. O. Yıldız, “Antenler ve Propagasyon,” 2017. <https://www.slideshare.net/AlıYldz18/anten-ve-propagasyonu-78657001> (accessed Oct. 16, 2020).
- [23] M. Türk, “X Bant Faz Dizili Anten Tasarımı ve Analizi,” Yıldız Teknik Üniv., 2019.
- [24] E. Kızılay, “Mikrodalga Görüntüleme Uygulamaları için Ultra Geniş Bant Anten Tasarımı,” İstanbul Teknik Üniv., 2019.
- [25] F. Altuntaş, “Ultra Geniş Bant (UGB) Haberleşme Sistemleri için Mikroşerit Yama Anten Tasarımı,” Erciyes Üniv., 2016.
- [26] D. Arıcan, “Genşbandlı Mkroşert Yama Anten Tasarımı,” Haliç Üniv., 2012.
- [27] M. Sağlık, “Mikroşerit Antenin Parametrelerini MTM Yapıları ile İyileştirme ve Parametre Değerlerinin Yapay Sinir Ağı ile Tahmin Edilmesi,” İskenderun Teknik Üniv., 2019.
- [28] S. Kaya, “Antenler,” 2015. https://www.academia.edu/18260023/Antenler_1 (accessed Oct. 27, 2020).
- [29] G. Şahan, F. Erden, and E. Başaran, “Düşük Arka / Yakın Yan Kulakçık Seviyesine Sahip Dizi Beslemeli Parabolik Reflektör Anten Tasarımı,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–12, 2017.
- [30] S. Akdemir, “Yansıtıcı Antenler,” 2018. <https://slideplayer.biz.tr/slide/12818912/> (accessed Oct. 28, 2020).

- [31] E. Ulu, “Mikrodalga Bölgesinde Süper-Formül Yaklaşımıyla Mikroşerit Anten Tasarımları,” Manisa Celal Bayar Üniv., 2020.
- [32] H. Akman, “Hücrel Otomata ve Tabu Arama Algoritması ile Mikroşerit Yama Anten Tasarımı,” Süleyman Demirel Üniv., 2012.
- [33] A. Kaya, “Dört Elemanlı Dairesel Kutuplanmış Düzlemsel Dizi Antende Uyarım Sisteminin Boyutlarını Değiştirerek Parametrelerdeki Değişimlerin İncelenmesi,” *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Derg.*, pp. 37–46, 2005.
- [34] R. Çevik, “Mikroşerit Anten Nedir.” <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/mikroserit-yama-anten-ve-uygulama-alanlari/21949#ad-image-2> (accessed Nov. 03, 2020).
- [35] S. E. Bayer Keskin, C. Güler, R. B. Aymaz, G. S. Gürsoy, and E. Özbey, “2.4 GHz Geniş Bant Mikroşerit Anten Tasarımı,” *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, vol. 1, pp. 1–14, 2019, doi: 10.34186/klujes.578590.
- [36] S. C. Başaran, “Kablosuz Haberleşme Uygulamaları için Yarık-Halka Mikroşerit Anten Tasarımı,” Kocaeli Üniv., 2008.
- [37] M. A. Belen and P. Mahouti, “X Band Radar Sistemleri için Mikroşerit Yürüyen Dalga Anten Tasarımı,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 8, no. 4, pp. 87–96, 2018, doi: 10.21597/jist.415458.
- [38] G. K. Oğuz, “Türkiye’de Yama Anten Üretimi ve Prototiplemedeki Zorluklar,” İstanbul Ticaret Üniv., 2020.
- [39] A. Akbal and H. H. Balık, “İletim Hattı Matris Modeli ile Mikrostrip Hatların Analizi,” *Fırat Üniversitesi Elektr. ve Bilgi. Sempozyumu*, pp. 367–370, 2011.
- [40] R. Mishra, “An Overview of Microstrip,” *Int. J. Technol. Innov. Res.*, vol. 21, no. 2, pp. 1–17, 2016, doi: 10.5281/zenodo.161524.
- [41] A. Asan, “GPS Amaçlı 1.5805 GHz Parça Tipi Mikroşerit Anten Tasarımı ve Gerçeklenmesi,” Uludağ Üniv., 2008.
- [42] A. F. Alsager, “Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays,” College of Boras Univ., 2011.
- [43] J. M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 3rd ed. Wiley, 2014.
- [44] “Sonlu Elemanlar Yöntemi.” https://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu_elemanlar_yöntemi (accessed Nov. 24, 2020).

- [45] A. Çodur and D. Bölükbaş, “Dikdörtgen ve Dairesel Mikroşerit Anten için Parametrik Tasarım ve Analiz Yazılımı,” *URSI -Türkiye VII. Bilim. Kongresi*, pp. 28–30, 2014.
- [46] C. Doğuşgen Erbaş and A. Okatan, “GSM-1800 için Yarıkli Toprak Düzlemine Sahip Halka Mikroşerit Yama Anten Yapıları,” *ELECO, Elektr. ve Biyomedikal Mühendisliği Konf.*, pp. 553–557, 2018.



EK A

MAXWELL DENKLEMLERİ

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{A.2})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{A.3})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (\text{A.5})$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (\text{A.6})$$

Denklem (A.1) ve (A.2) sinüzoidal durgun – durum koşulu için, kosinüs tabanlı fazörler ile ifade edilirse;

$$\nabla \times \tilde{E} = -j\omega\mu\tilde{H} \quad (\text{A.7})$$

$$\nabla \times \tilde{H} = j\omega\epsilon\tilde{E} + \vec{J} \quad (\text{A.8})$$

DİZİN

A

Abstract · viii, ix
Açıklık antenler · x, 15
Açıklık kuplaj · vii, 24, 28, 40, 62, 70
Akım yoğunluğu · xix, 34, 35

B

Baissinot · 1, 72
Bant genişliği · xvi, 13, 21, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 62, 70

C

COMSAT · xvi, 6

D

DARPA · xvi, 14
Deschamps · 1, 72
Dipol · x, 1, 5, 15, 20, 22
Dizi antenler · x, 16
Dönüş kaybı · xiv, xv, xx, 3, 4, 11, 13, 14, 30, 42, 43, 48, 49, 54, 55, 62, 63

E

EK A · xi, 33, 76
Elektrik alan · xviii, 8, 9, 11, 34
Elektromanyetik · vii, 4, 5, 7, 8, 13, 15, 24, 26, 27, 28, 31, 35, 36, 37
Empedans uyumu · 24, 25, 28, 29, 43, 46, 49, 55, 63

F

FCC · xvi, 14

Frekans · xvii, xviii, 42, 46, 50, 54

G

Galerkin · 37
Gutton · 1, 72
Güç aktarımı · 13

H

Haberleşme · 1, 6, 13, 18, 20
Halka yama · vii, xii, 3, 4, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 60, 62, 64, 70
Heaviside · 5
Hertz · xiv, xvi, 5, 6
HFSS · vii, viii, x, xv, xvi, 4, 36, 37, 40
Howell · 1, 72
Hüzme · ix, xiv, xvi, 7, 8, 17, 22

I

Işıma şiddeti · ix, xx, 9

İ

İletim hattı · xv, xix, xx, 10, 11, 31, 33
İthaf · v

J

Johns · 31

K

Kayıp tanjantı · xx, 41, 47, 53, 61
Kazanç · vii, ix, xv, 11, 30, 43, 49, 50, 55, 56, 63, 64, 69, 70
Kırılma indisi · xix, 17

Kirchhoff · 31, 32
Koaksiyel hat · x, xiv, 24, 26, 27, 29, 40

L

Literatür · 1, 4, 6

M

Manyetik alan · xix, 7, 8, 11, 31, 34, 35
Marconi · 6
Maxwell · xi, 5, 33, 72, 76
Mercek · x, xiv, 17, 18
Mikroşerit antenler · x, xii, 1, 2, 4, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 29, 31, 43, 49, 55, 63, 70
Mikroşerit hat · vii, x, xiv, 2, 3, 4, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 40, 70
Monopol · 6, 15
Munson · 1, 72

Ö

Özet · vii, ix
Özgeçmiş · xi, 77

P

Performans · vii, xii, 1, 2, 3, 6, 11, 30, 70
Polarizasyon · ix, xiv, 6, 9, 22, 23, 27, 28, 29
Poynting vektörü · 8

R

Rayleigh – Ritz · 37
Reflektör · x, xiv, 17, 73
Rezonans frekansı · xix, 1, 3, 38, 42, 43, 46, 48, 49, 54, 55, 62, 63, 71

S

Sonlu elemanlar yöntemi · vii, x,
4, 36, 37

T

Taban malzemeleri · vii, xii, 1, 27,
30, 46, 52, 55, 59, 60, 67, 71
Tam dalga modeli · x, 31, 36
Tel antenler · ix, x, 14, 15
Telgrafçı denklemleri · 33

Teşekkür · vi

U

UHF · xvii, 6

Y

Yakınlık kuplaj · vii, x, xiv, 24, 27,
28, 29, 40, 54, 68, 70
Yansıma sabiti · ix, 10, 11

Yarıçap · xii, xix, 38, 40, 41, 45,
51, 58, 67

Yarıık · x, xiv, 22, 23, 46, 47, 70
Yönlülük · ix, 9, 11

Z

Zenneck · 6

