

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KABLOSUZ UYGULAMALARA YÖNELİK ÇOK BANTLI SLOTLU
MİKROŞERİT ANTEN TASARIMLARI VE DENEYSEL ANALİZİ**

Melisa ESER

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2026**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KABLOSUZ UYGULAMALARA YÖNELİK ÇOK BANTLI SLOTLU MİKROŞERİT ANTEN TASARIMLARI VE DENEYSEL ANALİZİ

Melisa ESER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fulya BAĞCI

Bu tez çalışmasında, kablosuz haberleşme sistemleri için slot tekniği, kusurlu toprak düzlemi ve farklı besleme yaklaşımlarını kullanan üç mikroşerit anten tasarlanmış; tam dalga elektromanyetik simülasyonlarla optimize edilerek fotolitografi yöntemiyle üretilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır.

İlk çalışmada slot tekniği ile çok bantlı çalışması sağlanan önerilen mikroşerit monopol anten, 1,87 GHz, 2,42 GHz, 3,27 GHz ve 5,44 GHz frekanslarında dört bantlı performans sergilemektedir. Anten; GSM 1,8–1,9 GHz, 3,3–3,8 GHz WiMAX ve WLAN 2,4/5 GHz bantlarını tek ve kompakt bir yapı içerisinde kapsamaktadır ve tüm çalışma bantlarında geri dönüş kaybı -15 dB'nin altında elde edilmiştir. Ölçülen tepe kazanç değerleri 2,0–2,9 dBi aralığında değişirken, ışıma verimliliği %65–%84 arasında gerçekleşmiştir.

İkinci aşamada, koaksiyel beslemeli, yamada ve toprak düzleminde slotlar içeren çok bantlı bir yama anten tasarlanmıştır. Anten 2,36; 5,08; 6,05; 8,64 ve 10,93 GHz frekanslarında beş bantlı çalışmaktadır. Maksimum kazanç değerleri 2,69–5,45 dBi aralığında elde edilirken, ortalama toplam verimlilik yaklaşık %90 seviyesinde olup S, C ve X bantlarındaki radar, uydu ve noktadan noktaya haberleşme uygulamaları için uygun bir adaydır.

Son aşamada, açıklık bağlaşımlı beslemeye sahip çok katmanlı bir mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Katmanlar arasına yerleştirilen hava boşluğu ve yama üzerindeki slotlar ile C ve X bantlarını kapsayan çok bantlı çalışma elde edilmiş; anten 5,48; 6,12; 6,70 ve 8,65 GHz frekanslarında rezonans göstermiştir. Simülasyonlara göre maksimum kazanç 6,90–8,21 dBi, ışıma ve toplam verimlilik %87–%95 aralığında elde edilmiş ve ölçüm sonuçlarının simülasyonlarla iyi uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Ocak 2026, 101 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikroşerit anten, anten kazancı, bant genişliği, monopol anten, koaksiyel beslemeli anten, açıklık bağlaşımlı anten, S_{11} spektrumu, kusurlu toprak düzlemi

ABSTRACT

Master of Science

DESIGN AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MULTI BAND SLOTTED MICROSTRIP ANTENNAS FOR WIRELESS APPLICATIONS

Melisa ESER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Fulya BAĞCI

In this thesis, three microstrip antennas employing slot techniques, defected ground structures, and different feeding approaches were designed for wireless communication systems. The proposed antennas were optimized using full-wave electromagnetic simulations, fabricated through photolithography, and experimentally validated.

In the first study, a microstrip monopole antenna with multiband operation achieved through slot techniques exhibits four resonant modes at 1.87 GHz, 2.42 GHz, 3.27 GHz, and 5.44 GHz. The antenna covers the GSM 1.8–1.9 GHz, 3.3–3.8 GHz WiMAX, and WLAN 2.4/5 GHz bands within a single compact structure, with a measured return loss below -15 dB across all operating bands. The measured peak gain ranges from 2.0 to 2.9 dBi, while the radiation efficiency varies between 65% and 84%.

In the second stage, a coaxial-fed multiband patch antenna incorporating slots on both the patch and the ground plane was designed. The antenna operates at five resonant frequencies of 2.36, 5.08, 6.05, 8.64, and 10.93 GHz. The achieved maximum gain ranges from 2.69 to 5.45 dBi, with an average total efficiency of approximately 90%, making the antenna a suitable candidate for radar, satellite, and point-to-point communication applications in the S, C, and X bands.

In the final stage, a multilayer aperture-coupled microstrip patch antenna was designed. Multiband operation covering the C and X bands was achieved by introducing an air gap between the layers and slots on the patch. The antenna exhibits resonances at 5.48, 6.12, 6.70, and 8.65 GHz. According to the simulation results, the maximum gain ranges from 6.90 to 8.21 dBi, while the radiation and total efficiencies vary between 87% and 95%, with measured results showing good agreement with the simulations.

January 2026, 101 pages

Key Words: Microstrip antenna, antenna gain, bandwidth, monopole antenna, coaxially-fed antenna, aperture-coupled antenna, S_{11} spectrum, defected ground structure

TEŞEKKÜR

Tamamlamakta olduğum yüksek lisans tez alışmam suresince bilgi ve tecrbelerini benimle paylaşarak yol gösteren, değerli önerileriyle akademik gelişimime katkı sağlayan ve her aşamada desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fulya Bağcı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmalarım esnasında görüşlerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Barış Akaoğlu'na teşekkür ederim. Bunun yanı sıra, tez savunma sürecinde değerli görüş ve katkılarını sunan jüri yelerim Sayın Prof. Dr. Özlem Aydın ivi ve Sayın Doç. Dr. Sultan Can'a teşekkür ederim. Anten yansıma kaybı spektrumunu ölçümünde vektör ağ analizörünün kullanımı dolayısıyla Sayın Dr. ağlar Kaya'ya teşekkür ederim. Anten prototiplerinin ışıma örüntüleri ve kazanç ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde sağladıkları katkılar ve olanaklar için TBTAK Anten Test ve Araştırma Merkezi ekibine teşekkür ederim.

Bu tez alışması Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL-2024-3299 proje numarası ile desteklenmiştir. Sağladığı finansal destekten ötürü ilgili birime teşekkürlerimi sunarım.

Melisa ESER
Ankara, Ocak 2026

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Antenler.....	5
2.1.1 Tel antenler	5
2.1.2 Açıklık antenler	6
2.1.3 Mikroşerit antenler	6
2.1.4 Dizi antenler.....	7
2.1.5 Reflektör antenler	8
2.1.6 Lens antenler	8
3. MİKROŞERİT ANTENLER VE TEMEL KAVRAMLAR	9
3.1 Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri.....	11
3.1.1 Mikroşerit hat ile besleme	12
3.1.2 Koaksiyel prob besleme yöntemi	13
3.1.3 Açıklık bağlaşımlı besleme	13
3.2 Anten Parametreleri	14
3.2.1 Rezonans frekansı	14
3.2.2 Yansıma katsayısı.....	14
3.2.3 Geri dönüş kaybı	15
3.2.4 Duran dalga oranı	15
3.2.5 Bant genişliği	16
3.2.6 Işıma örüntüsü.....	17
3.2.7 Işıma güç yoğunluğu ve şiddeti	17
3.2.8 Yönlülük.....	18
3.2.9 Anten kazancı	19
3.2.10 Anten verimliliği.....	20
3.3 Slotlu Çok Bantlı Mikroşerit Antenler Üzerine Literatürden Çalışmalar	20
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
4.1 Anten Tasarımlarında Kullanılan Tam Dalga Elektromanyetik Simülasyon Programları	26
4.2 Mikroşerit Anten Üretim ve Anten Özelliklerinin Ölçüm Yöntemleri.....	26
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
5.1 Çok Bantlı Slotlu Düzlemsel Mikroşerit Monopol Antenin Sayısal ve DeneySEL Analizi	30
5.1.1 Düzlemsel monopol mikroşerit anten tasarımı ve simülasyon sonuçları	30
5.1.2 Düzlemsel monopol mikroşerit antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	47
5.1.3 Mikroşerit monopol anten tasarım kılavuzu	56

5.2 Çok Bantlı Slotlu Koaksiyel Beslemeli Yama Antenin Sayısal ve Deneysel Analizi	58
5.2.1 Koaksiyel beslemeli yama anten tasarım kılavuzu	72
5.3 Çok Bantlı, Açıklık Bağlısımlı Yama Antenin Sayısal ve Deneysel Analizi.....	73
5.3.1 Açıklık bağlişımılı yama anten tasarım kılavuzu	93
6. SONUÇ.....	95
KAYNAKLAR	98
ÖZGEÇMİŞ.....	101



SİMGELER DİZİNİ

c	Işık hızı
$\vec{E}$	Elektrik alan (V/m)
$\vec{H}$	Manyetik alan (A/m)
S_{11}	Yansıma katsayısı
ϵ_{etkin}	Etkin dielektrik sabiti
ϵ_r	Gerçek dielektrik sabiti
ϵ_0	Serbest uzay elektriksel sabiti
$\tan \delta$	Dielektrik kayıp tanjantı
f_r	Rezonans frekansı
η_c	İletkenlik verimliliği
η_d	Dielektrik verimliliği
η_r	Işıma verimliliği
η_0	Toplam verimlilik
G	Anten kazancı
G_{dB}	Desibel cinsinden kazanç
G_{ref}	Referans anten kazancı
G_{test}	Test edilen antenin kazancı
h	Alttaş kalınlığı
V^-	Yansıyan dalga gerilimi
V^+	Gelen dalga gerilimi
P_{rad}	Toplam ışıma gücü
P_{rad}	Toplam yayılan gücü
P_{in}	Giriş gücü
r	Uzak alan mesafesi
$\vec{S}$	Poynting vektörü
$S(\theta, \phi)$	θ ve ϕ doğrultularında birim yüzey başına yayılan güç yoğunluğu
U	Işıma şiddeti
U_{ort}	İzotropik ortamın ortalama ışıma yoğunluğu
U_{max}	Maksimum ışıma yoğunluğu
$U_{\theta, \phi}$	θ ve ϕ doğrultusundaki ışıma yoğunluğu
D	Yönlülük
$D(\theta, \phi)$	θ ve ϕ doğrultusundaki yönlülük
D_{max}	Maksimum yönlülük
Ω	Ohm
Z_0	İletim hattı karakteristik empedansı
Z_L	Yük empedansı
λ_0	Boş uzayda dalga boyu
λ_g	Kılavuz dalga boyu
λ_{etkin}	Etkin dalga boyu
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
$d\Omega$	Katı açı elemanı

Kısaltmalar

EM	Elektromanyetik
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
LTE	Uzun süreli erişim
RL	Geri dönüş kaybı
SMA	Küçük versiyon A tipi
Wi-Fi	IEEE 802.11 tabanlı WLAN teknolojisi
WLAN	Kablosuz Yerel Alan Ağı
VSWR	Voltaj duran dalga oranı
BG	Bant genişliği
DDO	Duran dalga oranı
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
VNA	Vektör ağ analizörü
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
GSM	Mobil İletişim için Küresel Sistem
IoT	Nesnelerin İnterneti
WiMAX	Mikrodalga Erişim için Küresel Birlikte Çalışabilirlik
GNSS	Küresel Uydu Navigasyon Sistemi
RF	Radyo Frekansı
RFID	Radyo Frekansı Tanımlama

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Farklı tel anten konfigürasyonları: (a) Dipol, (b) döngü ve (c) Heliks (Balanis, 2005).....	6
Şekil 2.2 Açıklık antenler: (a) Piramitsel horn, (b) konik horn ve (c) dikdörtgen dalga kılavuzu.....	6
Şekil 2.3 Geleneksel mikroşerit yama anten (Balanis, 2005).....	7
Şekil 2.4 Dizi antenler: (a)Yagi-Uda, (b) Açıklık, (c) Mikroşerit yama ve (d) Slotlu dalga kılavuzu antenler (Balanis, 2005).....	7
Şekil 3.1 Geleneksel mikroşerit yama anten yapısının gösterimi (AS Yahia vd., 2011)...	9
Şekil 3.2 Mikroşerit beslemeli yama anten (Balanis 2005).....	12
Şekil 3.3 Gömülü beslemeli yama anten (Balanis 2005).....	12
Şekil 3.4 Yama antenin koaksiyel kablo ile beslenmesi (RK Garg vd., 2018).....	13
Şekil 3.5 Açıklık bağlı beslemeli yama anten tasarımı (Y Rhazi vd., 2013).....	14
Şekil 3.6 Örnek bir antene ait bant genişliğinin gösterimi (C Hertleer, 2009).....	16
Şekil 3.7 Tipik bir kutupsal ışınım deseni (T. Truckle, CC BY-SA 4.0, Wikipedia).....	17
Şekil 3.8 (a) Önerilen antenin konfigürasyonu ve (b) ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Moosazadeh ve Kharkovsky, 2014).....	21
Şekil 3.9 Üretilen anten prototipinin (a) ön, (b) arka yüzeyin konfigürasyonu ve (c) diyot kapalı konumdayken ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları.....	22
Şekil 3.10 Önerilen antenin (a) ön, (b) arka yüzeyin konfigürasyonu ve (c) ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Khan vd., 2019).....	23
Şekil 3.11 (a) Üretilen anten prototipi ve (b) anten tasarım sürecine ait S_{11} spektrumları (Patel vd., 2021).....	23
Şekil 3.12 Üretilen anten prototip ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Hammache vd., 2025).....	24
Şekil 3.13 (a) Üretilen anten prototipi ve (b) anten tasarım sürecine ait S_{11} spektrumları (Singh vd., 2025)	25
Şekil 4.1 TÜBİTAK Anten Test ve Araştırma Merkezinde anten ışıma örüntüsü ve kazanç ölçümü.....	28
Şekil 5.1 Nihai mikroşerit monopol anten tasarımının (a) ön ve (b) arka yüzeylerinin şematik görünüşleri.....	31
Şekil 5.2 Önerilen anten yapısının tasarım süreci.....	32
Şekil 5.3 Anten 1 konfigürasyonu gösterimi.....	33
Şekil 5.4 Anten 1'in R değişkenine bağlı olarak S_{11} spektrumu.....	33
Şekil 5.5 Anten 1 konfigürasyonunda (a) 2,18 GHz ve (b) 7,05 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları.....	35

Şekil 5.6 Anten 2 konfigürasyonu.....	36
Şekil 5.7 Slot uzunluklarının S_{11} spektrumuna etkisi: (a) PW1, (b) PW2.....	36
Şekil 5.8 Slot uzunluklarının S_{11} spektrumuna etkisi: (a) PL1 ve (b) PL2.....	37
Şekil 5.9 Slot uzunluğunun (PW3) S_{11} spektrumuna etkisi.....	38
Şekil 5.10 Anten 2 konfigürasyonunda (a) 1,92 GHz ve (b) 2,74 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları.....	40
Şekil 5.11 Anten 3 konfigürasyonu.....	41
Şekil 5.12 (a) GD1 ve (b) GL1 parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi.....	42
Şekil 5.13 Anten 3 konfigürasyonunda 3,45 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımı.....	43
Şekil 5.14 Anten 4 konfigürasyonu.....	44
Şekil 5.15 (a) Gy ve (b) GW1 parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi.....	44
Şekil 5.16 Anten 4 konfigürasyonunda 5,64 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımı.....	46
Şekil 5.17 Önerilen antenin dört rezonans frekansında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 1,88 GHz, (b) 2,41 GHz, (c) 3,48 GHz ve (d) 5,64 GHz.....	47
Şekil 5.18 Üretilen Anten 3 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyinin görünümü ile (c) ölçüm ve simülasyon S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması.....	48
Şekil 5.19 Önerilen nihai anten prototipinin (a) ön ve (b) arka yüzeyi.....	48
Şekil 5.20 Anten prototipinin VNA Master MS2037C ile ölçümü.....	49
Şekil 5.21 Önerilen nihai anten yapısının ölçüm ve simülasyon S_{11} spektrumların karşılaştırılması.....	49
Şekil 5.22 Önerilen antenin E-düzlemi ışıma örüntüleri: (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,27 GHz ve (d) 5,44 GHz.....	50
Şekil 5.23 Önerilen antenin H-düzlemi ışıma örüntüleri: (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,27 GHz ve (d) 5,44 GHz.....	51
Şekil 5.24 Önerilen antenin simüle edilen çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri: (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,48 GHz ve (d) 5,64 GHz.....	52
Şekil 5.25 Önerilen antenin (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,48 GHz ve (d) 5,64 GHz frekanslarındaki 3 boyutlu uzak alan ışıma karakteristikleri.....	52
Şekil 5.26 Nihai koaksiyel beslemeli anten tasarım konfigürasyonunun (a) ön ve (b) arka yüzeylerinin şematik görüntüleri.....	59
Şekil 5.27 Önerilen anten yapısının tasarım aşamaları.....	59
Şekil 5.28 Anten 1 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyleri.....	60
Şekil 5.29 Koaksiyel beslemeli dikdörtgen yama antenin temel yapısına ait simüle edilen S_{11} spektrumu.....	61
Şekil 5.30 Anten 2 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyleri.....	61

Şekil 5.31(a) Slot boyunun (SL1) ve (b) genişliğinin (SW1) S_{11} spektrumuna olan etkileri.....	62
Şekil 5.32 Anten 2 konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 4,56 GHz, (b) 6,43 GHz, (c) 6,91 GHz, (d) 9,3 GHz ve (e) 10,86 GHz.....	64
Şekil 5.33 Anten 3 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyleri.....	64
Şekil 5.34 (a) Slot genişliğinin (SW2) ve (b) boyunun (SL2) S_{11} spektrumuna olan etkileri.....	65
Şekil 5.35 Nihai yapı için konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 2,36 GHz, (b) 5,09 GHz, (c) 6,05 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 10,94 GHz...	67
Şekil 5.36 Önerilen nihai anten prototipinin (a) ön ve (b) arka yüzeyi.....	67
Şekil 5.37 Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması.....	68
Şekil 5.38 Simüle edilen çapraz ışıma örüntüleri: (a) 2,36 GHz, (b) 5,09 GHz, (c) 6,05 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 10,94 GHz.....	69
Şekil 5.39 Antenin (a) 2,36 GHz, (b) 5,09 GHz, (c) 6,05 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 10,94 GHz frekanslarındaki 3B uzak alan ışıma karakteristikleri.....	70
Şekil 5.40 Önerilen antenin ışıma ve toplam verimlilik spektrumları.....	71
Şekil 5.41 Açıklık bağlaşımlı temel antenin şematik gösterimi.....	74
Şekil 5.42 Nihai açıklık bağlaşımlı beslemeli yama anten tasarım konfigürasyonunun (a) ön ve (b) arka yüzeylerinin şematik görünüşleri.....	75
Şekil 5.43 Önerilen anten yapısının tasarım aşamaları.....	76
Şekil 5.44 Açıklık slotun uzunluğu ($W_{yarık}$) S_{11} spektrumuna etkisi.....	77
Şekil 5.45 Anten 1 konfigürasyonu: (a) Üst, (b) alt ve (c) yandan görünümü	78
Şekil 5.46 Açıklık bağlaşımlı yama antenin temel yapısına ait simüle edilen S_{11} spektrumu.....	78
Şekil 5.47 Anten 1 konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 6,02 GHz ve (b) 10,08 GHz.....	79
Şekil 5.48 Anten 2 konfigürasyonu.....	79
Şekil 5.49 (a) PW1, (b) PL1 parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi.....	80
Şekil 5.50 Anten 2 yapısı için 6.64 GHz rezonans frekansı için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımı.....	81
Şekil 5.51 Anten 3 konfigürasyonu.....	81
Şekil 5.52 (a) PW2, (b) PL2 parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi.....	82
Şekil 5.53 Anten 3 konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 5,51 GHz, (b) 6,21 GHz ve (c) 8,67 GHz.....	83
Şekil 5.54 Anten 4 konfigürasyonu.....	84
Şekil 5.55 (a) PW3, (b) PL3 parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi.....	85

Şekil 5.56 Önerilen nihai anten prototipinin (a) ön, (b) arka ve (c) yan görünümü.....	85
Şekil 5.57 Üretilen antenin (a) ölçüm sırasında çekilen fotoğrafı ve (b) ölçülen–simüle edilen S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.58 Nihai konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 9,97 GHz.....	87
Şekil 5.59 $\varphi=0^\circ$ için antenin ışıma karakteristikleri: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz ve (d) 8,65 GHz.....	88
Şekil 5.60 $\varphi=90^\circ$ için antenin ışıma karakteristikleri: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz ve (d) 8,65 GHz.....	89
Şekil 5.61 $\varphi=0^\circ$ ve 90° düzlemlerinde frekansa bağlı kazanç değerleri.....	89
Şekil 5.62 Simüle edilen çapraz polarizasyon örüntüleri: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz ve (d) 8,65 GHz.....	90
Şekil 5.63 Önerilen antenin ışıma ve toplam verimlilik spektrumları.....	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 Nihai antenin optimize edilmiş geometrik boyutları.....	31
Çizelge 5.2 Anten 2'nin simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri.....	39
Çizelge 5.3 Anten 3'ün simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri.....	42
Çizelge 5.4 Anten 4'ün (Nihai yapı) simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri.....	45
Çizelge 5.5 Üretilen Anten 3 yapısının ölçüm sonuçları.....	48
Çizelge 5.6 Önerilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekansları, genlikleri, BG, DDO, kazanç ve ışıma verimliliği değerleri.....	54
Çizelge 5.7 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması..	55
Çizelge 5.8 Nihai antenin optimize edilmiş geometrik boyutları.....	59
Çizelge 5.9 Anten 2'nin simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri.....	63
Çizelge 5.10 Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekansları ve S_{11} büyüklük değerleri.....	68
Çizelge 5.11 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması	72
Çizelge 5.12 Nihai antenin optimize edilmiş geometrik boyutları.....	75
Çizelge 5.13 Anten 2'ye ait simüle edilen S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri.....	80
Çizelge 5.14 Anten 3'e ait simüle edilen S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri.....	83
Çizelge 5.15 Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekansları ve S_{11} büyüklük değerleri.....	86
Çizelge 5.16 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması	92
Çizelge 6.1 Tez kapsamında geliştirilen antenlerin bant sayısı, anten boyutu, rezonans frekansı, S_{11} , anten kazancı ve ışıma verimliliği değerleri.....	97

1. GİRİŞ

Günümüzde haberleşme teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, çok bantlı, kompakt ve yüksek performanslı anten tasarımlarına olan ihtiyacı önemli ölçüde artırmıştır. Antenler, başta kablosuz haberleşme sistemleri olmak üzere; savunma sanayi, uydu iletişimi, radar sistemleri ve tıbbi görüntüleme gibi birçok kritik uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle 5G, IEEE 802.11 tabanlı WLAN teknolojisi (Wi-Fi), Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), Mobil İletişim İçin Küresel Sistem (GSM) ve Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) gibi çoklu frekans bandında çalışan sistemlerde, birden fazla çalışma frekansını destekleyen anten çözümlerine duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Antenler, elektromanyetik (EM) enerjiyi elektriksel sinyallere ya da elektriksel sinyalleri EM dalgalara dönüştüren enerji dönüştürücüleridir. Antenler verici olarak gelen sinyali serbest uzaya yayabilir veya alıcı olarak çevresindeki EM dalgaları toplayıp sinyal işleme birimlerine iletebilir.

Antenlerin gelişimi, EM dalgaların teorik olarak öngörülmesiyle başlamıştır. 1864 yılında James Clerk Maxwell, EM dalgaların varlığını öngören denklemleri ortaya koymuş; bu öngörü, 1888 yılında Heinrich Hertz'in deneysel çalışmalarıyla doğrulanmıştır (Cheng 1989). Hertz'in kıvılcım boşalmalı devrelerle gerçekleştirdiği deneyler, EM dalgaların üretilbildiğini ve anten benzeri yapılarla iletilebildiğini göstermiştir. 1890'lı yıllarda Guglielmo Marconi, radyo iletişimi alanındaki öncü çalışmalarıyla antenlerin pratik kullanımını başlatmış ve uzun mesafeli kablosuz iletişimin temelini atmıştır. Takip eden yıllarda, özellikle İkinci Dünya Savaşı esnasında radar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte anten tasarımları çeşitlenmiş ve anten performansı açısından önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Collin 1985). 20. yüzyılın ortalarından itibaren ise iletişim, savunma ve uzay teknolojilerindeki artan gereksinimler, daha kompakt, hafif ve entegre sistemlerle uyumlu anten türlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Balanis 2005).

1970'li yıllarda mikroşerit antenler ortaya çıkmış ve kısa sürede ilgi görmüştür. Mikroşerit antenler; düşük profilli ve düzlemsel yapıları, üretim kolaylığı ve entegre sistemlere uyumlu olmaları gibi birçok avantaja sahip olup taşınabilir ve gömülü

sistemlerde öne çıkmaktadır. Ancak geleneksel bir mikroşerit yama anten, genellikle yalnızca tek bir rezonans frekansında çalışır ve bant genişliği çoğu zaman merkez frekansın yaklaşık %1–5'i ile sınırlıdır. Bu nedenle bu tür antenler dar bantlı olarak sınıflandırılmakta olup, geniş bant (%10 ve üzeri) veya çok bantlı iletişim sistemleri açısından yetersiz kalabilmektedir. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla mikroşerit antenlerin bant genişliğini artırmaya ve çoklu rezonans frekanslarında çalışmasını sağlamaya yönelik çeşitli teknikler literatürde önerilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu yöntemler, literatürde mikroşerit antenlerin BG'sini artırmak amacıyla sıkça kullanılan teknikler olup; slot yapılar, kusurlu toprak yapısı uygulamaları, fraktal geometriler ve kısa devre elemanlarını içermektedir (Balanis 2015; Bağcı ve Eser 2024; Kumar ve Ray 2003).

Bu tez çalışmasında, üç farklı anten geliştirilmiştir. İlk çalışmada, üçgen yama geometrisine ve kusurlu toprak düzlemine sahip dört bantlı slotlu bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Anten tasarımı, üç boyutlu tam dalga elektromanyetik analiz aracı olan CST Studio Suite programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde yama üzerine basamak şeklinde kıvrımlı slotlar eklenmiş, ardından kısmi toprak düzlemi üzerinde birbirine simetrik dikey ve yatay slotlar açılarak antenin rezonans frekansı sayısı dört banda çıkarılmış ve S_{11} performansı iyileştirilmiştir. Hem yama hem de toprak düzlemi üzerindeki slotların anten parametreleri üzerindeki etkileri parametrik taramalarla ayrıntılı olarak incelenmiş ve optimize edilmiştir. Tam dalga elektromanyetik benzetimler sonucunda elde edilen nihai tasarım bir prototip olarak üretilmiş ve deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sonuçların, simülasyon verileri ile iyi bir uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Üretilen nihai anten sırasıyla 1,87 GHz, 2,42 GHz, 3,27 GHz ve 5,44 GHz frekanslarında çalışmakta olup, GSM, Kablosuz Yerel Alan Ağı (WLAN) ve Mikrodalga Erişim için Küresel Birlikte Çalışabilirlik (WiMAX) bantlarının önemli bölümlerini etkin bir şekilde kapsamaktadır. Antenin ölçülen kazanç değerleri yaklaşık 2,0–2,9 dBi aralığında değişmekte olup, ortalama ışıma verimliliği ise %73 civarındadır. Kompakt boyutu, çok bantlı yapısı ve yeterli ışıma performansı sayesinde önerilen anten, çoklu kablosuz servisleri destekleyen taşınabilir cihazlar için uygun bir aday olarak değerlendirilmektedir.

İkinci çalışma olarak çok bantlı, koaksiyel beslemeli ve slotlu bir mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiş; nümerik analizler aracılığıyla antenin performansı optimize edilmiştir. Antenin yama düzleminde L şeklinde iki slot, toprak düzleminde ise dikdörtgen halka şeklinde bir slot bulunmaktadır. Tam dalga EM simülasyon programı olan CST Studio Suite kullanılarak antenin simülasyonu gerçekleştirilmiş ve slot yapıları üzerinde uygulanan optimizasyon süreci sonucunda, antenin 2,36 GHz, 5,08 GHz, 6,05 GHz, 8,64 GHz ve 10,93 GHz frekanslarında $S_{11} < -15$ dB seviyesinde çalıştığı ve S, C ve X bantlarında kullanılmaya uygun olduğu ortaya konmuştur. Antenin maksimum kazanç değerlerinin 2,69 dBi ile 5,45 dBi arasında değiştiği belirlenmiştir. Antenin ortalama toplam verimliliği ise %90,42 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, tasarlanan antenin geniş frekans kapsamı, yüksek verimliliği ve kompakt boyutları sayesinde S, C ve X bantlarında çalışan radar sistemleri, kablosuz haberleşme modülleri ve sensör ağları gibi çok bantlı uygulamalarda kullanılmaya elverişli bir aday olduğunu göstermektedir. Bu çalışma 33. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı'nda sunulmuş olup uluslararası bir tam metin bildiri olarak yayınlanmıştır (Eser vd., 2025).

Tez çalışmasının son aşamasında, çok bantlı açıklık bağlaşımlı besleme yapısına sahip slotlu bir mikroşerit yama anten tasarlanmış ve nümerik analizler doğrultusunda optimize edilmiştir. İki dielektrik katman arasındaki 2,5 mm'lik mesafe, köşe noktalara yerleştirilen 4,0 mm çapında ve 2,5 mm uzunluğunda PETG filamandan imal silindirik ara parçalar ile sağlanmıştır. Tüm katmanlar dikkate alındığında antenin toplam boyutları $40,00 \times 36,00 \times 4,52$ mm³ olarak elde edilmiştir. Yama üzerine iki adet ters L biçimli slot ve bir adet T şeklinde slot eklenmiş, bu slotların geometrik parametreleri üzerinde gerçekleştirilen parametrik incelemeler sonucunda antenin dört bantta çalışması sağlanmıştır. Tasarlanan antenin prototipi üretilmiş ve S-parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, antenin C ve X bantlarına karşılık gelen 5,50 GHz, 6,06 GHz, 6,62 GHz ve 8,55 GHz merkez frekanslarında çalıştığını göstermiş ve simülasyon sonuçlarıyla genel olarak uyumlu bir S_{11} karakteristiği sunmuştur. Simülasyonlara göre antenin maksimum kazanç değerleri 6,90–8,21 dBi aralığında değişmekte olup toplam verimlilik %87,6 ve %95,2 arasında elde edilmiştir. Bu

özellikleri sayesinde tasarlanan anten, uydu iletişimi, 5G/6G kablosuz sistemler ve çok bantlı radar uygulamaları gibi modern haberleşme sistemlerinde kullanılmaya uygundur.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında farklı besleme teknikleri, slot geometrileri ve toprak düzlemi düzenlemeleri kullanılarak üç ayrı çok bantlı mikroşerit anten tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen antenler, hem nümerik analizler hem de deneysel ölçümler ile doğrulanmış; elde edilen sonuçlar, tasarımların çok bantlı çalışma yeteneği, yeterli kazanç ve yüksek ışıma verimliliği sunduğunu açıkça ortaya koymuştur.



2. KURAMSAL TEMELLER

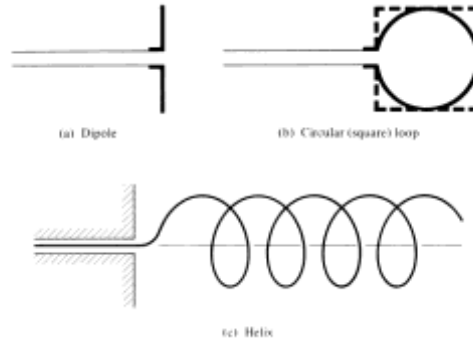
2.1 Antenler

Anten, elektrik sinyalleri ile EM dalgalar arasında dönüşüm yapan temel bir elemandır. Hem verici hem de alıcı olarak görev yapabilen antenler, EM enerjiyi iletken hatlardan serbest uzaya veya serbest uzaydan iletken hatlara aktarır. Bu özellikleri sayesinde kablosuz iletişim sistemlerinin vazgeçilmez bir parçasını oluştururlar. Antenler, özellikle kablosuz iletişim ihtiyacının artmasıyla birlikte sürekli olarak geliştirilmiş ve çeşitlendirilmiştir. İlk antenler, radyo dalgalarının iletimi ve alımı amacıyla tasarlanmış olup, EM dalga kuramının pratiğe aktarılmasıyla ortaya çıkmıştır (Balanis, 2005). Zaman içinde askeri, uydu, radar ve ticari iletişim sistemlerindeki teknolojik ilerlemeler, antenlerin yalnızca temel iletim/alım görevlerini değil, aynı zamanda daha yüksek kazanç, daha geniş BG, daha küçük boyut ve çoklu frekans desteği gibi gelişmiş performans özelliklerini karşılamasını da gerekli kılmıştır. Bu durum, anten tasarımı ve mühendisliği alanında hem teorik hem de uygulamalı çalışmaların artmasına öncülük etmiştir. Bu doğrultuda, günümüzde küçük boyutlu, çok bantlı veya geniş bantlı ve yüksek verimli antenlerin tasarımı, modern kablosuz iletişim sistemlerinin gelişimi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Başlıca anten tipleri tel antenler, açıklık antenler, mikroşerit antenler, dizi antenler, reflektör antenler ve lens antenler olarak verilebilir (Balanis 2005). Bu anten tipleri aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır.

2.1.1 Tel antenler

Tel antenler, dipol, döngü, helisel ve monopol gibi çeşitleriyle belirli frekanslarda rezonans göstererek sinyal iletim ve alımında kullanılır. Bu anten tipine örnek olarak Şekil 2.1’de verilmiştir. Hafif, ekonomik ve üretimi kolay olmaları avantajdır; ancak geniş bantlı çalışmaları sınırlı olup boyutları dalga boyuna bağlıdır. Boyut, şekil, yerleşim ve besleme biçimi anten performansını belirler (Balanis, 2005).



Şekil 2.1 Farklı tel anten konfigürasyonları: (a) Dipol, (b) dögü ve (c) heliks (Balanis, 2005)

2.1.2 Açıklık antenler

Açıklık anteni, sonunda belirli bir açıklık bulunan ve EM enerjinin serbest uzaya yayıldığı anten türüdür. En bilinen örnekleri dalga kılavuzlarıdır; EM dalgalar, dalga kılavuzunun serbest uzaya açıldığı bu açıklık bölgesinden yayılır. Piramitsel horn, konik horn ve dikdörtgen dalga kılavuzlu açıklık antenleri, bu anten tipine örnek olarak Şekil 2.2’de verilmiştir. Antenin açıklık boyutu, kazanç ve performansını etkileyen önemli bir parametredir.

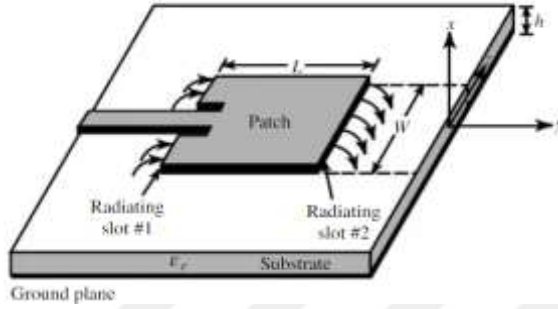


Şekil 2.2 Açıklık antenler: (a) Piramitsel horn, (b) konik horn ve (c) dikdörtgen dalga kılavuzu

2.1.3 Mikroşerit antenler

Mikroşerit antenler, ince ve düz yapıları sayesinde baskılı devre kartları (PCBler) üzerinde üretilen, genellikle mikrodalga frekanslarında kullanılan antenlerdir. Şekil 2.3’te gösterildiği üzere, temel yapı; PCB yüzeyinde yer alan metal bir yama ile kartın diğer tarafındaki toprak düzleminden oluşmaktadır. En yaygın şekli yama antendir. Düşük profilleri, hafiflikleri ve kolay entegre edilebilmeleri sebebiyle özellikle mobil

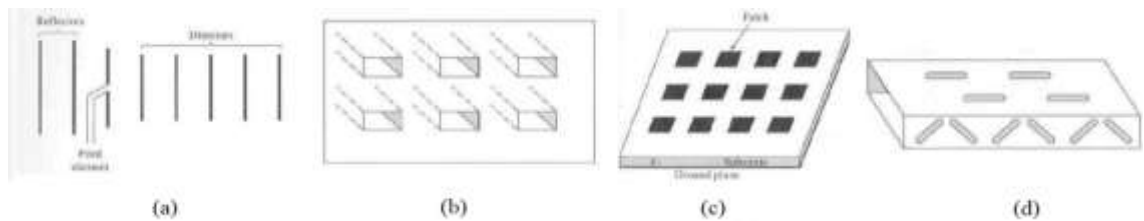
iletişim, havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilirler (Balanis, 2005). BG değerleri az olmakla birlikte, şekil ve yapısal tasarım değişiklikleri ile performansları iyileştirilebilir. Bu tez çalışmasında mikroşerit anten yapısı kullanıldığından 3.kesimde daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



şekil 2.3 Geleneksel mikroşerit yama anten (Balanis, 2005)

2.1.4 Dizi antenler

Dizi antenler, birden fazla radyasyon elemanının belirli bir geometrik düzende bir araya getirilmesiyle oluşturulur. şekil 2.4’de dizi anten konfigürasyonları sunulmuştur. Bu elemanlar faz ve genlik açısından kontrollü beslenerek toplam kazanç, yönlölük ve verimlilik artırılabilir (Balanis, 2005). Ayrıca parazitler bastırılabilir, istenilen yönde yönlendirilmiş ışıma yapılabilir ve sinyallerin geliş yönü kontrol edilerek performans iyileştirilebilir. Radar, uydu iletişimi, mobil ve kablosuz haberleşme ile askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Dizi anten türleri arasında Yagi-Uda, açıklık, mikroşerit yama ve slotlu dalga kılavuzlu antenler yer almakta olup, uygulama alanlarına ve ihtiyaçlara göre farklı avantajlar sunarak dizi anten teknolojisinin çeşitlenmesini sağlamaktadır.



şekil 2.4 Dizi antenler: (a)Yagi-Uda, (b) açıklık, (c) mikroşerit yama ve (d) slotlu dalga kılavuzu antenler (Balanis, 2005)

2.1.5 Reflektör antenler

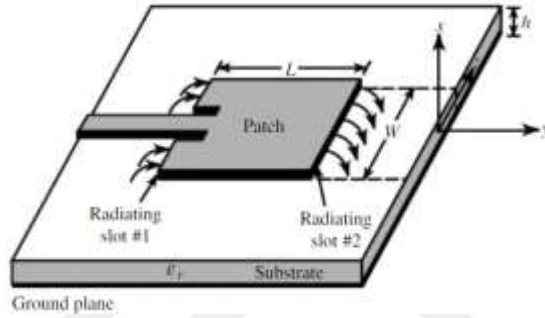
Reflektör antenler, EM dalgaları belirli bir doğrultuya yansıtarak odaklayan yapılardır. Yüksek frekanslı (özellikle mikrodalga) uygulamalarda tercih edilir ve basit, hafif yapıları sayesinde uzay görevleri gibi yer kısıtlamalı sistemlerde yaygın kullanılır. Yapı, aktif bir anten elemanı ile onu tamamlayan yansıtıcı yüzeyden oluşur (Balanis, 2005). Yansıtıcı yüzey parabolik, elipsoidal, hiperbolik veya sferoidal olabilir; en yaygın kullanılan ise paraboliktir. Bu sayede antenin yönelme yeteneği ve kazancı artar, büyük çaplı antenlerle uzak mesafelere EM dalgalar iletilebilir.

2.1.6 Lens antenler

Lens antenler, EM dalgaları kırarak odaklayan pasif yapılardır. Optik lensler gibi dalga cephesini şekillendirerek yüksek kazanç ve dar ana lob sağlar, özellikle mikro ve milimetre dalga frekanslarında kullanılır (Stutzman ve Thiele, 2012). Dielektrik, metalik ve bölmeli olmak üzere üç türü bulunur. Yüksek frekanslarda parabolik antenlere alternatif oluşturabilirler (Balanis, 2005).

3. MİKROŞERİT ANTENLER VE TEMEL KAVRAMLAR

Mikroşerit antenler, bir dielektrik alttaşın ön yüzeyine yerleştirilmiş iletken bir yama ve arka yüzeyine konumlandırılmış bir toprak düzlemi ile oluşturulan düzlemsel yapılardır. Şekil 3.1’de geleneksel bir mikroşerit yama anten konfigürasyonu sunulmuştur. Üretim kolaylığı, düşük profil yapısı, hafifliği ve uygun tasarım teknikleriyle çok bantlı çalışabilme yeteneği sayesinde günümüzde uydu haberleşmesi, radar sistemleri, mobil iletişim cihazları ve entegre radyo frekansı (RF) uygulamaları gibi birçok kablosuz haberleşme alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Geleneksel mikroşerit yama anten yapısının gösterimi (Yahia AS vd., 2011)

Mikroşerit antenlerin teorik temeli ilk olarak 1953’de Deschamps tarafından mikroşerit iletim hattı kavramıyla ortaya konmuştur (Balanis, 2005). 1955’de Gutton ve Baissinot ilk patenti almış, 1969’da Denlinger, dikdörtgen ve dairesel rezonatörlerin etkin ışıma yapabileceğini deneysel olarak göstermiştir. 1970’lerin başında Howel ve Munson, ilk fonksiyonel mikroşerit yama antenleri geliştirmiştir (Pozar, 1992). Bu antenler, özellikle düşük profilli ve yüzeye monte edilebilen yapıları sayesinde füze ve uzay aracı gibi platformlarda büyük ilgi görmüştür. Başlangıçta dar BG ve düşük verimlilik sınırlamaları olsa da slot ekleme, çok katmanlı yapılar, farklı besleme teknikleri ve geometri optimizasyonu gibi yöntemlerle performans önemli ölçüde artırılmış, günümüzde haberleşme ve radar uygulamalarında yaygın hale gelmiştir.

Mikroşerit yama antenler genellikle temel TM_{10} modunda çalışır ve yamanın uzunluğu, rezonans frekansında verimli ışıma için yaklaşık $(\lambda_g/2)$ olacak şekilde tasarlanır. Yama

boyutları, antenin rezonans frekansı yarım kılavuz dalga boyu, kullanılan dielektrik malzemenin sabiti (ϵ_r) ve alt alttaş kalınlığı (h) dikkate alınarak belirlenir.

Yama uzunluğu tasarım tipine göre yarım dalga ($\lambda_g/2$) veya çeyrek dalga ($\lambda_g/4$) rezonansına göre seçilir ve genişlik ile besleme noktası empedans uyumu ve yönlülüğü optimize edecek şekilde ayarlanır (Balanis 2005; Stutzman ve Thiele 2012).

Bu amaçla, öncelikle serbest uzaydaki dalga boyu (λ_0) denklem 3.1 ile hesaplanır:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \quad (3.1)$$

Burada c ışık hızı olup 3×10^8 m/s, f_r ise hedeflenen rezonans frekansıdır. Mikroşerit antenlerde EM dalgalar alttaşın içinde yayıldığı için, etkin dielektrik sabiti (ϵ_{etkin}) denklem 3.2 ile hesaplanır.

$$\epsilon_{etkin} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Burada ϵ_r alttaşın bağıl dielektrik sabiti, h alttaş kalınlığı ve W yamanın genişliği olup genellikle $W/h > 1$ 'dir. Böylece, etkin dalga boyu (λ_{etkin}) denklem 3.3 ile hesaplanır.

$$\lambda_{etkin} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{etkin}}} \quad (3.3)$$

Böylece yamanın uzunluğu (L) yarım dalga ($\lambda_g/2$) cinsinden, kenar etkileri göz önüne alınarak 3.4 formülü ile hesaplanır.

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{etkin}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

Buradaki ΔL , yamanın iki ucundaki elektriksel uzamayı ifade etmekte olup denklem 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{etkin}+0,3)\left(\frac{W}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{etkin}-0,258)\left(\frac{W}{h}+0,8\right)} \quad (3.5)$$

Yamanın genişliği (W) ise genellikle aşağıdaki formül ile belirlenir:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (3.6)$$

Bu formüllerin yardımıyla yamanın boyutları hassas biçimde belirlenebilir ve antenin istenen frekansta etkin şekilde çalışması sağlanabilir.

Mikroşerit yama antenlerde ışıma, Şekil 3.1’de gösterildiği üzere, yamanın açık kenarlarında oluşan saçak alanlar aracılığıyla gerçekleşir (Balanis, 2005). Yama ile toprak düzlemi arasındaki dielektrik katmanda yayılan alanlar kenarlardan dışarı taşarak havaya saçılır ve böylece antenin serbest uzaya enerji yayması sağlanır. Bu mekanizma sonucunda rezonans koşulları sağlanır ve anten ışıma yapar.

Ancak saçaklanma etkisi aynı zamanda fiziksel yama uzunluğunun elektriksel olarak daha uzun algılanmasına neden olur. Bu nedenle tasarım sırasında, yamanın uçlarında oluşan elektriksel uzama miktarı (ΔL) da hesaba katılarak, etkin yama uzunluğu L_{etkin} , denklem 3.7 ile hesaplanır (Garg & arkadaşları 2001; Balanis 2005).

$$L_{etkin} = L + 2\Delta L \quad (3.7)$$

3.1 Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenlerin performansı, besleme yöntemine bağlıdır; bu yöntemler empedans uyumu, BG ve yönlülüğü doğrudan etkiler. En yaygın besleme teknikleri mikroşerit hat, koaksiyel (prob), açıklık ve kapasitif beslemedir.

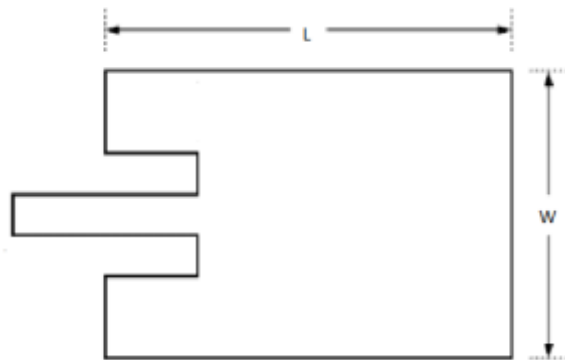
3.1.1 Mikroşerit hat ile besleme

Mikroşerit besleme yöntemi, iletken bir şeridin yama kenarına doğrudan bağlanmasıyla uygulanır. Aynı dielektrik üzerinde yer alması, ince, düz ve entegre edilebilir bir yapı sağlar, üretimi kolaylaştırır ve düşük profilli sistemlerle uyumludur (Şekil 3.2). Ancak yama uç kenarından beslemede akım minimum, gerilim maksimum olur; bu nedenle giriş empedansı yüksek olabilir ve 50Ω mikroşerit hat empedansı ile örtüşmeyebilir.

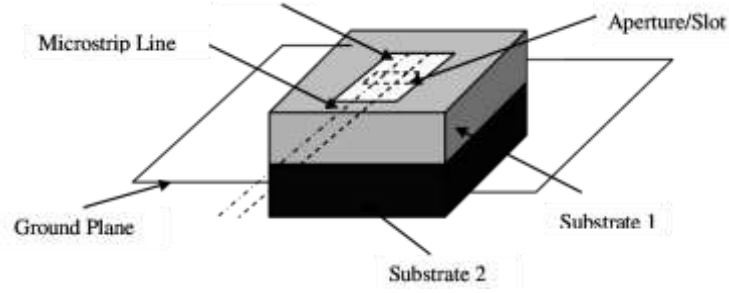


Şekil 3.2 Mikroşerit beslemeli yama anten (Balanis, 2005)

Empedans farklarını gidermek ve verimi artırmak için çeşitli uyumlama teknikleri kullanılmaktadır (Balanis, 2005; Pozar, 1992). Gömülü besleme yöntemi, besleme noktasını yama kenarından içeriye taşıyarak daha düşük empedanslı bir bölgeden enerji aktarır ve giriş empedansını 50Ω 'a yakınlaştırır. Şekil 3.3'de bu yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Gömülü beslemeli yama anten (Balanis, 2005)



Şekil 3.5 Açıklık bağlaşımlı beslemeli yama anten tasarımı (Rhazi Y., vd. 2013)

3.2 Anten Parametreleri

3.2.1 Rezonans frekansı

Mikroşerit antenlerde rezonans frekansı, antenin en etkin şekilde çalıştığı ve yansıyan gücün en az olduğu frekanstır. Bu frekansta antenin giriş empedansı büyük oranda reel yani gerçek bir değer alır ve empedans uyumu sağlanır (Balanis, 2005). Antenin geometrisi, kullanılan dielektrik malzemenin özellikleri ve besleme tekniği gibi birçok parametreler antenin çalıştığı rezonansı değiştirir. Tasarım sürecinde antenin çalışması istenilen frekans, hedeflenen haberleşme bandına uygun şekilde belirlenir. Yama tipi antenlerde özellikle yamanın uzunluğu (veya dairesel bir yapıda yarıçapı), rezonans frekansını doğrudan belirleyen ana boyutsal parametrelerden biridir.

3.2.2 Yansıma katsayısı

Yansıma katsayısı, özellikle S_{11} parametresi, empedans uyumsuzluğu nedeniyle EM dalganın ne kadarının geri yansıdığını gösteren önemli bir ölçüttür (Balanis, 2005; Pozar, 1992). S_{11} büyüklüğü, genellikle yansıyan dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranı şeklinde ve fazör olarak ifade edilir. İletim hattı teorisinde gerilim ve akım bileşenleri referans empedans (Z_0)'a göre gelen ve yansıyan dalgalara ayrıştırılabilir.

Bu oran matematiksel olarak yansıyan dalga gerilimi V^- ile gelen dalga gerilimi V^+ arasındaki ilişki şeklinde tanımlanır ve genellikle formüllerde $|\Gamma|$ veya $|S_{11}|$ sembolü ile gösterilir (denklem 3.8).

$$|\Gamma| = |S_{11}| = \frac{V^-}{V^+} \quad (3.8)$$

3.2.3 Geri dönüş kaybı

Geri dönüş kaybı (RL), iletim hattı veya anten sisteminin giriş portunda oluşan yansıma katsayısına bağlı olarak, gönderilen gücün ne kadarının geri yansıtıldığını ifade eden ve empedans uyumunu nicel olarak gösteren kritik bir performans parametresidir. Bu değer, sistemdeki empedans uyumunun derecesini S_{11} büyüklüğü ile ortaya koyar. Eğer yük empedansı Z_L , iletim hattının karakteristik empedansı (Z_0) ile tam olarak uyumlu değilse, gönderilen sinyalin bir bölümü kaynağa geri yansır (Balanis, 2005). Bu yansımanın büyüklüğü, $|S_{11}|$ veya $|\Gamma|$ ile ifade edilir ve yük ile hat empedansları arasındaki farkı temel alan denklem 3.9 ile hesaplanır.

$$|S_{11}| = |\Gamma| = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.9)$$

Bu katsayının mutlak değeri, sistemdeki yansıma miktarını gösterirken, RL bu değerın logaritmik ölçekte ifadesidir. RL genellikle desibel (dB) cinsinden verilir ve denklem 3.10 ile hesaplanır.

$$RL = -20 \cdot \log_{10}(|S_{11}|) \quad (3.10)$$

3.2.4 Duran Dalga oranı

DDO, iletim hattında oluşan empedans uyumsuzluğunu ifade eden önemli parametrelerden biridir. Anten veya yük ile iletim hattı arasında tam bir uyum olmadığında, yansıyan dalgalar nedeniyle hat üzerinde duran dalga yapıları meydana gelir.

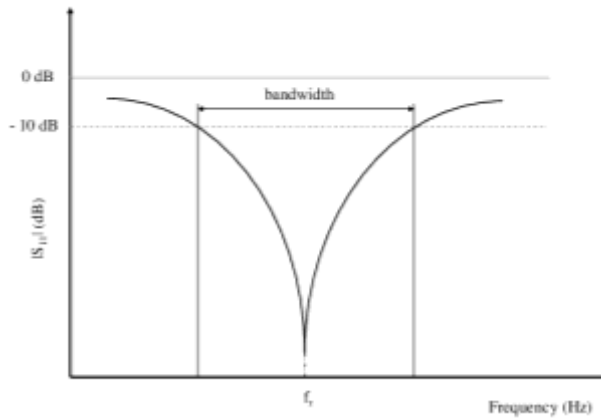
DDO, dalgaların maksimum ve minimum gerilim değerleri arasındaki oran olarak ifade edilir (Pozar, 1992; Balanis, 2005).

DDO değeri 1 ile ∞ arasında değişir. DDO=1 olması ideal durumu yani hat ile yük arasında tam empedans uyumunu gösterir. Pratikte DDO'nun tam 1 olması mümkün değildir; üretim toleransları, kayıplar ve çevresel etkiler nedeniyle ideal uyum sağlanamaz. Bu yüzden DDO'nun 1'e yakın olması tercih edilir. Yüksek DDO değerleri yansıma ve enerji kaybını artırır; bu nedenle anten sistemlerinde düşük DDO, verimli enerji transferi ve yüksek performans için önemlidir. DDO, denklem 3.11 ile hesaplanır.

$$DDO = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (3.11)$$

3.2.5 Bant genişliği

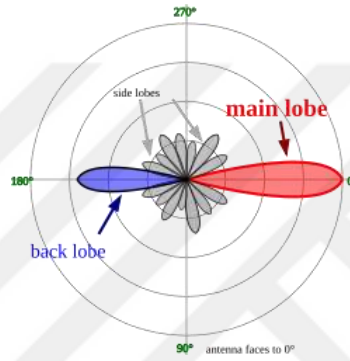
BG, bir antenin verimli çalıştığı frekans aralığını gösterir ve bu aralıkta sinyal gönderip alabilir. Mikroşerit antenlerde genellikle S_{11} büyüklüklerinin -10 dB seviyesinin altına düştüğü frekans aralığı BG olarak kabul edilir (Şekil 3.6). Geniş bantlı antenler daha fazla frekansta etkili performans sağlar; ancak basit mikroşerit tasarımlarda BG genellikle sınırlıdır ve çeşitli yöntemlerle artırılmaya çalışılır (Balanis 2005).



Şekil 3.6 Örnek bir antene ait bant genişliğinin gösterimi (Hertleer C., 2009)

3.2.6 Işıma örüntüsü

Anten ışıma deseni, EM dalgaların farklı yönler ne kadar yayıldığını gösterir (Balanis 2005; Pozar 1992). Şekil 3.7’de örnek bir iki boyutlu (2B) ışıma örüntüsü gösterilmiştir. Uzak alan bölgesinde alan şiddetinin yönler göre değişimi, genellikle anekoik odalarda referans anten ve ölçüm cihazları kullanılarak kaydedilir; aynı zamanda HFSS, CST ve NEC gibi simülasyonlarla da elde edilebilir. Işıma örüntüsü, kutupsal veya 3B grafiklerle sunulur ve anten performansı, yönlülük ile kazanç analizlerinde kullanılır.



Şekil 3.7 Tipik bir kutupsal ışıma deseni (Wikipedia/Radiation pattern)

Anten ışıma deseninde enerjinin dağılımı ana, yan ve arka loblarla ifade edilir. Ana lob, en fazla enerjiye sahip ve sinyalin yönlendirildiği temel bölgedir. Yan loblar daha düşük güçte olup istenmeyen yönler yayılmayı sağlar ve verimliliği düşürebilir (Balanis, 2005). Arka lob, ana lobun ters yönünde oluşur ve geri yönde ışıma temsil eder; bu nedenle mümkün olduğunca bastırılmalıdır. Lobların incelenmesi, yönlülük ve sistem performansının optimize edilmesi için önemlidir.

3.2.7 Işıma güç yoğunluğu ve şiddeti

Işıma güç yoğunluğu, anten tarafından belirli bir yönde yayılan EM enerjinin birim alana düşen gücüdür. Matematiksel olarak, bir noktadaki ışıma güç yoğunluğu, o noktadaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri kullanılarak Poynting vektörü $\vec{S}$ ile ifade edilir ve 3.12 denklemi ile verilir (Balanis 2005; Pozar 1992).

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.12)$$

Bu formülde, $\vec{S}$, Poynting vektörü olup birim alan başına düşen güç yoğunluğunu (W/m²) temsil eder. $\vec{E}$, elektrik alan vektörü (volt/metre, V/m) ve $\vec{H}$, manyetik alan vektörü ise amper/metre (A/m) birimleriyle ifade edilir.

Işıma güç yoğunluğu genellikle antenin uzak alan bölgesinde incelenmektedir. Antenin toplam yayılan gücü (P_{rad}) denklem 3.13 ile bulunur.

$$P_{rad} = \iint_{4\pi} S(\theta, \phi) r^2 d\Omega \quad (3.13)$$

r : uzak alan mesafesi

$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$, katı açı elemanı

Işıma şiddeti, antenin belirli bir yönde yayılan gücünün, o yönde ölçülen katı açı elemanına oranı olarak tanımlanır. Bu parametre, antenin farklı yönlerde ne kadar enerji yaydığını gösterir ve birim katı açı başına düşen güç miktarını ifade eder. Matematiksel olarak, denklem 3.14 ile gösterilir.

$$U(\theta, \phi) = r^2 S(\theta, \phi) \quad (3.14)$$

$U(\theta, \phi)$, ışıma şiddeti (W/sr)

$S(\theta, \phi)$, o yöndeki ışıma güç yoğunluğu (W/m²)

3.2.8 Yönlülük

Yönlülük, bir antenin yaydığı toplam gücün belirli bir yönde yoğunlaşma derecesini ifade eden bir parametredir. Antenin belli bir yönde yaydığı güç yoğunluğu ile aynı toplam gücü izotropik yani her yöne eşit yayan ideal bir antenin güç yoğunluğu arasındaki orandır (Balanis 2005; Pozar 1992). Yönlülük, denklem 3.15 ve 3.16 ile tanımlanabilir.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{ort}} \quad (3.15)$$

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{maks}}{P_{ışıma}} \quad (3.16)$$

Burada $U(\theta, \phi)$, θ ve ϕ yönündeki ışıma yoğunluğu, $U_{ort} = \frac{P_{ışıma}}{4\pi}$ olup izotropik yayım durumundaki ortalama ışıma yoğunluğu, U_{maks} maksimum ışıma yoğunluğu, $P_{ışıma}$ antenin toplam ışıma gücüdür.

Anten, enerjiyi dar bir açıya odakladıkça yönlülüğü artar ve bu da daha güçlü sinyal iletimi sağlar. Bu özellik, özellikle haberleşme ve radar uygulamalarında verimliliği artırmak için önemlidir.

3.2.9 Anten kazancı

Anten kazancı, bir antenin belirli bir yönde ne kadar verimli şekilde EM enerji yayabildiğini veya alım yapabildiğini ifade eder. Kazanç hem antenin yönlülüğünü hem de verimini dikkate alır.

Genellikle dBi ya da dBd ile ifade edilir. Burada dBi, izotropik bir antene göre olan kazancı belirtirken, dBd ise dipol antene göre kıyas yapar. Yüksek kazançlı bir anten, sinyali daha dar bir alana yoğunlaştırarak daha uzun mesafelere daha güçlü sinyal iletebilir. Ancak diğer yönlerdeki sinyal yayılımı azalacağından sistemin ihtiyaçlarına göre kazanç değeri değişmektedir.

Anten kazancı genellikle temel formül olan denklem 3.17 ile ifade edilir (Balanis, 2005; Pozar, 1992; Stutzman ve Thiele, 2012).

$$G = \eta \cdot D \quad (3.17)$$

Burada, G anten kazancı, η anten verimliliği 0 ile 1 arasında bir oran, D yönlülük, yani antenin belirli bir yönde sinyali yoğunlaştırma yeteneğidir. Kazanç genellikle dBi cinsinden ifade edilir ve denklem 3.18 ile hesaplanır.

$$G_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(G) \quad (3.18)$$

Anten kazancının yönlü ışıma şiddetine göre tanımı ise denklem 3.19 ile gösterilir.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{giriş}} \quad (3.19)$$

Burada $P_{giriş}$ antenin besleme noktasından aldığı toplam giriş gücü ve 4π steradyan cinsinden tam bir küresel katı açıdır.

3.2.10 Anten verimliliği

Anten verimliliği, bir antenin girişine uygulanan gücün ne kadarının etkili biçimde EM dalga olarak yayıldığını veya alımda kullanıldığını ifade eden önemli bir parametredir (Balanis, 2005; Pozar, 1992). Bu verimlilik, antenin yapısında meydana gelen iletken kayıplar, dielektrik kayıplar ve yansıma kayıpları gibi faktörler dikkate alınarak denklem 3.20 ile hesaplanır.

$$\eta_0 = \eta_r \times \eta_c \times \eta_d \quad (3.20)$$

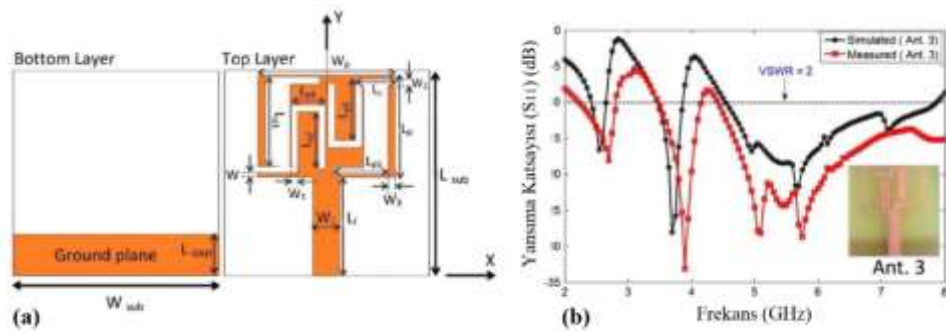
Burada η_r ışıma, η_c iletkenlik ve η_d dielektrik verimliliğidir.

3.3 Slotlu Çok Bantlı Mikroşerit Antenler Üzerine Literatürden Çalışmalar

Mikroşerit yama antenler; düşük profilli yapıları, üretim kolaylığı ve entegrasyon avantajları sayesinde çok bantlı uygulamalar için uygun adaylardır. Ancak, yarım kılavuz dalga boyuna göre tasarlandıklarında fiziksel boyutları büyüyebilir ve bu durum, küçük

cihazlar için sınırlayıcı olabilir. Ayrıca çoğunlukla dar bantta ve tek frekansta çalışma özelliğine sahiptirler. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla metamalzeme yapılar, tamamlayıcı slot halka rezonatörleri, kısa devre pimleri, fraktal geometriler, kusurlu torak düzlemi ve slotlu yama gibi yapısal değişiklikler önerilmiştir. Bu yöntemler hem anten boyutunu küçültmekte hem de ilave rezonanslar sağlayarak çok bantlı çalışmayı mümkün kılmaktadır (Ramanujam vd., 2020; Zaidi vd., 2002). Özellikle slot ekleme yaklaşımı, basitliği ve etkinliği sayesinde en sık tercih edilen yöntemlerden biri olmuştur. Bu kısımda, slot ekleme tekniğine dayalı olarak tasarlanmış çok bantlı mikroşerit yama antenlere ait bazı literatür çalışmaları özetlenmiştir.

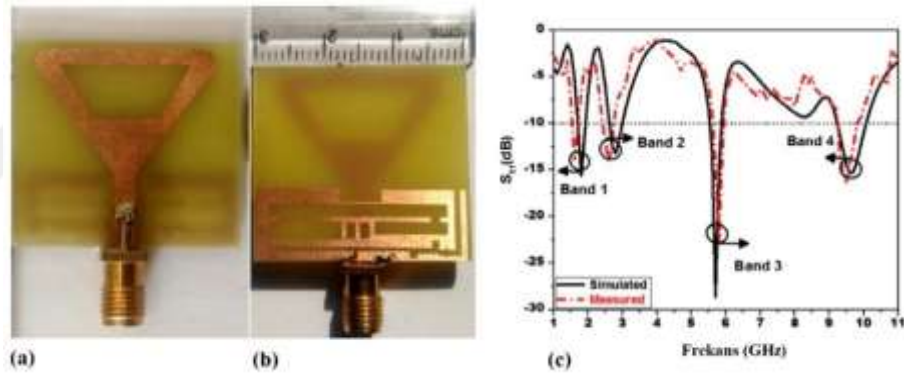
Bu bağlamda, Moosazadeh ve Kharkovsky tarafından (2014), WLAN ve WiMAX uygulamaları için mikroşerit beslemeli, kompakt ve üç bantlı bir düzlemsel monopoll anten önerilmiştir. Anten, simetrik L ve U şeklindeki slotlar içeren dikdörtgen bir ışıma yaması ve kısmi toprak düzleminden oluşturulmuştur. Anten, 2,25–2,85 GHz, 3,4–4,15 GHz ve 4,45–8,0 GHz bantlarında çalışabilmekte ve bu bantlar arasında istenmeyen frekansları bastırabilmektedir. Anten E-düzleminde tüm yönlü, H-düzleminde ise çift yönlü ışıma karakteristikleri sergilemekte olup kazanç değerleri düşük frekanslı banttan yüksek frekanslı banda doğru üç bant için sırasıyla 2,0–2,6 dBi, 2,6–3,2 dBi ve 2,5–3,8 dBi aralığında ölçülmüştür. Önerilen antenin konfigürasyonu ve ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumu Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 (a) Önerilen antenin konfigürasyonu ve (b) ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Moosazadeh ve Kharkovsky, 2014)

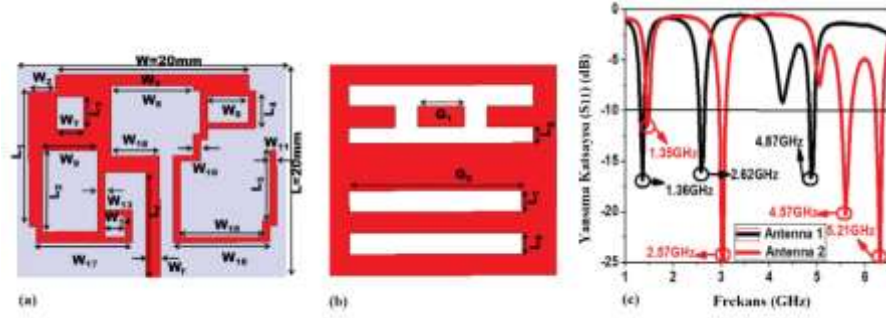
Ali ve arkadaşları, trapez biçimli bir slotlu yama ile kısmi toprak düzlemine yerleştirilen dikdörtgen slotlar kullanılarak tasarlanmış ve PIN diyotu ile frekans yeniden

yapılandırma yeteneği kazandırılmış dört bantlı bir mikroşerit anten sunmuşlardır. FR4 zemin üzerine basılan anten, kompakt yapısının yanı sıra slot tabanlı tasarımı sayesinde çok bantlı çalışma özelliği göstermektedir. Bu tasarımda, PIN diyotun konumuna bağlı olarak farklı frekanslarda çalışma sağlanmaktadır. Diyot kapalı konumdayken anten; Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (GNSS, 1,6 GHz), WiMAX (2,5 GHz), WLAN (5,8 GHz) ve X-band (9,8 GHz) uygulamalarına yönelik dört bantta çalışmakta, açık konumda ise WLAN ve X-band için çift bantlı bir yapı sergilemektedir. Ayrıca PIN diyot kapalıyken, antenin 1,6 GHz 2,5 GHz, 5,8 GHz ve 9,5 GHz bantlarında sırasıyla yaklaşık 2,9 dBi, 2,4 dBi, 3,1 dBi ve 1,8 dBi kazanç elde ettiği raporlanmıştır. Şekil 3.9(a)'da üretilen anten prototipinin konfigürasyonu, Şekil 3.9(b)'de ise diyot kapalı konumdayken ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları verilmiştir.



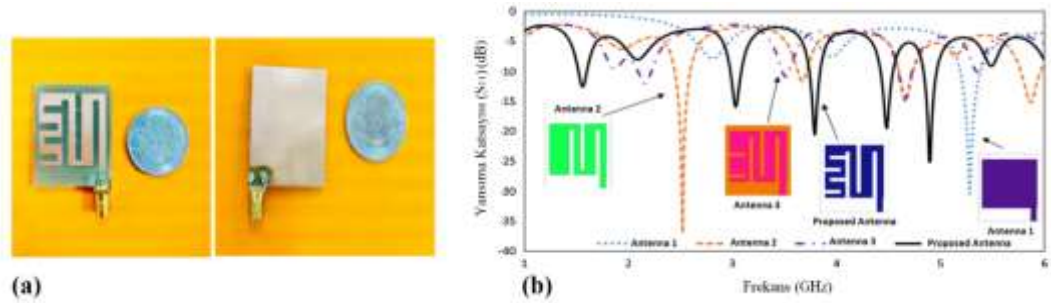
Şekil 3.9 Üretilen anten prototipinin (a) ön, (b) arka yüzeyin konfigürasyonu ve (c) diyot kapalı konumdayken ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Ali vd., 2018)

Khan ve çalışma arkadaşları (2019), GNSS, WiMAX, C bandı ve WLAN uygulamaları için uygun olan 1,35 GHz, 2,57 GHz, 4,57 GHz ve 5,13 GHz frekanslarında çalışabilen, kompakt boyutlara sahip ($20 \times 20 \times 1,6 \text{ mm}^3$) düzlemsel bir anten tasarlamışlardır. Şekil 3.10'da önerilen anten tasarımı ile birlikte ölçüm ve simülasyonlara ait S_{11} spektrumları sunulmuştur. Bu antenin yamasında dikdörtgen şekilde slotlar, toprak düzleminde ise bir adet ardışık H şeklinde, iki adet dikdörtgen şeklinde slot bulunmaktadır. Bu slotlar toplam akım yolunu farklı şekillerde artırarak antenin çok bantlı çalışmasını sağlamıştır.



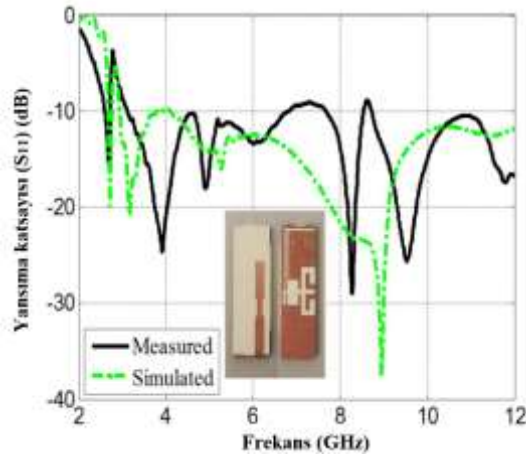
Şekil 3.10 Önerilen antenin (a) ön, (b) arka yüzeyin konfigürasyonu ve (c) ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Khan vd., 2019)

Başka bir çalışmada, çoklu frekans bantlarında çalışabilen ve ofset beslemeye sahip kompakt bir slot anten tasarlanmıştır (Patel vd., 2021). Antenin yapısı, üst bölümünde dikey ve yatay olarak birleşmiş slotlardan oluşurken, alt bölümünde tam bir toprak düzlemi bulunmaktadır. Üretilen anten prototipi ve anten tasarım sürecine ait S_{11} spektrumlarının karşılaştırması Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Geliştirilen anten, beş ayrı frekans bandında rezonans göstermektedir. Bu bantlar sırasıyla 1,52–1,60 GHz, 2,97–3,02 GHz, 3,73–3,84 GHz, 4,42–4,52 GHz ve 4,83–4,96 GHz olup Hindistan’da GPS, Radyo Frekansı Tanımlama (RFID), mobil iletişim, üretim, ulaşım, sağlık, amatör ve sabit mobil uygulamaların yanı sıra kısa menzilli veri iletimi ve havacılıkla ilişkili hizmetlerde kullanılmaktadır. Antenin kazancı 1,07 ve 3,92 dBi arasında değişmekte olup, bazı frekans bantlarında tüm yönlü diğerlerinde çift yönlü ışıma özellikleri göstermektedir. Bu nitelikleri sayesinde anten, GPS, radyo frekansı tanımlama, radyo iletişimi gibi çeşitli kablosuz haberleşme alanlarında kullanıma uygundur.



Şekil 3.11 (a) Üretilen anten prototipi ve (b) anten tasarım sürecine ait S_{11} spektrumları (Patel vd., 2021)

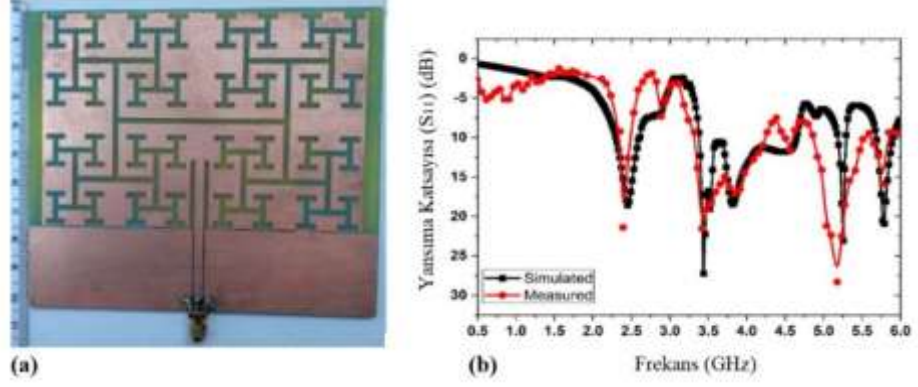
Hammache ve arkadaşları (2025), Uzun Süreli Erişim (LTE) 2,6 GHz bandını da kapsayan, son derece kompakt bir ultra geniş bantlı slot anten tasarlamışlardır. Anten, $24 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 1,524 \text{ mm}$ boyutlarında küçük bir yapıya sahiptir. Arka yüzeyine, farklı temel slotların birleşimiyle oluşturulan kademeli bir slot entegre edilmiştir; bu sayede geniş bantlı çalışma sağlanmaktadır. Ayrıca, 2,58–2,73 GHz LTE bandı için *F* şeklinde bir slot açılmıştır. Ölçüm ve simülasyon S_{11} spektrumları Şekil 3.12’de verilmiştir. Buna göre deneysel sonuçlar, antenin 3,1–12,0 GHz aralığında ultra geniş bant ve 2,58–2,73 GHz’de LTE bandında iki rezonans gösterdiğini ortaya koymuştur. Her iki bantta da S_{11} büyüklükleri, -10 dB ’nin altında kalarak yeterli empedans uyumu sağlanmıştır. Ayrıca, kazanç ultra geniş bant boyunca sabit seyrederek alt frekanslarda yaklaşık $-0,8 \text{ dBi}$ ’den, üst frekanslarda $4,8 \text{ dBi}$ seviyesine kadar çıkmıştır. Antenin ışıma karakteristiği yatay düzlemde yönsüz, düşey düzlemde ise çift yönlüdür.



Şekil 3.12 Üretilen anten prototip ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları (Hammache vd., 2025)

G. Singh ve arkadaşları tarafından (2025), WLAN/WiMAX ve 6 GHz altı 5G uygulamaları için H şekilli fraktal slotlu ve kısa devre metal şeritli dört bantlı eş düzlemsel beslemeli bir mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. $103 \times 120 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki bu antenin kazancını artırmak amacıyla kısa devre metal şerit eklenmiştir. Üretilen prototip anten Şekil 3.13(a)’da bu antenin S_{11} spektrumu ise Şekil 3.13(b)’de yer almaktadır. Antenin genel olarak S_{11} büyüklükleri, -16 dB ile -26 dB arasında olup, 2,4 GHz, 3,4 GHz, 5,2 GHz ve 5,7 GHz frekanslarında rezonans göstermekte olup S-bandı

ile C-bandı frekanslarında, özellikle n41, n46 ve n78 5G bantları civarında çok bantlı çalışma performansı elde edilmiştir.



Şekil 3.13 (a) Üretilen anten prototipi ve (b) anten tasarım sürecine ait S_{11} spektrumları (Singh vd., 2025)

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1 Anten Tasarımlarında Kullanılan Tam Dalga Elektromanyetik Simülasyon Programları

Bu tez çalışmasında üç farklı türde mikroşerit anten tasarlanmıştır. Antenlerin tasarımında CST Studio Suite tam-dalga EM simülasyon programı kullanılmıştır. CST Studio Suite, EM sistemlerin ve bileşenlerin tasarım, analiz ve optimizasyon süreçlerinde kullanılan gelişmiş bir 3B simülasyon paketidir. Bu paketin bir parçası olan EM sistem modelleme modülü, özellikle yüksek frekanslı bileşenlerin 3B EM analizleri için tasarlanmıştır. CST Studio Suite'in zaman alanı çözücüsü sonlu integrasyon tekniğini kullanırken frekans alanı çözücüsü ise sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Yazılım, antenler, filtreler ve yönlü kuplörler gibi RF bileşenlerinin performansını hızlı ve doğru şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. CST Studio Suite, ayrıca özgül soğurma oranı (SAR) ve radar kesit alanı gibi parametrelerin hesaplanmasına da imkân sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde anten, sensör ve mikrodalga bileşenler gibi tasarımlar hem mikrodalga hem de radyo frekansı bandında analiz edilebilmektedir.

Bu tez kapsamında, üç farklı mikroşerit anten tasarımı için tam dalga EM simülasyonlar ağırlıklı olarak CST Studio Suite programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve anten yapısı üzerinde kapsamlı parametrik analizler yapılmıştır. Slotların konumu ve boyutları sistematik olarak değiştirilerek, rezonans frekansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tasarımın istenen bantlarda çalışabilmesi amacıyla empedans uyumu, S_{11} büyüklükleri ve elektrik alan ve akım dağılımı gibi temel performans ölçütleri dikkate alınarak tasarım parametreleri optimize edilmiştir.

4.2 Mikroşerit Anten Üretim ve Anten Özelliklerinin Ölçüm Yöntemleri

Tasarlanan üç farklı mikroşerit antenlerin üretimi, geleneksel fotolitografi ve aşındırma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Antenlerin giriş portlarına 50 Ω 'luk küçük boyutlu A tipi (SMA) konnektörler lehimlenerek S_{11} spektrumları ölçülmüştür.

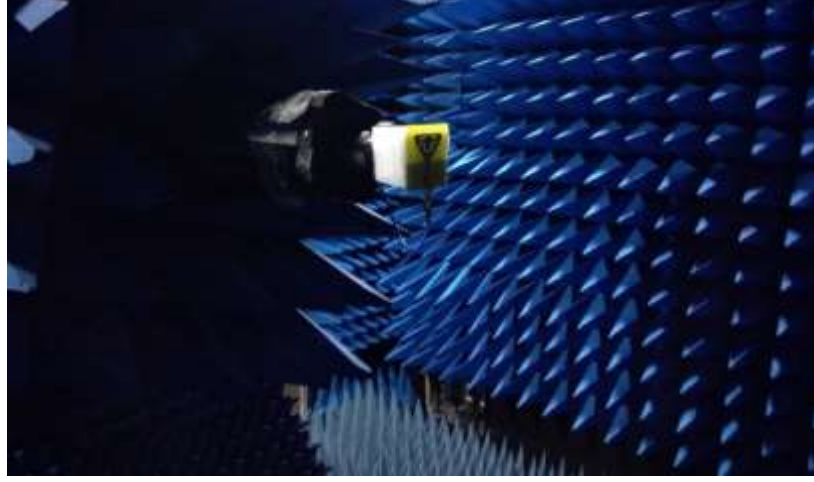
Mikroşerit monopol antenin DDO ile uzak alan ışıma örüntüleri, kazanç ve ışıma verimliliği ölçümleri, 1–6 GHz frekans aralığında, Anritsu Master MS2037C vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak TÜBİTAK Anten Test ve Araştırma Merkezi'nde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Anten prototipinin ışıma örüntüsü ve kazanç ölçümleri, belirlenen dört rezonans frekansında, $7,5 \times 4,7 \times 3,3$ m boyutlarındaki yankısız odada gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm ortamı, antenin etrafındaki yansımaları minimuma indirerek yalnızca antenin kendi ışıma özelliklerinin ölçülmesini sağlar; duvarlardaki emici malzemeler elektromanyetik dalgaları soğurarak yansıma etkilerini engeller. Şekil 4.1'de gösterilen TÜBİTAK Anten Test ve Araştırma Merkezi'ndeki yankısız odada, karşılaştırma (referans anten) yöntemiyle ölçümler yapılmıştır. Bu yöntemde, kazancı bilinen standart bir referans anten ile test anteni sırayla aynı konumda yerleştirilir ve her iki anten için alınan güç değerleri karşılaştırılır; bu sayede test anteninin kazancı güvenilir bir şekilde hesaplanabilir (4.1).

Ölçümler sırasında anten, 3 boyutlu ışıma örüntüsünü elde etmek amacıyla gerekli rotasyonlarla konumlandırılmıştır ve referans anten kullanımı, ölçüm belirsizliklerini minimize ederek gerçek dünya performansını ortaya koyar.

$$G_{test} = G_{ref} + (S_{21,test} - S_{21,ref}) \quad (4.1)$$

Burada, G_{test} , test edilen antenin kazancı (dBi), G_{ref} , referans anten kazancı (dBi), $S_{21,test}$, test edilen antenin aldığı sinyale karşılık gelen dB cinsinden S_{21} parametresi, $S_{21,ref}$, gönderici anten ile referans anten arasındaki dB cinsinden S_{21} parametresidir.



Şekil 4.1 TÜBİTAK Anten Test ve Araştırma Merkezinde anten ışıma örüntüsü ve kazanç ölçümü

Tezin ikinci ve üçüncü aşamalarında tasarlanıp üretilen koaksiyel beslemeli ve açıklık bağlaşımlı slotlu yama antenlerine ait S_{11} spektrumları ölçümünde ise laboratuvarımızda bulunan vektör ağ analizörü kullanılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında üç farklı mikroşerit anten tasarlanmış ve deneysel analizleri gerçekleştirilmiştir. Her çalışmada, antenin üzerindeki rezonans frekansı sayısını artırmak, S_{11} değerini ve bant genişliğini iyileştirmek ve antenin elektriksel boyutunu küçültmek amacıyla slot tekniği kullanılmıştır. İlk olarak 6 GHz altı kablosuz uygulamalara yönelik dört bantlı, düşük profilli slotlu bir düzlemsel monopol anten tasarlanmıştır. Anten, yama üzerindeki çift kademeli ters slotlar ve kısmi toprak düzlemine eklenen yatay-dikey slotlarla çok bantlı çalışma yeteneği kazanmıştır. Parametrik analizlerle her slotun rezonansa katkısı incelenmiş ve uygun boyutlar belirlenmiştir. Nihai tasarım, 1,87 GHz, 2,42 GHz, 3,27 GHz ve 5,44 GHz frekanslarında çalışarak GSM, WLAN ve WiMAX bantlarını kapsamaktadır. Boyutları $50 \times 50 \times 1,6$ mm³ olup, 1,87 GHz için yaklaşık $0,31\lambda_0 \times 0,31\lambda_0 \times 0,007\lambda_0$ elektriksel boyutlarına karşılık gelmektedir. Anten alttaşı olarak düşük maliyetli bir alttaş olan FR-4 kullanılmıştır. Anten üretilerek ilk olarak S-parametresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Antenin ışıma örüntüsü ölçümlerinde 2,0–2,9 dBi arası değişen kazanç ve %84'e kadar ulaşan ışıma verimliliği elde edilmiştir. Tüm bantlarda $S_{11} < -10$ dB sağlanmıştır.

İkinci çalışmada, çok bantlı ve slotlu bir mikroşerit yama anten tasarlanmış, koaksiyel besleme yapısı kullanılarak nümerik analizler ile optimize edilmiştir. Anten, $37 \times 32 \times 1,524$ mm³ boyutlarında olup, alttaş malzemesi olarak $\epsilon_r = 3,45$ ve $\tan\delta = 0,0031$ olan Isola I-Tera MT40 tercih edilmiştir. Yama düzlemine L biçimli, toprak düzlemine ise dikdörtgen halka formunda slotlar eklenmiştir. Optimizasyon sonrası antenin 2–12 GHz aralığında –15 dB'den daha iyi S_{11} büyüklükleri sağladığı ve özellikle S, C ve X bantları için uygun olduğu görülmüştür. Elde edilen 3 boyutlu maksimum kazanç değerlerinin 2.69–5.45 dBi aralığında değişmektedir. Antenin ortalama toplam verimliliği ise %90,42 olarak elde edilmiştir. Geleneksel baskı devre yöntemi ile üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumları uyumlu olarak elde edilmiştir.

Tez çalışmasının son aşamasında, çok bantlı açıklık bağlaşımlı beslemeli bir slotlu mikroşerit yama anten tasarlanmış ve nümerik analizler ile optimize edilmiştir. Anten çok

katmanlı bir yapıya sahiptir. En üstte iletken yama yer almakta ve bu yama 0,5 mm kalınlığındaki $\epsilon_{r1} = 2,2$ olan PTFE (Teflon) alttaş üzerine yerleştirilmiştir. Teflon alttaş ile toprak düzlemi arasına, her iki alttaş arasına monte edilen plastik vidalar yardımıyla 2,5 mm kalınlığında bir hava boşluğu oluşturulmuştur. Hava boşluğunun altında bulunan toprak düzleminin hemen altında ise 1,524 mm kalınlığında $\epsilon_{r2} = 3,45$ ve $\tan\delta = 0,0031$ olan Isola I-Tera MT40 alttaş yer almaktadır. Bu alttaş üzerinde mikroşerit besleme hattı konumlandırılmıştır. Tüm katmanlar dikkate alındığında antenin toplam boyutları $40 \times 36 \times 4,52 \text{ mm}^3$ olarak belirlenmiştir. Yama üzerinde, iki adet ters L şeklinde slot ile bir adet T şeklinde slot eklenerek dört bantlı bir yapı elde edilmiştir. Yama $22 \times 17 \text{ mm}$ boyutlarında olup, iki adet ters L şeklinde slot ile bir adet T şeklinde slot eklenerek parametrik taramalar gerçekleştirilerek yapı optimize edilmiş ve dört bantlı bir yapı elde edilmiştir. Anten üretilmiş ve S-parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre anten, C ve X bant uygulamalarına karşılık gelen Nihai anten, C ve X bant uygulamalarına karşılık gelen 5,50 GHz, 6,06 GHz, 6,62 GHz ve 8,55 GHz merkez frekanslarında çalışmakta olup, simüle edilen S_{11} spektrumu ile oldukça iyi bir uyum göstermektedir. Simülasyon sonucunda elde edilen maksimum kazanç değerleri 6,90 ile 8,21 dBi arasında değişirken, antenin toplam verimliliği %87,6 ile %95,2 arasında hesaplanmıştır.

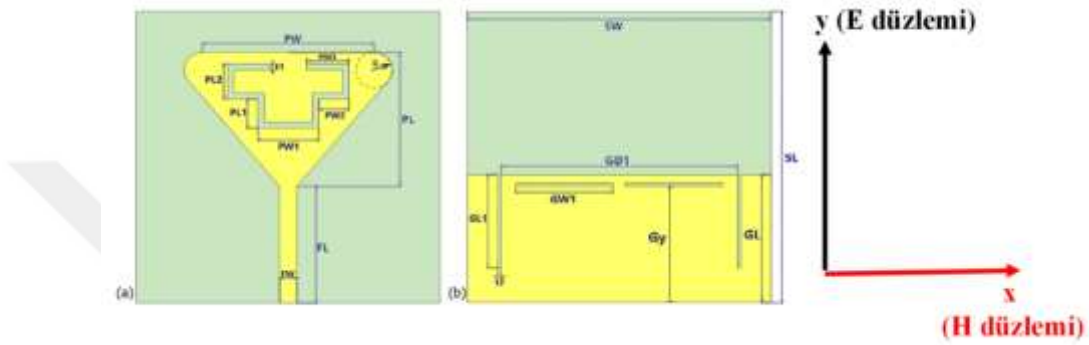
5.1 Çok Bantlı Slotlu Düzlemsel Mikroşerit Monopol Antenin Sayısal ve Deneysel Analizi

5.1.1 Düzlemsel monopol mikroşerit anten tasarımı ve simülasyon sonuçları

Tezin ilk çalışmasında, çok bantlı çalışma yeteneğine sahip, mikroşerit hat ile beslenen ve kısmi ve kusurlu toprak düzlemi içeren slotlu üçgen şeklinde bir mikroşerit monopol anten tasarlanmıştır. Antenin ışıyan yapısı, FR-4 alttaş üzerine yerleştirilmiş, istenmeyen ışıma ve saçılmaları azaltmak amacıyla ters üçgen şeklinde ve köşe bölgeleri yuvarlatılmış bir yamadan oluşmaktadır.

Optimize edilmiş nihai yapı olan, kısmi ve kusurlu toprak yapısına sahip çok bantlı slotlu mikroşerit monopol antenin şematik görünümü Şekil 5.1’de sunulmaktadır. Kullanılan

FR-4 alttaşın bağıl dielektrik sabitinin gerçel kısmı $\epsilon_r = 4,2$, kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,02$ ve kalınlığı 1,6 mm'dir. Önerilen çok bantlı antenin toplam boyutları $50,0 \times 50,0 \times 1,6$ mm³'tür. Parametrik tarama yöntemiyle yapılan analizler sonucunda yamanın eni (PW) ve boyu (PL) $28,25 \times 23,0$ mm², toprak düzleminin uzunluğu (GL) ise 22 mm olarak optimize edilmiştir. Şekil 5.1'de sunulan antenin tüm optimize edilmiş geometrik boyutları Çizelge 5.1'de ayrıntılı olarak verilmektedir.



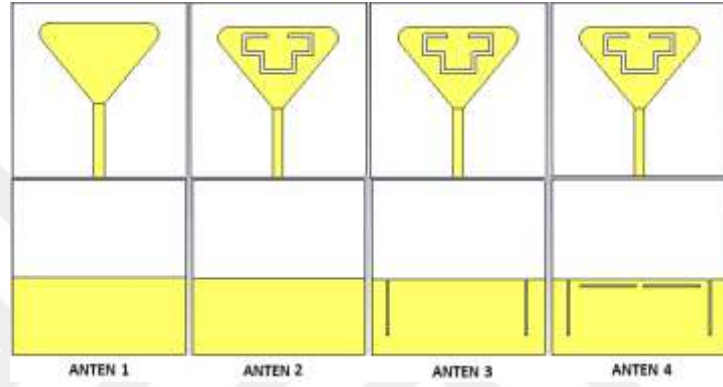
Şekil 5.1 Nihai mikroşerit monopol anten tasarımının (a) ön ve (b) arka yüzeylerinin şematik görüntüleri

Çizelge 5.1 Nihai antenin optimize edilmiş geometrik boyutları

Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
SW	50	$PW2$	5
SL	50	$PL1$	5
PW	28,25	$PL2$	6
PL	23	$PW3$	7
FW	2,9	$t2$	0,5
FL	20	$GD1$	39
R	3	$GL1$	16
$t1$	1	Gy	20
$PW1$	10	$GW1$	16

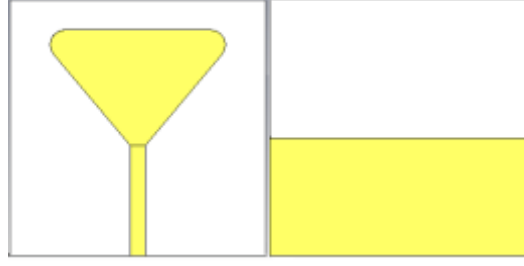
Önerilen antenin tasarım süreci, Şekil 5.2'de gösterildiği üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, FR-4 alttaş üzerine yerleştirilmiş ve kısmi toprak düzlem yapısına sahip basit bir üçgen monopol anten tasarlanmış olup bu yapı Anten 1 olarak adlandırılmıştır. İkinci aşamada (Anten 2), yamaya simetrik şekilde ters çift basamaklı slotlar eklenerek akım yolu uzatılmıştır. Bu değişiklik antenin elektriksel boyutunu daha da küçültmüştür ve bu konfigürasyonla rezonans sayısı üçe çıkartılmıştır.

Son aşamada, istenen rezonans frekanslarını elde etmek ve mevcut bantlardaki S_{11} performansını iyileştirmek amacıyla kısmi toprak düzlem yapısına optimize edilmiş dikey ve yatay slotlar eklenmiştir. Bu adımlar sonucunda Şekil 5.2’de gösterildiği gibi Anten 3 ve Anten 4 tasarımları oluşturulmuş ve kablosuz uygulamalar için gerekli anten performansı gereksinimlerine ulaşılmıştır. Tüm tasarım aşamalarının simülasyon ve optimizasyon süreçleri, CST Studio Suite yazılımı kullanılarak açık sınır koşulları altında yürütülmüştür.



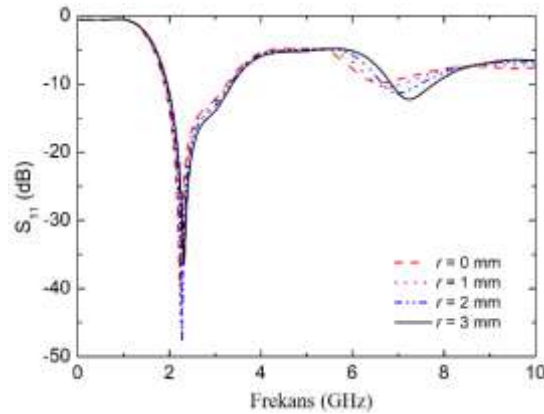
Şekil 5.2 Önerilen anten yapısının tasarım süreci

Tasarım, modifiye edilmiş üçgen yama ve kısmi toprak düzlemine sahip Şekil 5.3’de gösterilen Anten 1 ile başlamaktadır. Yamanın geometrisinin üçgen şeklinde olması nedeniyle, klasik dörtgen yama antenler için kullanılan yama boyutu hesaplama formülleri burada geçerli değildir. Dörtgen yamalarda, kenarlar paralel ve simetrik olduğu için sınır koşulları (elektrik/manyetik duvarlar) ve rezonans boyutları formüllerle doğrudan belirlenebilir. Ancak asimetrik üçgen yamada; köşeler, kenar uzunlukları ve açılarının eşit olmaması nedeniyle, EM alan dağılımı klasik formüllerden sapmakta ve basit teorik hesaplamalar doğru sonuç vermemektedir. Bu sebeple, tasarımın rezonans frekansını hedeflenen 2 GHz civarlarına getirebilmek için parametrik tarama yöntemi kullanılmıştır. Parametrik tarama sonucunda, yamanın taban uzunluğu (PW) ve yüksekliği (PL), sırasıyla 28,25 mm ve 23,00 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3 Anten 1 konfigürasyonu gösterimi

Yamanın üst köşeleri, Şekil 5.1’de ‘R’ harfi ile gösterildiği gibi, 1,0 mm ile 3,0 mm arasında değişen yarıçaplarla yuvarlatılmıştır. Bu değişikliğin S_{11} büyüklükleri üzerindeki etkileri Şekil 5.4’de sunulmuştur. Anten 1 yapısının S_{11} spektrumu incelendiğinde, yaklaşık 2 GHz ve 7 GHz civarında iki rezonans gösterdiği görülmektedir. Köşe yarıçapları $R = 0, 1, 2$ ve 3 mm için elde edilen empedans BG değerleri sırasıyla 1,363 GHz, 1,378 GHz, 1,399 GHz ve 1,418 GHz olarak bulunmuş ve R arttıkça düzenli bir iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca, daha yüksek frekans bandındaki ($\sim 7,2$ GHz) empedans uyumu, $R = 3$ mm için belirgin şekilde iyileşmiştir. Köşe yarıçapı büyüdükçe her iki rezonans frekansı da artış göstermekte olup, bu etki özellikle yüksek frekans bandında daha belirgindir. $R = 3$ mm değerine sahip Anten 1 yapısının rezonansları 2,31 GHz ve 7,24 GHz’de olup; ilgili S_{11} büyüklükleri sırasıyla $-36,42$ dB ve $-12,23$ dB ve -10 dB göreli BG değerleri ise %26,57 ve %12,85 olarak belirlenmiştir.



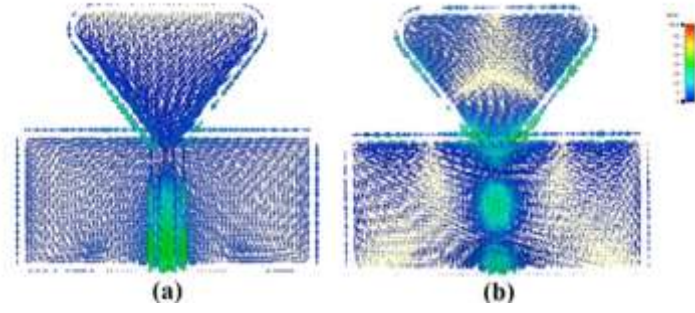
Şekil 5.4 Anten 1’in R değişkenine bağlı olarak S_{11} spektrumu

Anten 1 konfigürasyonu için 2,18 GHz ve 7,05 GHz frekanslarındaki yüzey akım dağılımları sırasıyla Şekil 5(a) ve (b)’de gösterilmektedir. Düzlemsel monopollenlerde

temel rezonans frekansı genellikle besleme hattı uzunluğunun çeyrek dalga boyuna karşılık gelmesiyle yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Ancak bu çalışmada önerilen anten geometrisinde yüzey akım dağılımı Şekil 5(a)'da incelendiğinde, baskın rezonansın besleme hattı boyunca olduğu görülmekle birlikte, üçgen yamanın alt kenarlarında da düşük genlikli ancak süreklilik gösteren yüzey akımlarının mevcut olduğu gözlemlenmiştir.

Bu kapsamda, anten yapısında elektromanyetik alanların önemli bir kısmı hava ortamına yayıldığından, rezonans frekansı hesabında altlığın dielektrik sabiti ($\epsilon_r = 4.2$) yerine hava–dielektrik karışımını temsil eden etkin dielektrik sabiti kullanılmıştır. Buna göre etkin dielektrik sabiti (ϵ_{etkin}), (5.1) yardımıyla hesaplanarak 2,6 olarak alınmış ve FL değerleri değiştirilerek besleme hattı uzunluğu FL=20 mm seçilmiş, teorik hesaplamalarla (5.2) antenin temel rezonans frekansı yaklaşık 2,32 GHz olarak elde edilmiştir. Ancak simülasyon ortamında antenin temel rezonans frekansının 2,18 GHz'de olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın temel nedeni, besleme hattı boyunca oluşan baskın rezonansa ek olarak, üçgen yamanın alt kenarlarında meydana gelen parazitik yüzey akımlarının akım yolunu uzatarak antenin etkin elektriksel uzunluğunu artırmasıdır. Bu durum, yalnızca besleme hattı uzunluğu dikkate alınarak hesaplanan teorik rezonans frekansına kıyasla, simülasyon sonucu elde edilen rezonans frekansının daha düşük bir değerde oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca kısmi toprak düzleminin varlığı, saçaklanma alanlarını artırarak etkin dielektrik sabitinin değişmesine ve rezonans frekansının aşağı yönlü kaymasına katkı sağlamaktadır.

Şekil 5(b)'de gösterilen 7,05 GHz frekansında ise yüzey akımı daha çok yama üzerindeki kenarlarda ve mikroşerit hat üzerinde yoğunlaşmakta olup, bu dağılım daha yüksek mertebeden bir rezonans modunun uyarıldığını göstermektedir.



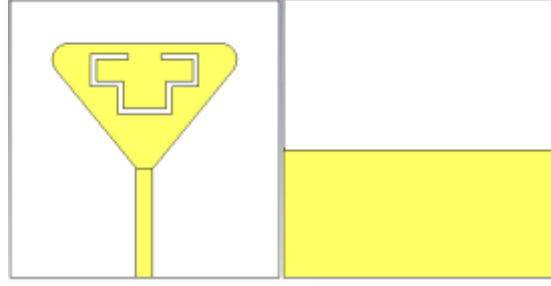
Şekil 5.5 Anten 1 konfigürasyonunda (a) 2,18 GHz ve (b) 7,05 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları

$$\epsilon_{etkin} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (5.1)$$

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4 \times \sqrt{\epsilon_{etkin} \times FL}} \quad (5.2)$$

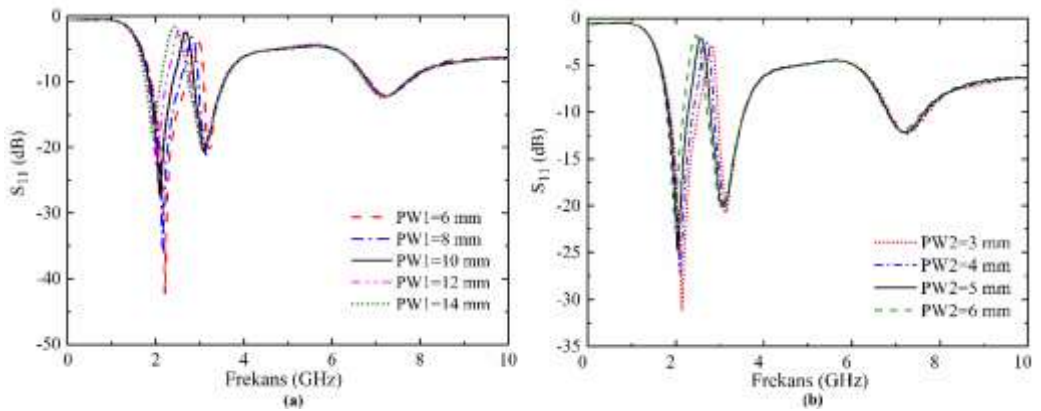
Tasarım sürecinin ikinci aşaması olan Anten 2 yapısında, ön yama üzerine ayna simetrisine sahip ters çift basamaklı bir slot eklenmiştir. Anten 2 konfigürasyonu Şekil 5.6'da sunulmaktadır. Yama üzerine kıvrımlı basamaklı slot yapısının eklenmesinin temel amacı, antenin yüzey akım yolunu uzatarak elektriksel boyutunu büyütmek ve bu sayede daha düşük frekanslarda ek rezonansların elde edilmesini sağlamaktır. Basamaklı ve kıvrımlı geometrik yapı, doğrusal slotlara kıyasla sınırlı bir fiziksel alan içerisinde daha uzun bir akım yolu oluşturarak rezonans frekanslarının aşağı yönde kaymasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu tür slot konfigürasyonu yama üzerindeki akım dağılımını kontrollü biçimde yeniden şekillendirerek çok bantlı çalışma davranışını desteklemekte ve empedans uyumunun iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Antenin empedans uyumunu iyileştirmek ve toplam BG'yi artırmak amacıyla, slotun geometrik parametrelerinin S_{11} spektrumuna olan etkileri simülasyon ortamında incelenmiştir. Öncelikle, en alt yatay slotun genişliği ($PW1$) üzerinde parametrik tarama yapılmış, ardından $PW1$ 'in hemen üstünde yer alan orta yatay slot genişliği ($PW2$) için de benzer bir tarama gerçekleştirilmiştir. Slot genişliği ($t1$) ise analizler sonucunda 1,0 mm olarak optimize edilmiştir.



Şekil 5.6 Anten 2 konfigürasyonu

Yama üzerine ters çift basamaklı ve ayna simetrisine sahip slotun eklenmesiyle, toplam slot çevresine bağlı olarak yeni bir rezonansın oluştuğu gözlemlenmiştir. Eklenen slot, akım yolunu uzatarak yamanın efektif elektriksel uzunluğunu değiştirmiş ve ek bir rezonansın ortaya çıkmasını sağlamıştır. Eklenen slotların frekans üzerindeki etkisini analiz etmek için, öncelikle $PW1$ ve $PW2$ slot uzunluklarının S_{11} büyüklüklerine olan etkileri sırasıyla Şekil 5.7(a) ve (b)'de gösterilmiştir. $PW1$ ve $PW2$ değerleri sırasıyla 6,0–14,0 mm ve 3,0–6,0 mm aralığında değiştirilmiştir. Bu analizde $PW3$, $PL1$ ve $PL2$ değerleri sabit tutularak sırasıyla 3,0, 5,0 mm ve 6,0 mm olarak seçilmiştir. Genişliklerin artırılması, birinci rezonans bandını daha düşük frekanslara kaydırmakta ve S_{11} büyüklükleri ile BG değerleri azaltmaktadır. Buna karşın, ikinci bantta BG artarken, üçüncü bantta belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu doğrultuda, antenin BG, S_{11} büyüklüğü ve kazancı dikkate alınarak yapılan parametrik analizler sonucunda, birinci ve ikinci bantlar için $PW1$ ve $PW2$ uzunlukları sırasıyla 10,0 mm ve 5,0 mm olarak belirlenmiştir.

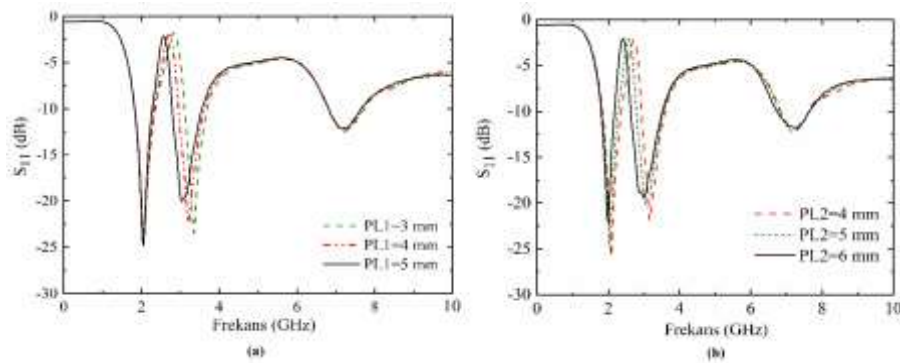


Şekil 5.7 Slot uzunluklarının S_{11} spektrumuna etkisi: (a) $PW1$, (b) $PW2$

Anten 2 yapısında gerçekleştirilen bir diğer parametrik analiz, $PL1$ ve $PL2$ olarak adlandırılan dikey slotlar üzerinde yapılmıştır. Öncelikle birinci dikey slotun ($PL1$) uzunluğu 3,0 mm ile 5,0 mm arasında değiştirilmiş, ardından ikinci üst dikey slot ($PL2$) yüksekliği 4,0 mm ile 6,0 mm aralığında taranmıştır. Bu slotların S_{11} değerleri üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 5.8(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Analizler sonucunda, her iki dikey slotun da üçüncü rezonans bandı üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Şekil 5.8(a)'da görüldüğü üzere, $PL1$ 'in birinci rezonans üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak $PL1$ 'in artırılması, ikinci rezonansın daha düşük frekanslara kaymasına ve ilgili S_{11} büyüklüklerinin azalmasına yol açmaktadır. Şekil 5.8(b) incelendiğinde, $PL2$ 'nin artırılması benzer şekilde hem birinci hem de ikinci rezonansların daha düşük frekanslara kaymasına ve S_{11} büyüklüklerinin (genliklerinin) azalmasına neden olmaktadır. Her ne kadar S_{11} genliklerinde azalma olsa da değerler -20 dB'nin üzerinde veya ona eşit kalmaktadır.

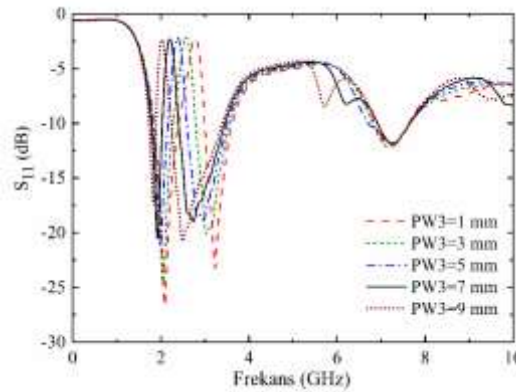
$PL1 = 3,0$ mm ve $PL2 = 4,0$ mm değerleri daha iyi S_{11} büyüklüklerini sağlarken, $PL1$ 'in 5,0 mm'ye ve $PL2$ 'nin 6,0 mm'ye çıkarılması ikinci rezonans bandında daha geniş bir BG elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, $PL2$ 'nin 6,0 mm olması durumunda birinci rezonans hafifçe daha düşük frekansa kayarak, genellikle 2G (GSM) mobil iletişim sistemleri için ayrılmış olan 1,8–1,9 GHz frekans bandı ile daha uyumlu hale gelmektedir. Bu analizler sonucunda, $PL1$ ve $PL2$ boyutları sırasıyla 5,0 mm ve 6,0 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 5.8 Slot uzunluklarının S_{11} spektrumuna etkisi: (a) $PL1$ ve (b) $PL2$

Anten 2 yapısı için son parametrik analiz, üst yatay slot uzunluğu ($PW3$) parametresi üzerine yapılmıştır. $PW3$ parametresinin S_{11} büyüklüklerine olan etkileri Şekil 5.9’da gösterilmektedir. Bu analizde, $PW3$ değeri 1,0 mm ile 9,0 mm arasında değiştirilmiştir. Şekil 5.9’da görüldüğü üzere, $PW3$ arttıkça birinci ve ikinci rezonans bantları daha düşük frekanslara kaymakta ve buna karşılık gelen S_{11} büyüklükleri azalmaktadır. Ancak üçüncü bant, $PW3$ ’teki değişimlerden etkilenmemektedir.

$PW3 = 1,0$ mm olduğunda birinci ve ikinci bantlar daha iyi empedans uyumu sağlarken, ikinci bandın BG azalmaktadır; buna karşın, $PW3 = 9,0$ mm iken ikinci bandın BG artmakla birlikte, birinci bandın S_{11} büyüklükleri -20 dB’nin altına düşmekte ve BG belirgin şekilde azalmaktadır. Birinci ve ikinci rezonans bantları için S_{11} büyüklükleri ile BG arasındaki optimum dengeyi sağlamak amacıyla $PW3$ değeri 7,0 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 5.9 Slot uzunluğunun ($PW3$) S_{11} spektrumuna etkisi

Yama üzerinde bulunan tüm slotlar üzerinde gerçekleştirilen parametrik taramalar sonucunda, optimize edilmiş Anten 2’nin rezonans frekansları ile bu frekanslara karşılık gelen simüle edilen S_{11} büyüklük ve % cinsinden göreceli BG değerleri Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

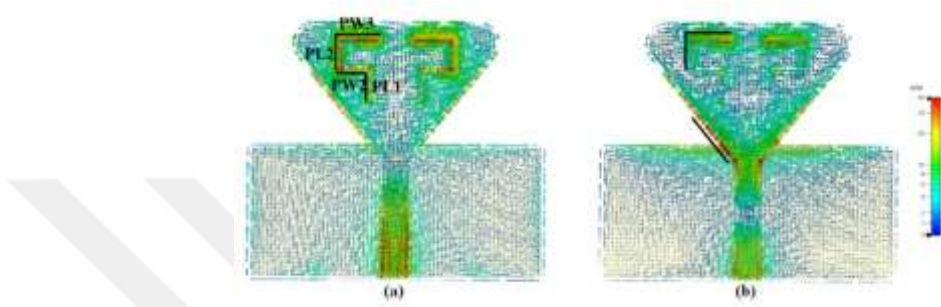
Çizelge 5.2 Anten 2'nin simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden göreceli BG değerleri

Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	BG (%)
1,92	-20,56	13,0
2,74	-18,99	38,3
7,22	-11,84	10,1

Optimize edilmiş Anten 2 konfigürasyonu için 1,92 GHz ve 2,74 GHz frekanslarındaki yüzey akım dağılımları sırasıyla Şekil 10(a) ve (b)'de gösterilmektedir. 1.92 GHz rezonansa ait yüzey akım dağılımı incelendiğinde, basamaklı slotun her iki kolunda da bu frekans için yüzey akımının sürekli ve yüksek yoğunluklu olduğu görülmektedir. Her ne kadar slot geometrisi iki uçlu olup her iki ucunda da maksimum akım bölgeleri bulunsa da, basamaklı yapının alt yatay slot (PW1) kısmının orta noktasında belirgin bir akım düğümü gözlenmiştir. PW3 slotunun ucunda yerleşmiş bir maksimum akım noktası ile bir düğüm noktası arasında kalan etkin bir akım yolu ortaya çıkmaktadır. Elektromanyetik rezonans teorisine göre maksimum akım-düğüm arası mesafe çeyrek dalga boyuna karşılık gelmektedir. Bu nedenle basamaklı slotun ilgili kolu, bu rezonans için çeyrek dalga boylu bir rezonatör gibi davranmaktadır. Bu bağlamda, basamaklı slotun etkin uzunluğu Şekil 10(a)'da gösterildiği gibi $L_{etkin} = PW3 + PL2 + PW2 + PL1 = 23,0$ mm olarak belirlenmiştir. $\epsilon_{etkin} = 2.6$ değeriyle 1,92 GHz rezonans frekansı için hesaplanan teorik çeyrek dalga boyu(5.2) $\lambda_g/4=24,2$ mm olup, simülasyonlardan elde edilen etkin uzunluk ile teorik değer arasındaki fark yaklaşık % 4,96'dır. Bu fark; saçaklanma alan etkileri, akım yolunun fiziksel uzunluktan daha kısa olması, slot köşelerindeki akım yoğunlaşmaları ve basamaklı geometrinin oluşturduğu kapasitif-indüktif yüklemelerden kaynaklanmaktadır. Bu tür sapmalar, mikroşerit ve slot tabanlı anten yapılarında beklenen ve literatürde yaygın olarak rapor edilen bir durumdur (Ren vd., 2019). Elde edilen yüzey akım dağılımları, 1,92 GHz rezonansının oluşumunda basamaklı slotun ilgili kolunun baskın rezonatör olduğunu açıkça göstermektedir. Akım yoğunluğunun bu kol üzerinde toplanması ve yama gövdesinin geri kalanında daha zayıf olması, söz konusu frekansta rezonansın esas olarak slot kaynaklı olduğunu doğrulamaktadır.

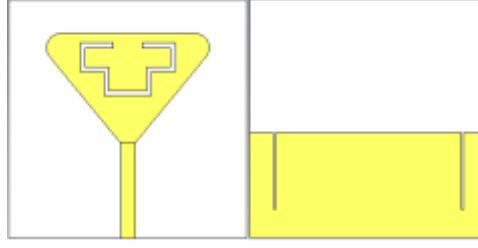
2,74 GHz rezonans frekansına ait yüzey akım dağılımı incelendiğinde, baskın rezonans modunun besleme hattının üst birleşim noktasından başlayarak üçgen yamanın eğik

kenarı boyunca yukarı doğru ilerleyen ve üst bölgedeki slot kenarlarını takip ederek uzayan bir akım yolu tarafından belirlendiği açıkça görülmektedir. Şekil 10(b)'de siyah çizgi ile gösterilen bu etkin akım yolu, akımın geometrik olarak en kısa yolu tercih etmek yerine slot kenarları boyunca yönlendirilerek uzatıldığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, rezonans frekansı yamanın fiziksel boyutlarından ziyade bu uzatılmış akım yolunun elektriksel uzunluğu tarafından belirlenmektedir.



Şekil 5.10 Anten 2 konfigürasyonunda (a) 1,92 GHz ve (b) 2,74 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları

Optimize edilen Anten 2 konfigürasyonunda 7,28 GHz’de elde edilen üçüncü bandın S_{11} büyüklüğü istenilen seviyede olmamıştır. Anten performansını iyileştirmeye yönelik yaygın yaklaşımlardan biri, toprak düzlemine kusurlu yapıların eklenmesiyle oluşturulan kusurlu toprak düzlemi tekniğidir. Kusurlu toprak düzlemi, elektromanyetik bant aralık yapısına benzeyen bir yapı olup (Yang F. vd., 2008), bileşenler arasında karşılıklı bağlantı oluşturmak, kazanç ve bant genişliğini artırmak ve antenin ışıma özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Toprak düzleminde kasıtlı olarak oluşturulan herhangi bir kusur, etkin kapasitans ve endüktansın artmasına neden olur (Weng vd., 2008). Bu kusurlar —örneğin slotlar— nedeniyle düzlemdeki akım dağılımı bozulmakta, yüzey empedansı değişmekte ve iletken yama ile toprak düzlemi arasında ek bir kapasitans oluşmaktadır. Söz konusu ek kapasitans, elektromanyetik kuplajı artırarak yansıma spektrumunun iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, Anten 3 ve Anten 4 konfigürasyonlarında, toprak düzlemi üzerine birbirine simetrik olarak iki dikey ve iki yatay slot eklenmiştir. Bu slotların genişlikleri (t_2), parametrik tarama yöntemiyle optimize edilerek 0,5 mm olarak belirlenmiştir. Anten 3 tasarımında Şekil 5.11’de görüldüğü üzere, toprak düzlemi üzerinde birbirine simetrik iki dikey slot konumlandırılmıştır.

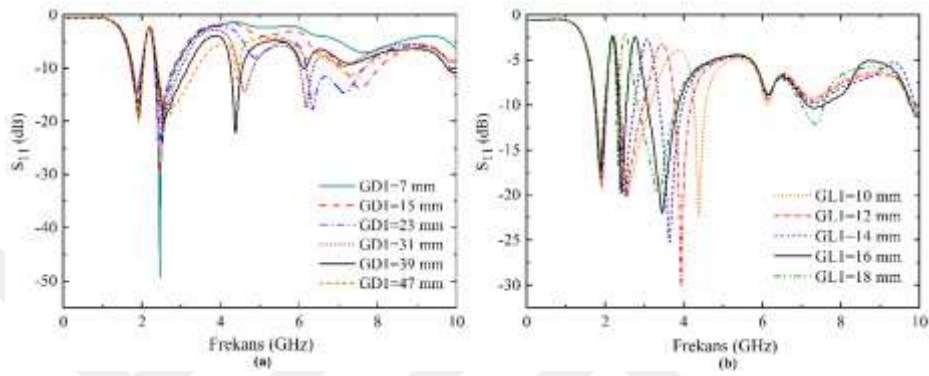


Şekil 5.11 Anten 3 konfigürasyonu

Dikey slotlar arasındaki mesafe ($GD1$) ile slot uzunluğunun ($GL1$), S_{11} spektrumu üzerindeki etkileri incelenmiş; elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 5.12(a) ve (b)'de sunulmuştur. Bu kapsamda $GD1$, 7,0 mm ile 47,0 mm arasında, $GL1$ ise 10 mm ile 18 mm arasında değiştirilmiştir. Şekil 5.12(a)'da görüldüğü üzere $GD1$ arttıkça, ilk bant haricinde tüm bantların rezonans karakteristiklerinde belirgin değişimler meydana gelmektedir. Toprak düzlemine eklenen birbirine simetrik dikey slotlar sayesinde, yama üzerindeki akım yolları dikey eksen boyunca uzatılmıştır. Dikey slotlar arasındaki mesafenin artırılmasıyla (aradaki metal yüzeyin genişlemesiyle) 4.5 GHz civarında yeni bir rezonans ortaya çıkmıştır. Bu durum, dikey slotlar arasındaki mesafenin yama üzerindeki akım dağılımını değiştirerek yeni rezonans modlarının oluşumunda belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Dolayısıyla, dikey slotlar arasındaki mesafenin kontrolü, orta frekans bantlarında istenen rezonans frekansının ayarlanmasında etkin bir parametre olarak değerlendirilebilir. Örneğin $GD1 = 31,0$ mm durumunda anten dört rezonans bandına sahip olmakla birlikte, üçüncü ve dördüncü bantlarda elde edilen S_{11} büyüklüğü ve BG değerleri yetersizdir. Buna karşılık $GD1 = 39,0$ mm olduğunda anten üç rezonans bandı sergilemekte, ancak bu bantların BG ve S_{11} büyüklükleri daha uygun olmaktadır. Dolayısıyla yapılan analizler sonucunda, $GD1$ için en uygun değer 39,0 mm olarak belirlenmiştir.

$GD1$ 'in 39,0 mm olarak belirlenmesinin ardından, dikey slot uzunluğunun ($GL1$) 10,0 mm ile 18,0 mm arasında değiştirilmesiyle antenin S_{11} spektrumlarındaki değişim Şekil 5.12(b)'de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, $GL1$ 'in birinci rezonans bandı üzerinde neredeyse hiçbir etkisinin olmadığını, ancak ikinci bant ve özellikle 4 GHz civarında ortaya çıkan üçüncü bantta belirgin frekans kaymalarına yol açtığını göstermektedir. $GL1$ arttıkça bu bantlar daha düşük frekanslara doğru kaymakta; aynı zamanda üçüncü bandın

BG artarken, ikinci bandın BG azalmaktadır. Bu durum, dikey slotların yüzey akım yolunu uzatarak rezonans frekanslarını düşürdüğünü ve bant davranışlarını doğrudan etkilediğini göstermektedir. $GL1 = 16,0$ mm için tüm S_{11} büyüklükleri kabul edilebilir düzeydedir. Ayrıca 3,5 GHz WiMAX uygulamaları için geniş bant gerekliliği dikkate alındığında, özellikle üçüncü bandın yeterli BG sağlaması nedeniyle $GL1 = 16,0$ mm en uygun değer olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12 (a) $GD1$ ve (b) $GL1$ parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi

Optimize edilmiş Anten 3, sırasıyla 1,88 GHz, 2,40 GHz ve 3,45 GHz frekanslarında rezonans davranış göstermektedir. Bu rezonanslara ait S_{11} büyüklük ve % cinsinden göreceli BG değerleri Çizelge 5.3’de sunulmuştur.

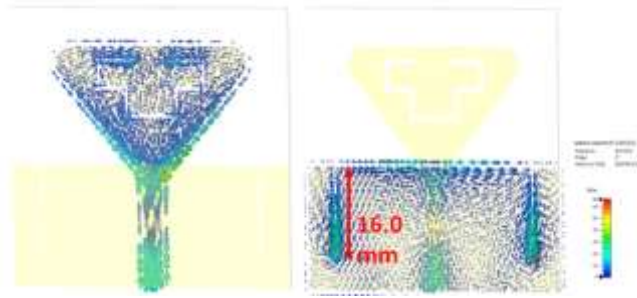
Çizelge 5.3 Anten 3’ün simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden göreceli BG değerleri

Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	BG (%)
1,88	-17,57	14,4
2,40	-19,84	8,8
3,45	-21,99	22,9

Basamaklı slot yapısına ek olarak, toprak düzlemine birbirine simetrik iki adet dikey slot yerleştirilmesiyle 3,45 GHz’de rezonans elde edilmiştir. Optimize edilmiş Anten 3 konfigürasyonu için 3,45 GHz frekansında yama ve topraktaki yüzey akım dağılımı sırasıyla Şekil 5.13(a) ve (b)’de gösterilmektedir. Bu frekansa ait yüzey akım dağılımı incelendiğinde, akımın baskın olarak toprak düzleminde açılan dikey slotlar boyunca yoğunlaştığı, yama ve yama üzerindeki basamaklı slot bölgelerinde ise akım

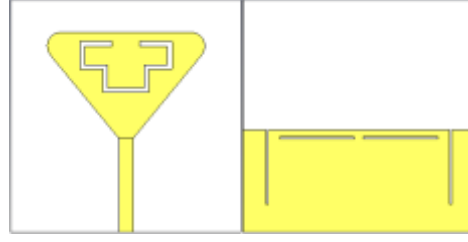
yoğunluğunun oldukça zayıf kaldığı görülmektedir. Özellikle dikey slotların üst ve alt bölgelerinde yüksek akım yoğunluğu oluşurken, slot boyunca belirli bir noktada akımın azaldığı bir düğüm bölgesi gözlemlenmektedir. Bu durum, 3,45 GHz rezonansının doğrudan toprak düzlemindeki dikey slotlar tarafından uyarıldığını açıkça göstermektedir.

Elektromanyetik rezonans teorisine göre, maksimum akım noktası ile akım düğümü arasında kalan etkin akım yolu yaklaşık olarak çeyrek dalga boyuna karşılık gelmektedir. Bu kapsamda, 3,45 GHz rezonansı için hesaplanan kılavuz dalga boyu $\lambda_g \approx 53,95$ mm ve buna karşılık gelen teorik çeyrek dalga boyu $\lambda_g/4 \approx 13,5$ mm olarak elde edilmiştir. Yüzey akım dağılımından belirlenen etkin akım yolu uzunluğu ise dikey slot boyunca yaklaşık $L_{etkin} (GL1) \approx 16$ mm'dir. Teorik ve simülasyon temelli değerler arasındaki fark yaklaşık %18,5 olup, bu fark; toprak düzlemindeki saçaklanma alan etkileri, akımın slot boyunca homojen dağılmaması, slot uçlarında oluşan yoğun yerel akımlar ve simetrik dikey slotların oluşturduğu kapasitif-indüktif yüklemelerden kaynaklanmaktadır. Akımın büyük ölçüde bu slotlar üzerinde toplanması ve yama kaynaklı rezonansların bu frekansta bastırılması, söz konusu frekansın toprak düzlemi kaynaklı bir çeyrek dalga rezonansı olarak ortaya çıktığını göstermektedir.



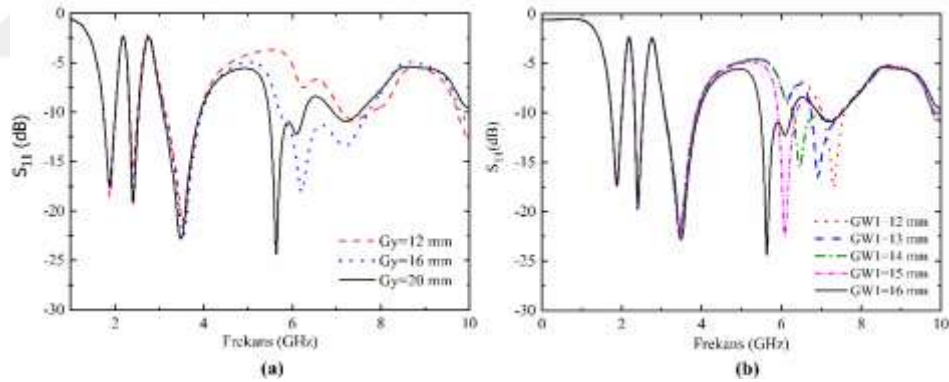
Şekil 5.13 Anten 3 konfigürasyonunda 3,45 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımı

Son tasarım aşamasında, Şekil 5.14'de görüldüğü üzere, toprak düzlemine simetrik olarak iki yatay slot eklenerek Anten 4 konfigürasyonu oluşturulmuştur. Anten performansını optimize etmek için yatay slotların toprak düzleminin alt kenarına olan dikey konumu (G_y) ve slot eni ($GW1$) parametreleri incelenmiştir.



Şekil 5.14 Anten 4 konfigürasyonu

Parametrik taramalar G_y için 12,0–20,0 mm, $GW1$ için ise 12,0–16,0 mm aralığında gerçekleştirilmiş ve Şekil 5.15(a) ve (b)’de S_{11} spektrumlarına olan etkileri gösterilmiştir. Yatay slotların eklenmesiyle birlikte, ek olarak 5–6 GHz civarında dördüncü bir rezonans elde edilmiştir. İlk üç rezonans bandı, bu parametre değişimlerinden etkilenmezken, G_y veya $GW1$ ’in artırılması dördüncü bandın rezonans frekansını düşürmekte ve empedans uyumunu iyileştirmektedir. $GW1$ 16,0 mm alınarak $G_y=20,0$ mm seçildiğinde, dördüncü rezonans tek ve belirgin bir rezonans sergilemiş; bant boyunca daha kararlı empedans uyumu ve yüksek ortalama kazanç sağladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle G_y , 20,0 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 5.15 (a) G_y ve (b) $GW1$ parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi

Benzer şekilde $GW1$ ’in artırılması dördüncü bandın rezonansını hafifçe aşağı kaydırmakta ve S_{11} büyüklerinde önce azalma, $GW1 = 16,0$ mm’de ise belirgin bir iyileşme gözlenmektedir. Ayrıca, $GW1$ arttıkça dördüncü bant genişlemekte ancak 16,0 mm’den daha fazla artırmak, yatay slotların birleşmesine ve yapının bozulmasına yol açmaktadır. Hem geniş bant hem de yüksek frekanslarda daha iyi S_{11} büyüklükleri elde etmek için $GW1$ boyutu 16,0 mm olarak seçilmiştir. Yama ve toprak düzleminde bulunan her bir slotun parametrik analizlerinin ardından, optimize edilmiş nihai antenin S_{11}

spektrumu, Şekil 5.15(b)'de siyah renkle gösterilen eğri ile temsil edilmektedir. Antenin nihai performansına göre, WiFi, WiMAX ve WLAN uygulamalarına karşılık gelen 1,88 GHz, 2,41 GHz, 3,48 GHz ve 5,64 GHz frekanslarında dört ayrı rezonans gözlemlenmiştir.

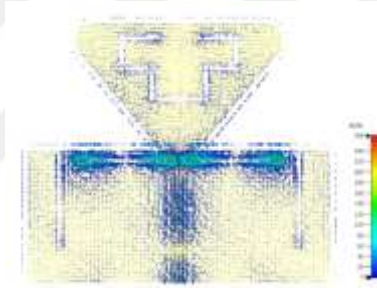
Nihai anten olan Anten 4 için frekanslara karşılık simüle edilen S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri Çizelge 5.4'de sunulmuştur.

Çizelge 5.4 Anten 4'ün (nihai yapı) simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri

Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	BG (%)
1,88	-17,39	14,4
2,41	-27,10	8,7
3,48	-22,81	24,4
5,64	-24,37	14,2

Toprak düzlemine, birbirine simetrik olacak şekilde yerleştirilen yatay slotların eklenmesiyle birlikte, anten yapısında 5,64 GHz frekansında yeni bir rezonans modu ortaya çıkmıştır. Bu frekansa ait yüzey akım dağılımı incelendiğinde (Şekil 5.16), akımın baskın olarak toprak düzleminde açılan yatay slotlar üzerinde yoğunlaştığı, yama ve yama üzerindeki basamaklı slot bölgelerinde ise akım yoğunluğunun oldukça zayıf kaldığı görülmektedir. Şekil 5.16'da görüldüğü gibi yatay slotların orta bölgesinde maksimum akım yoğunluğu oluşurken, slot uçlarına doğru akımın azaldığı bölgeler gözlemlenmektedir. Bu durum, 5,64 GHz rezonansının doğrudan toprak düzlemindeki yatay slotlar tarafından uyarıldığını açıkça göstermektedir. Elektromanyetik rezonans teorisine göre, iki maksimum akım noktası arasında kalan etkin akım yolu yaklaşık olarak yarım kılavuz dalga boyuna karşılık gelmektedir. Bu kapsamda, 5,64 GHz rezonansı için kılavuz dalga boyu $\lambda_g \approx 33,0$ mm olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık gelen teorik yarım kılavuz dalga boyu $\lambda_g/2 \approx 16,5$ mm'dir. Yüzey akım dağılımından belirlenen yatay slotların etkin uzunluğu ise yaklaşık ($GW1$) ≈ 16 mm olup, teorik ve simülasyon temelli değerler arasındaki fark yaklaşık %3.0 seviyesindedir.

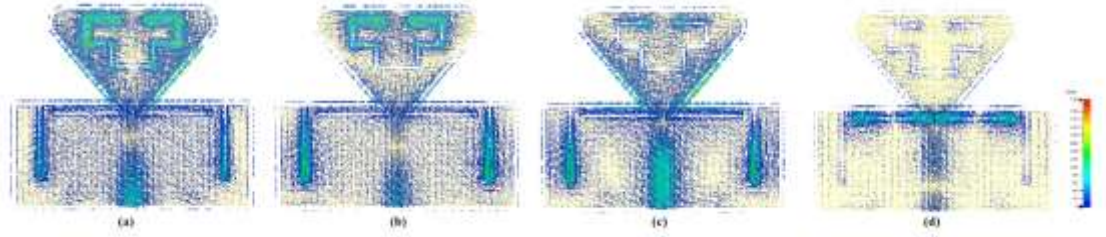
Dikkat çekici bir diğer husus, toprak düzlemine eklenen yatay slotların, antenin daha önce elde edilen 1,92 GHz, 2,74 GHz ve 3,45 GHz rezonans frekanslarını etkilememesidir. Bunun temel nedeni, yatay slotların bu frekanslarda elektriksel olarak kısa kalması ve ilgili rezonans modlarının etkin akım yolları ile zayıf elektromanyetik bağlaşım göstermesidir. Daha düşük frekanslarda baskın rezonanslar; sırasıyla yama üzerindeki basamaklı slot ve toprak düzlemindeki dikey slotlar tarafından belirlenirken, yatay slotlar bu modlar için yeterli akım yoğunluğunu oluşturamamaktadır. Böylece, yatay slotlar yalnızca yüksek frekans bölgesinde aktif hale gelerek 5,64 GHz bandında ek bir rezonans üretmiş, mevcut bantların karakteristiklerini ise korumuştur. Bu durum, tasarlanan anten yapısında farklı rezonans modlarının geometrik olarak ayrıştırılabildiğini ve her bir slot yapısının belirli bir frekans bandında baskın rezonatör olarak çalıştığını göstermektedir. Elde edilen yüzey akım dağılımları, çok bantlı anten tasarımında toprak düzlemi slotlarının seçici ve kontrollü biçimde kullanılabileceğini açıkça doğrulamaktadır.



Şekil 5.16 Anten 4 konfigürasyonunda 5,64 GHz frekanslarında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımı

Her bir rezonansın oluşum mekanizmasını açıklığa kavuşturmak amacıyla, dört rezonans frekansındaki yüzey akım dağılımları Şekil 5.17’de verilmiştir. 1,88 GHz’de elektrik alan yoğunluğu ağırlıklı olarak yamadaki *PW1*, *PL1* ve *PW2* slotları boyunca toplanmaktadır. 2,41 GHz’de ise alanların çoğunlukla yamadaki slotlar üzerinde yoğunlaştığı ve kısmen de toprak düzleminde yer alan dikey slotlar (*GL1*) aracılığıyla kuplaj yaptığı görülmektedir. 3,48 GHz’de elektrik alanın daha güçlü biçimde dikey slotlar (*GL1*) ve toprak düzleminin üst kenarı boyunca yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Son olarak, 5,64 GHz’deki dördüncü rezonans için elde edilen dağılımlar, toprak düzlemindeki yatay slotların (*GW1*) bu rezonansın oluşumunda baskın etkisinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Parametrik analizler ve alan dağılımları birlikte değerlendirildiğinde,

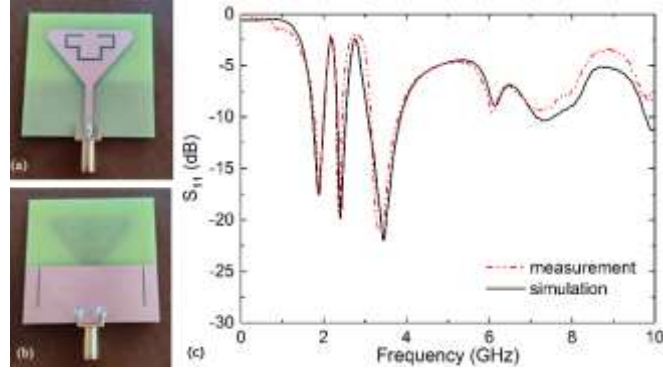
üçüncü ve dördüncü rezonansların (3,48 GHz ve 5,64 GHz) esas olarak toprak düzlemindeki dikey ve yatay slotlardan kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.17 Önerilen antenin dört rezonans frekansında yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 1,88 GHz, (b) 2,41 GHz, (c) 3,48 GHz ve (d) 5,64 GHz

5.1.2 Düzlemsel monopol mikroşerit antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Nihai antenin ölçümüne geçilmeden önce simülasyon ve ölçüm sonuçlarının uyumluluğunu incelemek üzere Anten 3 geleneksel fotolitografi ve aşındırma teknikleri ile üretilmiştir. Antenin giriş portuna 50 Ω SMA konnektör lehimlenmiş ve VNA Master MS2037C cihazı kullanılarak S_{11} spektrumu ölçülmüştür. Üretilen antene ait fotoğraflar ve S_{11} spektrumları sırasıyla Şekil 5.18(a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Anten 3 yapısına ait ölçümden elde edilen anten parametreleri Çizelge 5.5'de özetlenmiştir. Ölçümler sonucunda 1,90 GHz, 2,38 GHz ve 3,45 GHz frekanslarında sırasıyla $-17,71$ dB, $-19,57$ dB ve $-22,17$ dB'lik S_{11} büyüklükleri elde edilmiştir. Yaklaşık 7,30 GHz civarında gözlenen rezonans, -10 dB eşiğini karşılamadığı için değerlendirmeye alınmamış, buna karşın tanımlanan rezonans frekanslarındaki DDO değerleri 1,30, 1,24 ve 1,17 olarak bulunmuştur. Hem simülasyon hem de ölçüm sonuçlarının büyük oranda uyumlu olması, Anten 3'ün 1,9 GHz GSM, 2,4 GHz WLAN ve 3,3–3,8 GHz WiMAX bantlarında kullanılabilirliğini doğrulamaktadır.

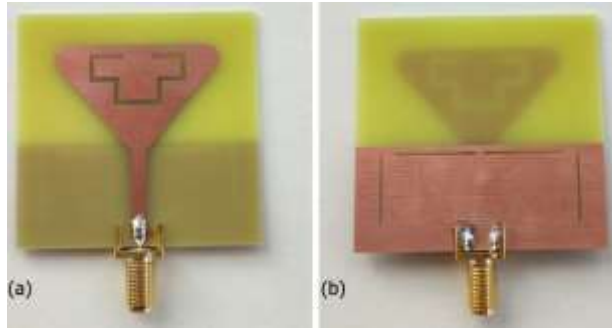


Şekil 5.18 Üretilen Anten 3 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyinin görünümü ile (c) ölçüm ve simülasyon S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması

Çizelge 5.5 Üretilen Anten 3 yapısının ölçüm sonuçları

Ölçüm		Simülasyon	
Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)
1,90	-17,71	1,88	-17,57
2,38	-19,57	2,40	-19,84
3,45	-22,17	3,45	-21,99

Nihai yapı olan Anten 4 yapısının üretimi geleneksel fotolitografi ve aşındırma teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Anten portuna, 50Ω empedansa sahip SMA tipi koaksiyel konnektör lehimlenmiştir. Önerilen nihai anten prototipinin fotoğrafı Şekil 5.19’da sunulmuştur. Antenin 1–7 GHz frekans aralığında, S_{11} spektrumları, DDO, uzak alan ışıma örüntüleri, kazanç ve verimlilik ölçümleri VNA Master MS2037C cihazı ile TÜBİTAK Anten Test ve Araştırma Merkezi’nde yapılmıştır. Ölçüm esnasında çekilen anten prototipi fotoğrafı Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

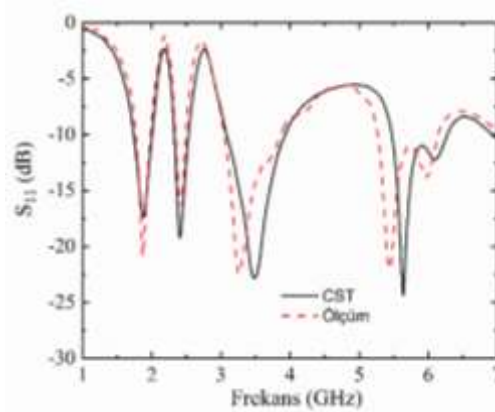


Şekil 5.19 Önerilen nihai anten prototipinin (a) ön ve (b) arka yüzeyi



Şekil 5.20 Anten prototipinin VNA Master MS2037C ile ölçümü

Şekil 5.21’de, ölçüm ve simülasyon sonuçlarından elde edilen S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması verilmiştir. Ölçülen S_{11} spektrumunda, 1,87 GHz, 2,42 GHz, 3,27 GHz ve 5,44 GHz frekanslarında sırasıyla $-20,87$ dB, $-16,50$ dB, $-22,47$ dB ve $-22,04$ dB büyüklükleri ile rezonanslar elde edilmiştir. Genel olarak, ölçüm ve simülasyon sonuçları tüm frekans aralığında uyumlu bir eğilim göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü bantlardaki hafif farklılıklar, üretim toleransları, SMA konnektör lehimlemesi ve ölçüm cihazı kalibrasyonu gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Ölçülen DDO değerleri ise sırasıyla 1,20, 1,35, 1,16, 1,17 olarak bulunmuş ve tüm rezonans frekanslarında iyi empedans uyumu doğrulanmıştır.

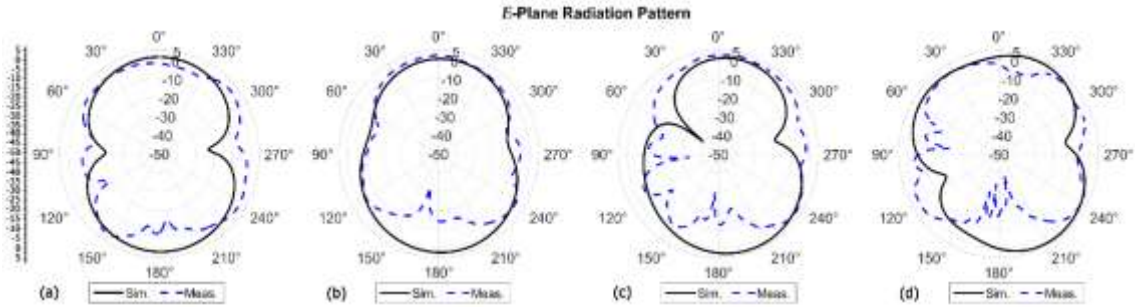


Şekil 5.21 Önerilen nihai anten yapısının ölçüm ve simülasyon S_{11} spektrumların karşılaştırılması

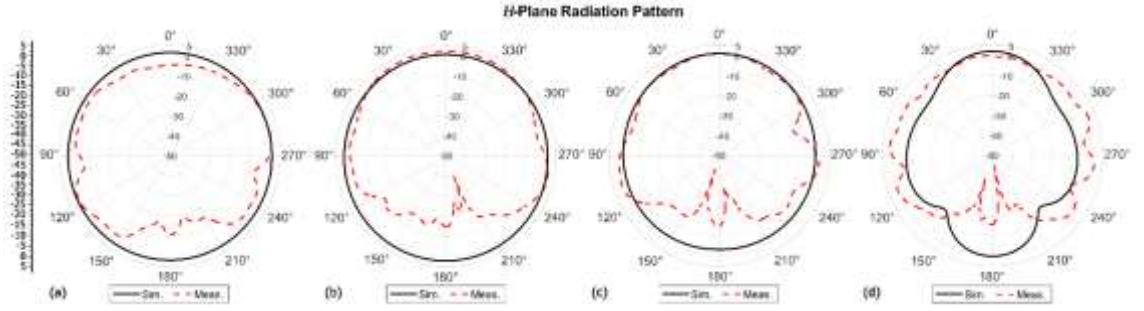
Önerilen antenin ışıma örüntülerinin belirlenmesi amacıyla, yankısız odada yapılan ölçümlerde anten alıcı modunda test edilmiş; θ ekseninde $\pm 180^\circ$ ve φ ekseninde $0-360^\circ$ aralığında, 1° ’lik açısal adımlarla küresel tarama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen E-

düzlemi ve H-düzlemi ışıma örüntüleri, sırasıyla Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de gösterilmiştir.

Her iki düzlemde elde edilen ışıma örüntüleri incelendiğinde, antenin dört çalışma bandında da simülasyon ve ölçüm sonuçlarının genel olarak iyi bir uyum sergilediği görülmektedir. 1,87 GHz’de ana lob şekli ve yönelimi ölçümde simülasyona oldukça yakın çıkmış, düşük frekansların anten boyutuna göre daha büyük dalga boyuna sahip olması nedeniyle yalnızca çevresel etkilerden kaynaklanabilecek küçük sapmalar gözlenmiştir. 2,42 GHz bandında ise hem lob genişliği hem de örüntü formu bakımından iki sonuç özellikle üst yarım kürede yaklaşık olarak çakışmakta olup, antenin bu bantta kararlı bir ışıma performansı sunduğu doğrulanmıştır. 3,27 GHz ve 5,44 GHz gibi daha yüksek frekanslarda da ana lob yönelimi ve temel örüntü karakteristiği korunmuştur. Frekans arttıkça antenin elektriksel boyutunun büyümesi, dielektrik kayıplarının artması ve ölçüm ortamının daha hassas hâle gelmesi nedeniyle farklılıkların oluşması beklenen bir durumdur. Buna rağmen tüm bantlarda elde edilen ölçüm sonuçları simülasyon verilerini desteklemekte ve antenin tasarlanan çok bantlı yapıyı başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.



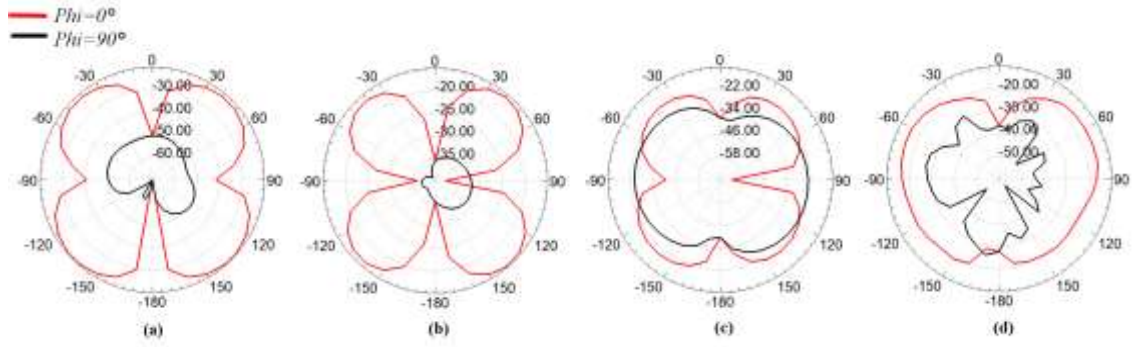
Şekil 5.22 Önerilen antenin E-düzlemi ışıma örüntüleri: (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,27 GHz ve (d) 5,44 GHz



Şekil 5.23 Önerilen antenin H-düzlemi ışıma örüntüleri: (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,27 GHz ve (d) 5,44 GHz

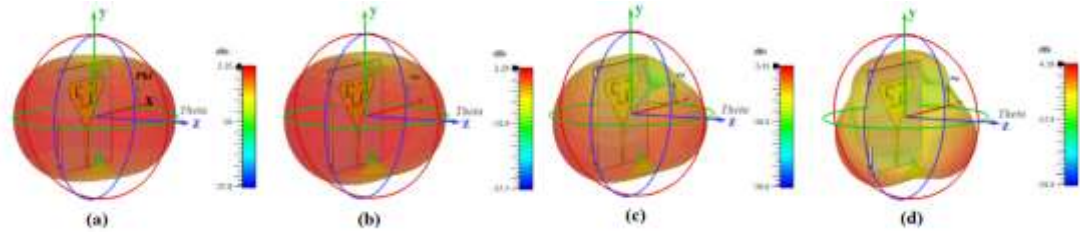
Şekil 5.1’de anten yapısı üzerinden E ve H-düzlemleri tanımlanmış, buna karşılık antenin simülasyon sonucu elde edilen çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri Şekil 5.24’de verilmiştir. Koordinat sisteminde $\varphi = 0^\circ$ ve $\varphi = 90^\circ$ kesitleri sırasıyla xz ve yz düzlemlerine karşılık gelmektedir. Antenin ana ışıma doğrultusu z eksenı boyunca olup, elektrik alanın baskın bileşeni y yönünde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle yz ($\varphi = 90^\circ$) düzlemi eş-polarizasyonu (E-düzlemi) temsil etmektedir. Çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri incelendiğinde, 1,88 GHz frekansında her iki düzlemde de düşük çapraz polarizasyon seviyeleri elde edilmiş ve ana ışıma yönünde etkin bir bastırma sağlanmıştır. Özellikle yz düzleminde çapraz polarizasyon etkileri oldukça düşük olup değer olarak -50 dB’den düşüktür. Bu durum, antenin temel modda baskın doğrusal (y-yönlü, Şekil 5.1) polarizasyon karakteri sergilediğini göstermektedir.

2,41 GHz bandında, $\varphi = 0^\circ$ (xz) düzleminde sınırlı açılarda zayıf çapraz polarizasyon loblarının oluştuğu gözlemlenirken, $\varphi = 90^\circ$ (yz) düzleminde düşük seviyeler korunmuş ve antenin eş-polarizasyon baskınlığı devam etmiştir. 3,23 GHz frekansında $\varphi = 0^\circ$ düzleminde çapraz polarizasyon -20 dB’den, $\varphi = 90^\circ$ düzleminde ise -22 dB’den düşük olmaktadır. 5,64 GHz bandında ise antenin elektriksel boyutunun artması ve yüksek mertebeden modların baskın hâle gelmesi nedeniyle her iki düzlemde de daha karmaşık ve düzensiz bir çapraz polarizasyon dağılımı oluşmuştur. Bununla birlikte, ana ışıma yönünde çapraz polarizasyon seviyeleri eş-polarizasyon bileşenlerine kıyasla kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmış ve antenin genel polarizasyon karakteri korunmuştur.



Şekil 5.24 Önerilen antenin simüle edilen çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri: (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,48 GHz ve (d) 5,64 GHz

Antenin farklı rezonans frekanslarında elde edilen 3B maksimum kazanç değerleri incelendiğinde (Şekil 5.25), birinci ve ikinci bantlarda 3B en yüksek kazancın 2,25 dBi ve 2,29 dBi olduğu görülmektedir. Üçüncü ve dördüncü bantlarda ise daha yüksek 3B maksimum kazanç değerleri elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 3,41 dBi ve 4,18 dBi olarak hesaplanmıştır. Antenin bu frekanslarda daha belirgin ve yönlü bir ana lob oluşturduğu Şekil 5.25’den de anlaşılmaktadır. Frekans arttıkça antenin elektriksel boyutunun büyümesi ve toprak düzlemi üzerindeki slotların daha baskın hâle gelmesi, ışıma mekanizmasının daha yönlü olmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.25 Önerilen antenin (a) 1,87 GHz, (b) 2,42 GHz, (c) 3,48 GHz ve (d) 5,64 GHz frekanslarındaki 3 boyutlu uzak alan ışıma karakteristikleri

Nihai anten yapısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları, Çizelge 5.6’da sunulmuştur. Antenin dört rezonans bandındaki BG değerlerini sırasıyla %11,76 (1,77–1,99 GHz), %6,20 (2,34–2,49 GHz), %25,08 (3,05–3,87 GHz) ve %16,18 (5,27–6,15 GHz) olarak ölçülmüştür ve bu değerler simülasyon sonuçlarıyla uyumludur. Üçüncü ve dördüncü yüksek frekans bantlarında küçük rezonans frekansı farklılıkları gözlemlenmiş olsa da S_{11} büyüklükleri ve BG değerleri simülasyon sonuçlarıyla büyük ölçüde paraleldir. Ölçülen gerçekleşmiş anten kazancı ise 2,04–2,90 dBi arasında değişmektedir.

Ek olarak, dört bandın ölçülen ışıma verimlilik değerleri, yankısız odada gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen gerçekleşmiş kazanç (G) ve yönlülük (D) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. CST Microwave Studio ortamında simüle edilen anten verimlilikleri, ışıma verimliliği ve toplam verimlilik olmak üzere iki farklı metrik üzerinden değerlendirilmiştir. Işıma verimliliği, antene kabul edilen gücün ne kadarının serbest uzaya elektromanyetik dalga olarak yayıldığını ifade etmekte olup iletken ve dielektrik kayıplar ile empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan yansıma kayıplarını içermemektedir. Buna karşılık toplam verimlilik, iletken ve dielektrik kayıpların yanı sıra empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan yansıma kayıplarını da dikkate alarak antene uygulanan toplam gücün ne kadarının ışımayla yayıldığını göstermektedir. Bu nedenle toplam verimlilik değerlerinin, yalnızca antenin ışıma performansını temsil eden ışıma verimliliği değerlerine kıyasla daha düşüktür. Anten ışıma verimliliği, doğrusal ölçekte (5.3) bağıntısı ile tanımlanmakta olup, dB cinsinden ifade edildiğinde

$$G = \eta \times D \quad (5.3)$$

$$\eta_{dB} = G_{dB} - D_{dB} \quad (5.4)$$

olarak elde edilmektedir. Ölçümler sonucunda belirlenen kazanç ve yönlülük değerleri kullanılarak hesaplanan ışıma verimlilikleri, yüzde cinsine dönüştürülerek

$$\eta(\%) = 10^{(\eta_{dB}/10)} \times 100 \quad (5.5)$$

(5.5) bağıntısı ile ifade edilmiştir. Antenin ölçülen ışıma verimlilikleri sırasıyla %80,6, %84,2, %65,5 ve %63,0 olarak belirlenmiş olup, üçüncü ve dördüncü banttaki azalma büyük ölçüde üretim toleransları ve ölçüm belirsizliklerinden (konnektör, kablo kayıpları, hizalama hatası, vb.) kaynaklanmaktadır. Ortalama verimlilik %73,32 olarak bulunmuştur. Bu değer, kablosuz uygulamalar için tatmin edici kabul edilmektedir.

Çizelge 5.6 Önerilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekansları, genlikleri, BG, DDO, kazanç ve ısıma verimliliği değerleri

	Frekans (GHz)	S ₁₁ (dB)	BG (%)	DDO	Kazanç (dBi)	Isıma verimliliği (%)
Ölçüm	1,87	– 20,87	11,76	1,20	2,04	80,6
	2,42	– 16,50	6,20	1,35	2,21	84,2
	3,27	– 22,47	25,08	1,16	2,90	65,5
	5,44	– 22,04	16,18	1,17	2,35	63,0
Simülasyon	1,88	– 17,39	14,36	1,33	2,25	89,3
	2,41	– 27,10	8,60	1,23	2,29	85,1
	3,48	– 22,81	24,41	1,14	3,23	79,4
	5,64	– 24,37	14,24	1,14	3,98	64,5

Çizelge 5.7’de önerilen antenin literatürde rapor edilen çeşitli çok bantlı antenlerle karşılaştırılması sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere, literatürdeki birçok çalışma iki veya üç bantta çalışırken (örneğin Patel vd., 2018; Singh vd., 2018; Ali vd., 2019; Pandya vd., 2021), önerilen çalışma dört ayrı bantta çalışma yeteneği sağlayarak bant sayısı açısından daha gelişmiş bir fonksiyonellik sergilemektedir. Bazı çalışmalar (Patel vd., 2021; Roy vd., 2020) çok bantlı yapı sunmasına rağmen, bant genişliği ve kazanç performansları açısından sınırlı kalmaktadır.

Anten boyutu açısından bakıldığında, önerilen anten $50 \times 50 \times 1,6 \text{ mm}^3$ boyutlarıyla literatürdeki dört bantlı benzer çalışmalar gibi (Rezvani vd., 2017; Ali vd., 2018; Roy vd., 2020; Patel vd., 2021) kompakt bir yapı sunmaktadır. Roy vd. (2020) çalışması boyut bakımından daha kompakt olsa da empedans bant genişlikleri %3,88–%7,33 aralığında kalarak önerilen antenin sağladığı %25,08’lik maksimum empedans BG değerinin oldukça gerisinde kalmaktadır. Singh vd. (2018) ve Pandya vd. (2021) tarafından sunulan antenlerde de bant genişliği sınırlı olup, özellikle daha yüksek frekans bantlarında performans düşüşü gözlenmektedir.

Kazanç performansı incelendiğinde, önerilen antenin 2,04–2,90 dBi aralığındaki kazanç değerleri, literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmıyla rekabet edilebilir seviyededir. Örneğin Singh vd. (2018), Ali vd. (2018) ve Balakrishnan vd. (2022) çalışmalarında

raporlanan kazanç değerleri benzer aralıkta yer almakta olup, önerilen anten bu çalışmalarla uyumlu bir kazanç performansı göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen anten; kompakt boyut, çoklu bant yapısı, yüksek empedans bant genişlikleri ve kararlı kazanç değerlerini birlikte sunarak literatürdeki mevcut çözümler arasında dengeli ve yeterli performans gösteren bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu yönleriyle ölçüm sonuçlarında elde edilen rezonans frekansları, antenin farklı kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılabileceğini göstermektedir. 1,87 GHz bandı GSM tabanlı mobil haberleşme sistemlerinde ses ve veri iletimi için yaygın olarak kullanılırken, 2,42 GHz ve 5,44 GHz bantları kısa menzilli kablosuz ağlar, Wi-Fi erişim noktaları ve IoT uygulamalarında tercih edilmektedir. 3,27 GHz bandı ise geniş kapsama alanı ve yüksek veri hızı gerektiren WiMAX ve benzeri kablosuz geniş bant haberleşme sistemlerinde kullanılmakta olup, bu durum önerilen antenin çok bantlı ve çok amaçlı kablosuz haberleşme uygulamaları için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.7 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması

Diğer çalışmalar	Bant sayısı	Anten boyutu (mm³) (λ_0^3)	Rezonans frekansı (GHz)	Empedans BG (GHz)	Kazanç (dBi)
Patel vd., 2018	3	20×21×1,6 0,062×0,065×0,005	0,93/1,57/ 2,48	2,26/5,73/ 2,82	0,32/1,2/1,5
Patel vd., 2021	5	30 × 36 × 1.6 0,18×0,15×0,008	1,57/2,90/ 3,82/4,50/ 5,00	5,10/1,72/ 2,88/2,22/ 2,60	2,65/3,84/ 1,07/1,93/ 3,92
Singh vd., 2018	3	19×19×0,762 0,20×0,20×0,008	3,2/5,4/5,8	2,50/1,11/ 2,07	3,28/2,76/ 3,1
Singh vd., 2025	4	103 × 120 × 1,575 0,82×0,96×0,013	2,4/3,4/5,2/ 5,7	8,47/36,81/ 5,54/3,83	13,2/25/ 4,28/4,97
Ali vd., 2017	4	28 × 30 × 1,6 0,15×0,16×0,009	1,6/2,5/5,8/ 9,5	6,06/11,76/ 3,44/6,25	2,9/2,4/3,1/ 1,8
Pandya vd., 2021	3	56 × 83 × 1.56 0,46×0,68×0,013	2,47/3,55/ 5,55	14,61/5,42/ 5,40	3,88/3,87/ 3,83
Roy vd., 2020	4	20 × 16 × 1,56 0,25×0,20×0,019	3,7/4,3/5,1/ 9,85	3,2/2,9/2,5/78, 2	2,5/2,0/5,0/ 1,8

Çizelge 5.7 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması (devam)

Diğer çalışmalar	Bant sayısı	Anten boyutu (mm³) (λ₀³)	Rezonans frekansı (GHz)	Empedans BG (GHz)	Kazanç (dBi)
Jajali vd., 2016	3	30 × 34 × 0,8 0,20×0,23×0,005	2,0/3,5/5,0	12,50/5,71/ 4,00	– 1,0/1,0/ 3,5
Ali vd., 2018	3	30×24,8×1,6 0,36×0,30×0,019	3,6/5,6/7,4	5,3/5,5/3,7	1,14/1,13/ 0,8
Rezvani vd., 2017	4	15 × 15 × 1,6 0,17×0,17×0,018	3,4/4,3/5,2/ 5,8	26,47/13,95/ 11,54/17,24	2,4/2,1/2,0/ 1,8
Balakrishna n vd., 2024	4	52 × 60 × 1,6 0,27×0,31×0,008	1,58/2,60/ 4,80/8,0	-	1,0/2,2/3,2/ 3,8
Bu çalışma	4	50 × 50 × 1,6 0,31×0,31×0,007	1,87/2,42/ 3,27/5,44	11,76/6,20/ 25,08/16,18	2,04/2,21/ 2,90/2,35

5.1.3 Mikroşerit monopol anten tasarım kılavuzu

Önceki bölümde özetlenen literatür çalışmaları, mikroşerit monopol antenlerde çok bantlı rezonans elde edilmesinde slot geometrileri ve toprak düzlemi modifikasyonlarının kritik rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen tasarım deneyimi ve simülasyon sonuçları doğrultusunda, önerilen üçgen yamalı düzlemsel monopol antenin tasarım süreci aşağıda bir tasarım kılavuzu niteliğinde maddeler halinde sunulmuştur. Böylece, antenin rezonans frekanslarının hangi fiziksel mekanizmalarla oluşturulduğu ve adım adım nasıl kontrol edildiği açıkça ortaya konulmaktadır.

1. Önerilen üçgen yamalı düzlemsel monopol anten için temel rezonans frekansı, hedeflenen en düşük uygulama bandı olan 1,8 GHz GSM bandı ve 2,4 GHz IEEE 802.11.b WLAN bandı dikkate alınarak belirlenmiştir. İlerleyen aşamalarda eklenecek slotların akım yolunu uzatarak rezonans frekansını aşağı yönde kaydıracağı öngörüldüğünden, başlangıç rezonansı bu değere yakın ancak biraz daha yüksek olacak şekilde yaklaşık 2,2 GHz olarak seçilmiştir.

2. Önerilen yapı bir monopoll anten olduğundan, temel rezonans frekansı ilk aşamada besleme hattı uzunluğunun çeyrek dalga boyuna karşılık gelmesi prensibine göre yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Rezonans frekansı hesabında, alttaşın dielektrik sabiti yerine etkin dielektrik sabiti (5.1) kullanılmıştır. Bu etkin dielektrik sabiti kullanılarak besleme hattı uzunluğu $FL = 20$ mm seçilmiş ve teorik olarak temel rezonans frekansı yaklaşık 2,2 GHz olarak hesaplanmıştır.

3. Düşük frekanslarda rezonans elde edilmesi için uzun slotlara ihtiyaç bulunmaktadır. Yama üzerine simetrik kıvrımlı basamaklı slot eklenirken, mevcut rezonansın aşağıya çekilmesi ve özellikle 1,9 GHz civarında ek bir rezonansın bilinçli olarak elde edilmesi hedeflenmiştir. Basamaklı slot her iki ucu açık bir yapıdır ve genel olarak yarım dalga boylu bir slot rezonatörü gibi davranmaktadır. Yüzey akımı analizlerinde, slot kollarının uçlarında maksimum akım bölgeleri ve basamaklı yapının orta noktalarında akım düğümleri olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum akım–düğüm noktası arasındaki mesafenin çeyrek dalga boyuna karşılık gelmesi nedeniyle, basamaklı slotun her bir kolu 1,92 GHz frekansında bilinçli olarak çeyrek dalga boylu bir rezonatör gibi çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca basamaklı slot geometrisi 2,4 GHz WLAN bandına yönelik olacak şekilde ek bir rezonans daha elde edilmesi amaçlanmıştır.

4. Kısmi toprak düzlemine alttaşın sağ ve sol kenarlarına paralel olacak şekilde simetrik ve dikey yönlü iki adet slot eklenmiştir. Burada amaç, antenin 3 GHz civarındaki WiMAX bandını kapsayacak ek bir rezonans elde etmek olup, hedef frekans yaklaşık 3,4–3,5 GHz aralığı olarak belirlenmiştir. Toprak düzlemine eklenen dikey slotlar, ayrıca yama–besleme hattı–toprak etkileşimini artırarak 2,7 GHz civarındaki rezonansın etkin akım yolunu uzatmış ve bu rezonansın WLAN bandına karşılık gelecek şekilde 2,4 GHz civarına düşürülmesini sağlamıştır.

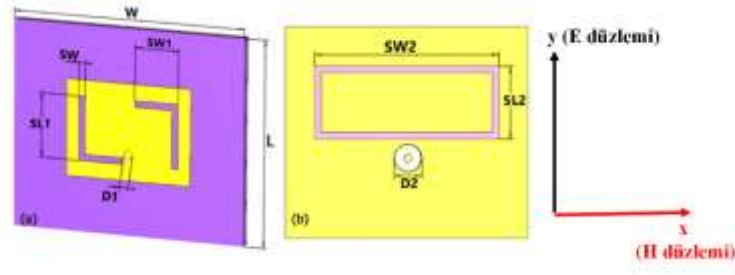
Dikey slotların bir ucu toprak düzlemi içerisinde sonlanırken diğer ucu doğrudan toprak düzleminin üst kenarından açıkta bırakılmıştır. Bu sınır koşulu nedeniyle slot boyunca bir uçta maksimum akım, diğer uçta ise akım düğümü oluşmakta ve etkin akım yolu çeyrek

dalga boyuna karşılık gelmektedir. Bu nedenle dikey slotlar, 3,45 GHz frekansında çeyrek dalga boylu rezonatörler olarak bilinçli şekilde boyutlandırılmıştır.

5. Son aşamada amaç, antenin yüksek frekans bölgesinde ($\approx 5-6$ GHz) ek bir rezonans elde etmek olup, hedef frekans WLAN üst bandını kapsayacak şekilde yaklaşık 5,6 GHz olarak belirlenmiştir. Hedeflenen yüksek frekans rezonansını elde etmek amacıyla, toprak düzlemine birbirine simetrik olacak şekilde iki adet yatay slot yerleştirilmiştir. Yatay slotların uçları toprak düzleminde sonladığından dolayı elektromanyetik rezonans teorisine göre iki maksimum akım noktası arasındaki mesafe yarım kılavuz dalga boyuna karşılık geldiğinden, yatay slotlar hedeflenen 5,64 GHz frekansına karşılık gelecek biçimde yarım dalga boylu rezonatörler olarak bilinçli şekilde tasarlanmıştır.

5.2 Çok Bantlı Slotlu Koaksiyel Beslemeli Yama Antenin Sayısal ve Deneysel Analizi

Tezin ikinci çalışmasında, çok bantlı, koaksiyel beslemeli ve kusurlu toprak yapısına sahip slotlu bir yama anten tasarlanmıştır. Kullanılan anten yapısı, arka yüzeyi toprak düzlemi ile kaplanmış, Isola I-Tera MT40 alttaş üzerine tasarlanmış ve koaksiyel beslemeli dikdörtgen bir yamadan oluşmaktadır. Kullanılan alttaşın bağıl dielektrik sabitinin gerçel kısmı $\epsilon_r = 3,45$, kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,0031$, kalınlığı (h) 1,524 mm, genişliği 37,0 mm ve uzunluğu 32,0 mm'dir. Tasarımın alt katmanında, tam bir toprak düzlemi yer almaktadır. Antenin çalışma frekansı 5,0 GHz olarak belirlenmiştir. Bölüm 3'de sunulan formüller temel alınarak yapılan hesaplamalar ve parametrik tarama sonucunda, dikdörtgen yamanın eni 15 mm, boyu ise 20 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Yansıma özellikleri ve anten parametreleri bakımından optimize edilmiş nihai anten konfigürasyonunun şematik gösterimi, geometrik parametreleriyle birlikte Şekil 5.26'da sunulmuş olup, bu parametrelerin değerleri Çizelge 5.8'de verilmiştir. Antenin 50Ω empedans ile beslenebilmesi amacıyla çapı (D_1) 1,3 mm olan bir besleme sondası kullanılmıştır. Bu sondanın etrafını saran koaksiyel kablonun dış çapı ise (D_2) 4,0 mm'dir.

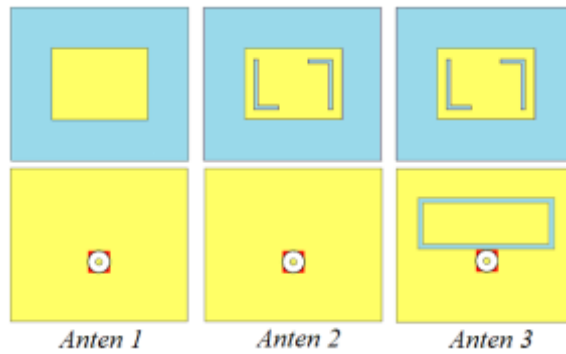


Şekil 5.26 Nihai koaksiyel beslemeli anten tasarım konfigürasyonunun (a) ön ve (b) arka yüzeylerinin şematik görünüşleri

Çizelge 5.8 Nihai antenin optimize edilmiş geometrik boyutları

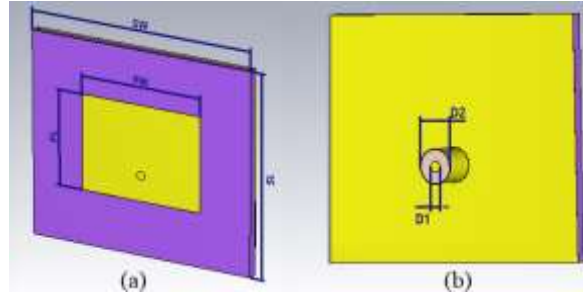
Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
SW	37	D_1	1,3
SL	32	D_2	4,0
PL	15	h	1,524
PW	20	$SL1$	7,0
$SW1$	10	$SW2$	28,0
$SL2$	11	t_1	1,0

Koaksiyel beslemeli nihai anten tasarımı üç aşamada gerçekleştirilmiştir ve tasarım aşamaları Şekil 5.27’de gösterilmiştir. Tasarım, slotsuz temel bir koaksiyel beslemeli anten yapısı olan Anten 1 tasarımı ile başlamaktadır. İkinci aşamada (Anten 2), yama üzerine birbirine ters simetrik olacak şekilde iki adet L biçimli slot eklenmiştir. Son olarak, Anten 3 yapısında toprak düzlemine dikdörtgen halka şeklinde bir slot eklenerek nihai anten tasarımı tamamlanmıştır.



Şekil 5.27 Önerilen anten yapısının tasarım aşamaları

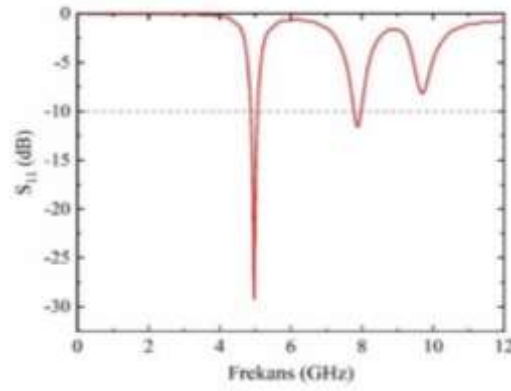
Anten 1, koaksiyel beslemeli dikdörtgen yama antenin temel konfigürasyonunu oluşturmaktadır. Tasarım süreci, dikdörtgen biçimindeki yamaya sahip bu temel yapı ile Şekil 5.28’de gösterildiği gibi başlamaktadır.



Şekil 5.28 Anten 1 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyleri

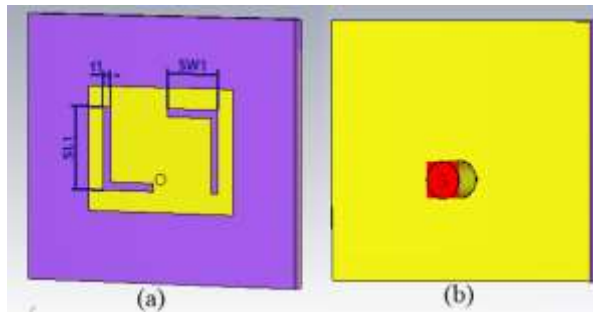
Antenin 5 GHz çalışma frekansı için yama boyutları, Bölüm 3’te verilen denklemler kullanılarak ($PW \times PL$), $20 \times 15 \text{ mm}^2$ olarak belirlenmiştir.

Anten 1 yapısına ait simülasyon sonucu hesaplanan S_{11} büyüklükleri Şekil 5.29’da verilmiştir. Antenin S_{11} spektrumunda, 4,97 GHz ve 7,88 GHz çalışma frekanslarında sırasıyla $-29,2 \text{ dB}$ ve $-11,6 \text{ dB}$ büyüklüklerinde rezonans gözlenmiştir. Slotsuz koaksiyel beslemeli yama antende 7.88 GHz civarında gözlemlenen ikinci rezonans, yama yapısının doğal yüksek mertebeden rezonans modlarından (TM_{20} / hibrit mod) kaynaklanmaktadır. Koaksiyel besleme, yapının simetrisini bozarak bu modun zayıf da olsa uyarılmasına neden olmuştur. Ancak bu rezonans, temel modda olduğu gibi etkin bir ışıma sağlamamakta ve dar bantlı bir karakter sergilemektedir. Bu frekanslarda hesaplanan -10 dB BG değerleri ise sırasıyla 0,190 GHz ve 0,198 GHz olarak belirlenmiştir.



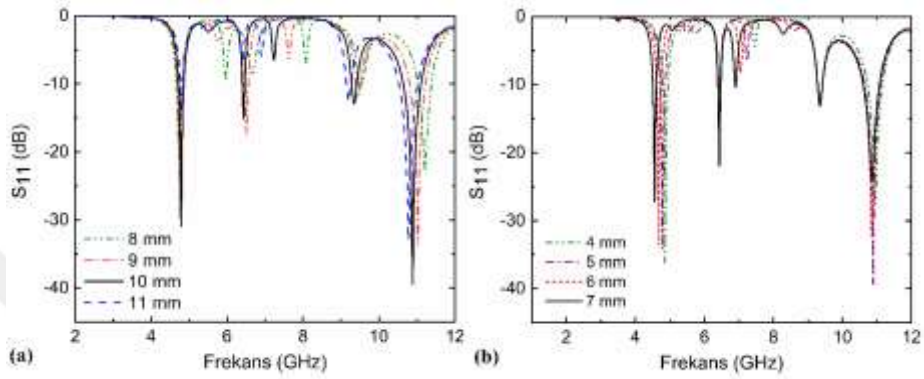
Şekil 5.29 Koaksiyel beslemeli dikdörtgen yama antenin temel yapısına ait simüle edilen S_{11} spektrumu

Tasarım sürecinin ikinci aşaması olan Anten 2 konfigürasyonu Şekil 5.30'da gösterilmiştir. Yama üzerine ters simetrik dizilimde yatay uzunluğu $SW1$ ve dikey uzunluğu $SL1$ olan L şeklinde slotlar eklenmiştir. Slot genişliği (t) ise parametrik tarama sonucunda 1,0 mm olarak belirlenmiştir. Yamaya y-ekseni boyunca ayna simetrisine sahip slotlar eklenmemesinin temel nedeni, bu tür bir simetrinin anten yapısında uyarılabilecek rezonans modlarını sınırlandırmasıdır. Ayna simetrisinin korunması durumunda, akım dağılımları daha düzenli ve tekdüze hale gelmekte, bu da yeni ve hibrit modların etkin şekilde oluşmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle slotlar, yapının geometrik simetrisini bilinçli olarak bozacak şekilde birbirine ters konfigürasyonda yerleştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde yüzey akım dağılımları çeşitlenmiş, farklı etkin elektriksel uzunluklar elde edilmiş ve antenin çok bantlı çalışma karakteristiği ile empedans uyumu iyileştirilmiştir.



Şekil 5.30 Anten 2 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyleri

Slot boyu ve genişliğindeki değişikliklerin S_{11} spektrumuna olan etkileri Şekil 5.31(a) ve (b)'de verilmiştir. $SL1$ değerinin artışı ile birinci bandın rezonans frekansı değişmezken S_{11} büyüklüğünün iyileştiği görülmektedir. $SL1$ arttıkça diğer bantların rezonans frekansları aşağıya doğru kaymaktadır. Şekil 5.31(a) incelendiğinde, $SL1 = 10,0$ mm değeri için dört bandın empedans uyumunun iyi olduğu ve BG değerlerinin yeterli seviyede bulunduğu görülmektedir.



Şekil 5.31(a) Slot boyunun ($SL1$) ve (b) genişliğinin ($SW1$) S_{11} spektrumuna olan etkileri

Bu doğrultuda, $SL1$ parametre değeri 10,0 mm olarak belirlendikten sonra, $SW1$ parametresi için parametrik analiz yapılmıştır. Şekil 5.31(b)'de görüldüğü üzere, slot genişliği ($SW1$) değişimi en belirgin şekilde birinci ve 6 GHz ve 7 GHz civarlarındaki rezonans frekanslarını ve S_{11} büyüklüklerini etkilemektedir. $SW1=7,0$ mm için antenin 5 bantlı olduğu görülmektedir. Çalışma frekans sayısını, tüm bantların BG, empedans uyumu ve anten kazancı dikkate alınarak $SW1$ değeri optimum olarak 7,0 mm seçilmiştir.

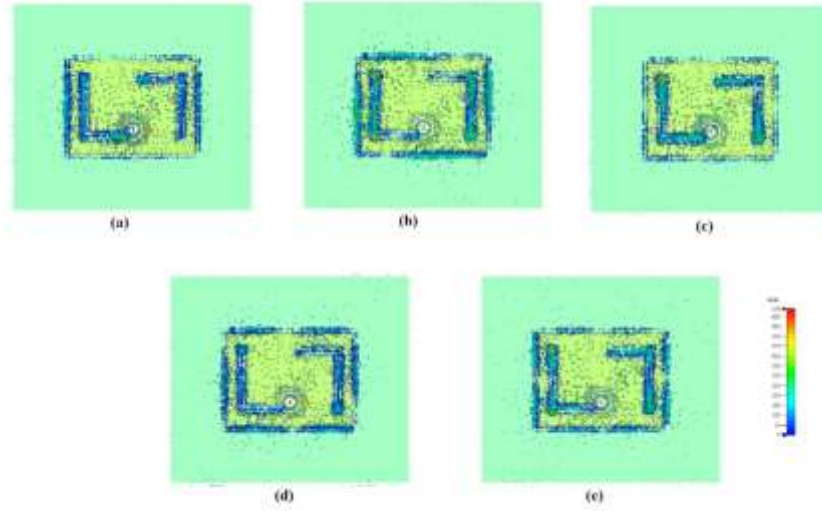
Şekil 5.31(b)'de siyah düz eğri ile gösterilen $SW1=7,0$ mm değerine ait eğri, Anten 2'nin optimize edilmiş S_{11} spektrumunu göstermektedir. Anten 2'nin nihai aşamada çalışma rezonans frekansları sırasıyla 4,56 GHz, 6,43 GHz, 6,91 GHz 9,35 GHz ve 10,86 GHz olarak belirlenmiştir. Simüle edilen spektrum büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri Çizelge 5.9'da sunulmuştur.

Çizelge 5.9 Anten 2'nin simüle edilen rezonans frekansları, S_{11} büyüklük ve % cinsinden görel BG değerleri

Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	BG (%)
4,56	-27,23	2,19
6,43	-21,95	1,24
6,91	-10,42	0,43
9,35	-13,18	1,50
10,86	-24,18	4,33

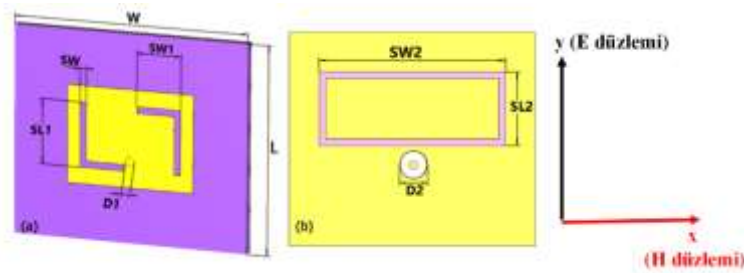
Anten 2 konfigürasyonu için rezonans frekansların yüzey akım dağılımları Şekil 5.32'de verilmiştir. İlk rezonans yamadan kaynaklanmaktadır. Yamanın temel rezonansı başlangıçta 5 GHz civarındayken, yamaya eklenen iki adet simetrik L-şekilli slot, yüzey akımının izlediği etkin elektriksel yol uzunluğunu artırmıştır. Bu nedenle rezonans koşulu daha düşük bir frekansta sağlanmış ve temel rezonans 4,56 GHz'e kaymıştır. Slotlar boyunca yoğunlaşan yüzey akımı, frekans düşüşünün temel nedeninin slot kaynaklı elektriksel uzama olduğunu göstermektedir. 6,43 GHz, 9,35 GHz ve 10,86 GHz rezonanslarında yüzey akımının hem L-slotlar hem de yama kenarlarında yoğunlaşması, bu frekansların slot-yama bağlaşımlı yüksek mertebe modlar tarafından oluşturulduğunu göstermektedir (Şekil 5.32 (a), (b), (d) ve (e)). Bu rezonanslarda akım yalnızca tek bir yapı elemanına hapsolmayıp, slotların oluşturduğu ek elektriksel yollar ile yama kenar modlarının birlikte uyandırılması sonucu ortaya çıkmıştır.

6,91 GHz rezonansında yüzey akımının ağırlıklı olarak yamadaki L-şekilli slotun uçları ve çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 5.32 (c)). Koaksiyel beslemeli yamada ince slotlar kullanıldığı için ϵ_{etkin} yaklaşık olarak $(\epsilon_r + 1)/2$ olarak tahmin edilmiştir. Bu yaklaşım, slot etrafındaki alanın dielektrik etkilerini göz önünde bulundurarak rezonans frekansını doğru şekilde tahmin etmemizi sağlar. Etkin dielektrik sabiti yaklaşık olarak $(\epsilon_r + 1)/2 = 2,23$ olarak alınmıştır. Bu değer kullanılarak teorik olarak 6,91 GHz rezonansı için slotun yarım kılavuz dalga çevresi ($\lambda_g/2$) yaklaşık 15,0 mm olarak bulunmuştur. Tasarlanan L şeklindeki slotun toplam elektriksel uzunluğu ($SW1 + SL1$) 17,0 mm olup, dikey ve yatay bileşenlerin birleşimi yama üzerindeki akım yollarını uzatarak 6,91 GHz frekansta rezonans sağlamaktadır. Aradaki farklılık L şeklinde slot ve yama kenar etkileri, köşe etkileri ve kapasitif kuplajlardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.32 Anten 2 konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 4,56 GHz, (b) 6,43 GHz, (c) 6,91 GHz, (d) 9,3 GHz ve (e) 10,86 GHz

Tasarımın son aşamasında (Anten 3), toprak düzlemine dikdörtgen halka şeklinde yatay uzunluğu $SW2$ ve dikey uzunluğu $SL2$ olan bir slot açılmıştır. Son aşamaya ilişkin anten konfigürasyonu Şekil 5.33’de gösterildiği gibidir. Toprak düzleminde çok kalın slotların kullanımı, mekanik dayanıklılığın azalmasına ve istenmeyen EM yayılımların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca, kalın slotlar antenin rezonans frekanslarında sapmalara ve empedans uyumsuzluklarına yol açarak performans kaybına sebep olabilir. Bu nedenle, toprak düzleminde kullanılan dikdörtgen halka slotun kalınlığı 1,0 mm olarak seçilmiştir. Koaksiyel beslemeli şekilde gösterilen bu antenin E-düzlemi yz düzlemi, H-düzlemi ise xz düzlemidir. Antenin koaksiyel beslemesi z yönü boyunca yapılmış olsa da yamadaki baskın yüzey akımları ve saçılan elektrik alan yönü incelendiğinde antenin polarizasyon yönü y yönüdür.

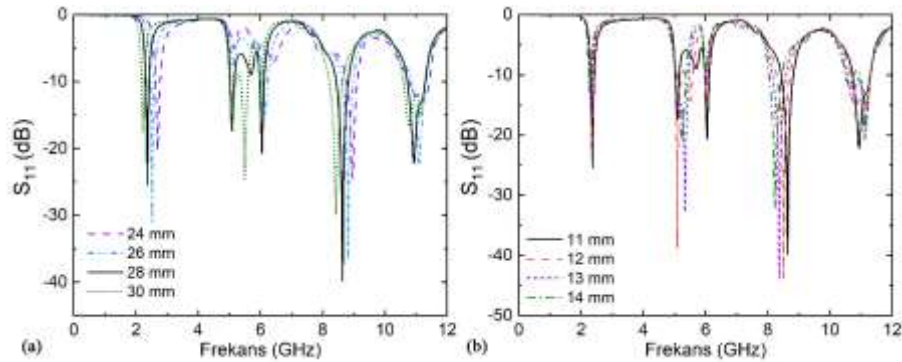


Şekil 5.33 Anten 3 yapısının (a) ön ve (b) arka yüzeyleri

Anten 3 için $SW2$ ve $SL2$ uzunluklarının S_{11} spektrumuna olan etkileri Şekil 5.34(a) ve (b)'de sunulmuştur. Şekil 5.34(a)'da görüldüğü gibi, slot genişliği ($SW2$) rezonans frekansları ve S_{11} büyüklükleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. $SW2$ değeri 28 mm olarak seçildiğinde, yaklaşık 2,36 GHz frekansında ek bir bant oluşarak antenin çalışma bant sayısı beşe çıkmıştır. Bu değer, empedans uyumu, BG, kazanç ve toplam verimlilik açısından en iyi performansı sağlamıştır. Bu sebeple, optimum $SW2$ değeri 28,0 mm olarak belirlenmiştir.

$SL2$ parametresi için gerçekleştirilen parametrik analiz sonuçları Şekil 5.34(b)'de sunulmuştur. $SL2$ değeri arttıkça, birinci ve üçüncü bantların rezonans frekanslarında kayda değer bir değişiklik görülmemekle birlikte, empedans uyumunda azalma meydana gelmektedir. En belirgin etkiler ikinci ve dördüncü bantlar üzerinde gözlemlenmiştir. $SL2$ değerinin artmasıyla birinci ve dördüncü bantlarda empedans uyumunun kötüleştiği ve birinci bandın BG'nin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, antenin beş bantta çalışması ve empedans uyumları, kazanç ve verimlilik gibi performans parametrelerinin iyileşmesi dikkate alınarak, $SL2$ değeri 11,0 mm olarak seçilmiştir.

Nihai antenin S_{11} spektrumu Şekil 5.34(b)'de verilen siyah renkte olan eğriyle temsil edilmektedir. Antenin nihai performansına göre, S, C ve X bantlarına karşılık gelen 2,36, 5,09 GHz, 6,05 GHz, 8,65 GHz ve 10,94 GHz frekanslarında sırasıyla -25,13 dB, -17,07 dB, -20,51 dB, -37,78 dB ve -20,43 dB değerleriyle beş ayrı rezonans olduğu görülmektedir.



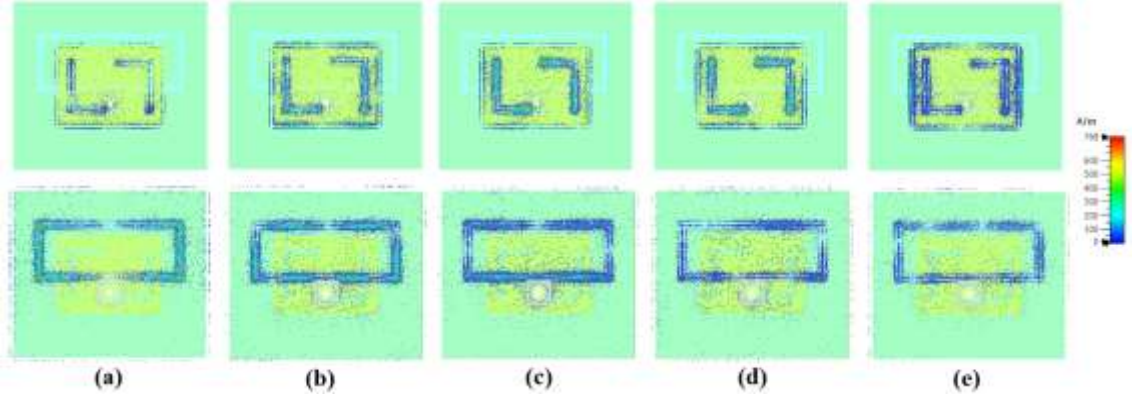
Şekil 5.34 (a) Slot genişliğinin ($SW2$) ve (b) boyunun ($SL2$) S_{11} spektrumuna olan etkileri

Anten 3 konfigürasyonu için rezonans frekansların yüzey akım dağılımları Şekil 5.35’de verilmiştir. Toprak düzlemine eklenen dörtgen halka slot ile birlikte 2,36 GHz rezonansı elde edilmiştir. Bu frekansta yüzey akımının, dörtgen halka slot boyunca uniform, düzenli ve sürekli şekilde dağıldığı görülmektedir (Şekil 5.35(a)). Bu durum rezonansın baskın olarak toprak düzlemi slotu tarafından oluşturulduğunu göstermektedir. Bu nedenle 2,36 GHz frekansı saf slot rezonansı karakteri sergilemektedir. Etkin dielektrik sabiti hesaplanan kılavuz dalga boyu:

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5.6)$$

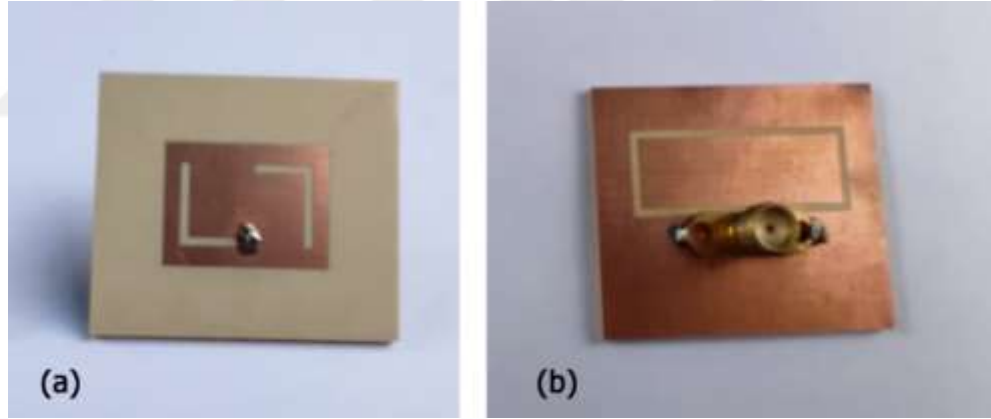
olarak hesaplanmıştır. 2,36 GHz rezonansında dörtgen halka toprak slotunun toplam uzunluğunun yaklaşık bir kılavuz dalga boyuna karşılık gelmesinin nedeni, slotun kapalı çevrim (loop) yapıda olmasıdır. Kapalı halka slotlarda rezonans koşulu, açık uçlu slotlardaki gibi yarım kılavuz dalga boyu ile değil, çevresel akımın faz sürekliliğini sağlayan tam dalga boyu ile oluşur. Buna karşılık teorik olarak hesaplanan kılavuz dalga boyu 85 mm olarak hesaplanmıştır (5.6). Dörtgen halka slotun toplam etkin elektriksel uzunluğu yaklaşık 78 mm’dir. Teorik ve tasarım değerleri arasındaki fark; slot geometrisi, köşe etkileri, yama–toprak düzlemi arasındaki elektromanyetik kuplaj ve saçaklanan alanlar nedeniyle oluşmaktadır.

Diğer mevcut olan tüm rezonans frekanslarında (Şekil 5.35(b)-(e)), yüzey akımının yalnızca yama ile sınırlı kalmadığı; toprak düzlemindeki dörtgen halka slot ve yama üzerindeki L-slot yapılarıyla birlikte dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu frekanslarda rezonanslar, tek bir geometrik elemandan değil, yama ve slot yapıları arasındaki elektromanyetik bağlaşımın ortak etkisiyle ortaya çıkmıştır. Akımın farklı frekanslarda bu elemanlar arasında baskınlık değiştirmesi, söz konusu rezonansların hibrit mod karakteri taşıdığını ve antenin çok bantlı çalışmasının temel olarak yama–slot etkileşimine dayandığını göstermektedir.



Şekil 5.35 Nihai yapı için konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 2,36 GHz, (b) 5,09 GHz, (c) 6,05 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 10,94 GHz

Bu çalışmada tasarlanan nihai koaksiyel beslemeli, slotlu yama anten, geleneksel fotolitografi ve aşındırma yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Antenin portuna, 50 Ω empedansa sahip 180C panel tipi SMA konnektör lehimlenmiştir. Önerilen anten prototipinin ön ve arka yüz fotoğrafları Şekil 5.36’da verilmiştir.



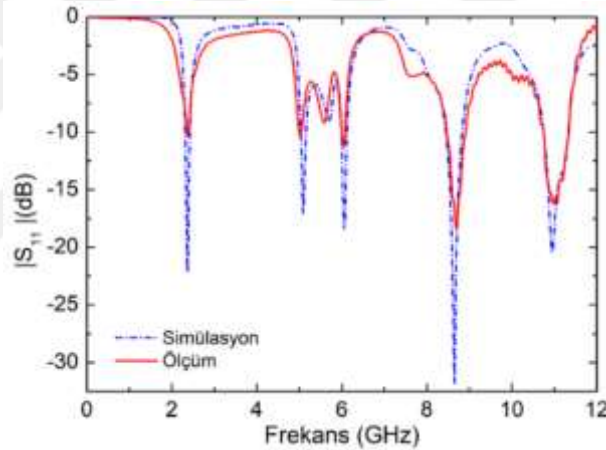
Şekil 5.36 Önerilen nihai anten prototipinin (a) ön ve (b) arka yüzeyi

Beş bandın S_{11} spektrumu, 0–12 GHz frekans aralığında VNA kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen antenin ölçülen S_{11} spektrumu, simülasyon sonucuyla karşılaştırmalı olarak Şekil 5.37’de verilmiştir.

Nihai anten; 2,37 GHz, 5,02 GHz, 6,03 GHz, 8,69 GHz ve 10,98 GHz rezonans frekanslarında, sırasıyla $-10,34$ dB, $-10,35$ dB, $-11,28$ dB, $-18,38$ dB ve $-16,17$ dB büyüklüklerinde çalışmaktadır. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarında elde edilen rezonans

frekanslarının birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, tasarım sürecinde kullanılan nümerik modelin, antenin gerçek fiziksel davranışını yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

Yapılan karşılaştırmada, simülasyon sonuçlarında elde edilen S_{11} büyüklüklerinin, ölçüm sonuçlarına kıyasla dB cinsinden daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durum, simülasyon ortamında ideal besleme koşulları, kayıpsız iletken ve homojen dielektrik kabulü gibi varsayımlardan kaynaklanmaktadır. Ölçümlerde, üretim toleransları, lehimleme etkileri, kablo ve konnektör kayıpları ile laboratuvar ortamındaki parazit yansımalar nedeniyle empedans uyumunda azalma gözlemlenmiştir. Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekans ve S_{11} genliği sonuçları, Çizelge 5.10’da verilmiştir.

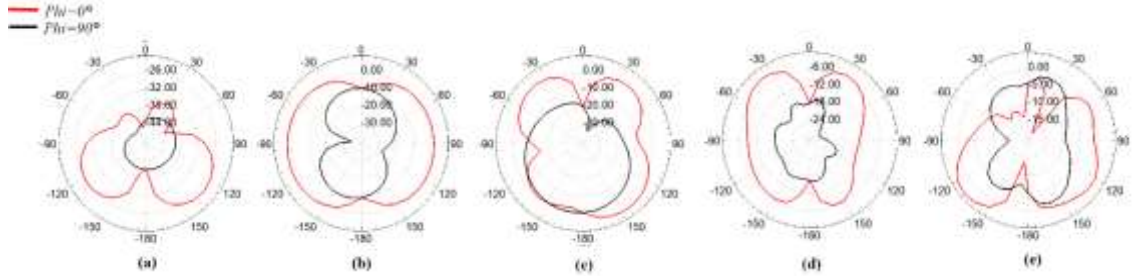


Şekil 5.37 Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması

Çizelge 5.10 Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekansları ve S_{11} büyüklük değerleri

Ölçüm		Simülasyon	
Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)
2,37	-10,34	2,36	-25,13
5,02	-10,35	5,09	-17,07
6,03	-11,28	6,05	-20,51
8,69	-18,38	8,65	-37,78
10,98	-16,17	10,94	-20,43

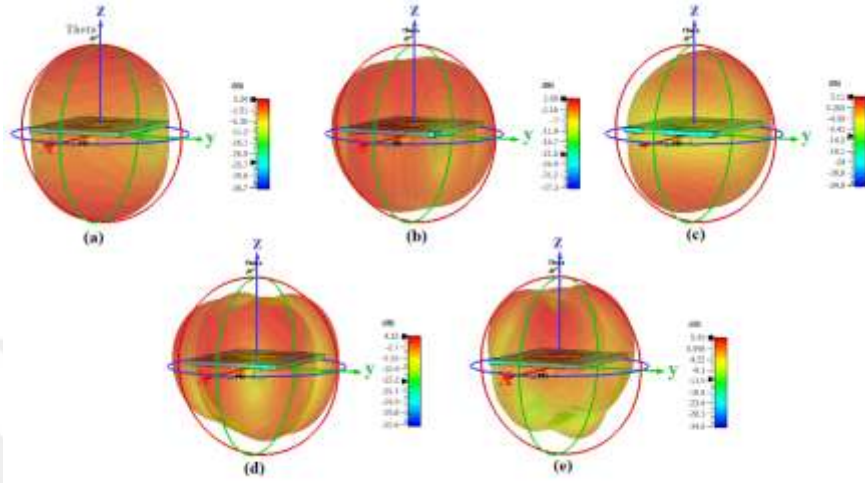
Optimize edilmiş nihai antenin simüle edilen çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri Şekil 5.38’de incelendiğinde, 2,36 GHz frekansında her iki düzlemde de düşük çapraz polarizasyon seviyeleri elde edildiği ve antenin baskın doğrusal polarizasyon karakterini koruduğu görülmektedir. 5,13 GHz frekansında $\varphi = 0^\circ$ kesitinde sınırlı açılarda zayıf çapraz polarizasyon lobları oluşmaya başlarken, $\varphi = 90^\circ$ kesitinde daha düzgün bir dağılımın sürdüğü gözlemlenmiştir. 6,09 GHz frekansında her iki düzlemde de çapraz polarizasyon seviyelerinde belirgin bir artış ve örüntü simetrisinde azalma meydana gelmiş olup, bu durum yama, slot yapıları ve prob beslemenin birlikte uyarılması sonucu ortaya çıkan hibrit modlara bağlanabilir. 8,68 GHz frekansında antenin artan elektriksel boyutu nedeniyle yüksek mertebeden modların baskın hâle geldiği, buna bağlı olarak çapraz polarizasyon örüntüsünün daha karmaşık ve çok loblu bir yapı sergilediği görülmektedir. 10,86 GHz frekansında ise çapraz polarizasyon seviyeleri her iki düzlemde de 8,65 GHz frekansıninkine göre azalmıştır. Antenin toprak düzleminde dikdörtgen şeklinde bir slot olmasının antenin çapraz polarizasyon karakteristiğini olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmiştir.



Şekil 5.38 Simüle edilen çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri: (a) 2,36 GHz, (b) 5,09 GHz, (c) 6,05 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 10,94 GHz

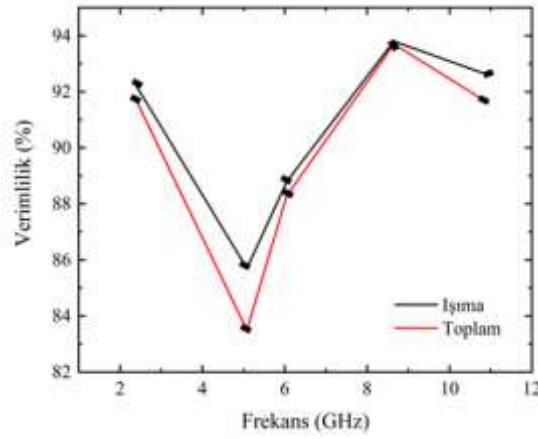
Antenin nihai yapısı için elde edilen beş rezonans frekansında 3 boyutlu maksimum kazanç değerleri incelenmiştir. Şekil 5.39’da sunulan 3B maksimum kazanç dağılımlarından sırasıyla 3,34 dBi, 2,69 dBi, 5,11 dBi, 4,15 dBi ve 5,45 dBi tepe kazançları elde edilmiş olup, ortalama kazanç değeri yaklaşık 4,15 dBi’dir. Bu dağılımlar aynı zamanda antenin uzaysal ışıma örüntüsünü temsil etmekte ve özellikle yüksek frekans bantlarında yan lobların oluştuğu görülmektedir. Çok loblu bu ışıma karakteri; çok bantlı çalışma, slotların neden olduğu karmaşık akım dağılımları ve koaksiyel beslemenin asimetric etkileri ile ilişkilidir. Bununla birlikte, yan loblar ana lobu

baskılamamakta ve antenin tüm bantlar boyunca kararlı bir ışıma performansı sunduğunu göstermektedir. Fakat antenin frekanslara bağlı olarak ana lob yönlerinin değişiklik gösterebilmesi pratik uygulamalar açısından bir dezavantaj olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.39 Antenin (a) 2,36 GHz, (b) 5,09 GHz, (c) 6,05 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 10,94 GHz frekanslarındaki 3B uzak alan ışıma karakteristikleri

Önerilen antenin rezonans frekanslar baz alınarak simüle edilen ışıma verimliliği ve toplam verimlilik spektrumları Şekil 5.40’da gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre antenin ışıma verimliliği sırasıyla %92,3, %85,7, %88,8, %93,8 ve %92,6 olup, ortalama ışıma verimliliği %90,6 olarak hesaplanmıştır. Toplam verimlilik ise sırasıyla %91,8, %83,5, %88,3, %93,7 ve %91,6 değerlerinde olup, ortalama toplam verimlilik %89,8 olarak elde edilmiştir. Bu ortalama değerler, anten tasarımının nispeten yüksek verimli olarak çalıştığını göstermektedir.



Şekil 5.40 Önerilen antenin ışıma ve toplam verimlilik spektrumları

Çizelge 5.11 incelendiğinde, literatürde sunulan antenlerin genellikle sınırlı bant sayısına sahip olduğu ve çoğunun 2–4 bant arasında çalıştığı görülmektedir. Fadamiro vd. (2019) ve Ali vd. (2018) orta boyutlu tasarımlar sunarken bant sayıları görece düşüktür. Sathishkumar vd. (2024) ve Tan vd. (2023) çalışmalarında boyutlar büyürken bant genişliklerinin daraldığı dikkat çekmektedir. Moklal vd. (2018) ise kompakt bir anten önermiş ancak kazanç değerleri düşük kalmıştır. Buna karşılık bu çalışma, daha küçük bir anten hacmi ile beş bantlı çalışma, geniş bant genişlikleri ve çoğu bantta iyi kazanç değerleri sunarak literatürdeki birçok çalışmaya göre işlevsellik açısından avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, bazı bantlarda literatürdeki en yüksek kazanç değerlerine ulaşamamış olsa da anten boyutu–bant sayısı–performans dengesi göz önünde bulundurulduğunda önerilen tasarımın daha bütüncül bir iyileşme sunduğu ve GNSS, WLAN, WiMAX ve 5G NR gibi çok bantlı modern kablosuz iletişim uygulamaları için oldukça uygun bir anten çözümü oluşturduğu görülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen 2,36 GHz, 5,09 GHz, 6,05 GHz, 8,65 GHz ve 10,94 GHz rezonans frekansları sırasıyla S, C ve X bantlarını kapsamaktadır. S bandı genellikle GSM, Wi-Fi, Bluetooth ve kısa/orta menzilli radar uygulamalarında kullanılarak geniş kapsama alanı ve iyi yayılım özellikleri sunar. C bandı; WiMAX, WLAN, uydu haberleşmesi ve meteorolojik radar sistemlerinde tercih edilmekte olup, bant genişliği ile veri hızı arasında dengeli bir performans sağlamaktadır. X bandı ise daha yüksek frekanslı yapısı sayesinde askeri radarlar, hava savunma sistemleri, yüksek çözünürlüklü

görüntüleme ve uydu haberleşmesi gibi uygulamalarda kullanılmakta, özellikle yüksek kazanç ve daha dar huzme genişliği gerektiren sistemler için avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 5.11 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması

Diğer çalışmalar	Bant sayısı	Anten boyutu (mm ³) (λ_0^3)	Rezonans frekansı (GHz)	Empedans BG (GHz)	Kazanç (dBi)
Fadamiro vd., 2019	3	$35 \times 30 \times 1,2$ $0,28 \times 0,24 \times 0,0096$	2,40/5,03/ 8,67	0,08/0,12/ 0,22	1,63/1,38/ 2,95
Ali vd., 2018	4	$28 \times 30 \times 1,6$ $0,15 \times 0,16 \times 0,0085$	1,6/2,5/5,8/ 9,5	0,10/ 0,30/ 0,20/0,60	1,6/2,5/5,8/ 9,5
Sathishkumar vd., 2024	2	$50 \times 50 \times 1,6$ $0,42 \times 0,42 \times 0,013$	2,5/3,5	0,11/0,17	4,72/5,31
Tan vd., 2023	3	$60 \times 60 \times 0,6$ $0,37 \times 0,37 \times 0,0037$	1,85/2,3/ 3,38	0,01/0,02/0,02	4,1/2,12/ 3,21
Mokal vd., 2018	4	$46 \times 38 \times 3,2$ $0,28 \times 0,2 \times 0,019$	1,81/2,44/ 3,50/5,24	0,04/0,10/ 0,08/0,12	0,68/4,51/ 2,88/2,01
Bu çalışma	5	$37 \times 32 \times 1,524$ $0,29 \times 0,25 \times 0,012$	2,36/5,09/ 6,05/8,65/ 10,94	0,12/0,13/ 0,13/0,38/ 0,58	3,34/2,69/ 5,11/4,15/ 5,45

5.2.1 Koaksiyel beslemeli yama anten tasarım kılavuzu

Dörtgen yamaya sahip koaksiyel beslemeli antenin tasarım aşamaları bir kılavuz niteliğinde aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Bu sayede, anten rezonanslarının oluşumunda etkili olan fiziksel etkileşimler ile bu rezonansların hangi parametreler aracılığıyla kontrol edildiği sistematik bir biçimde açıklanmaktadır.

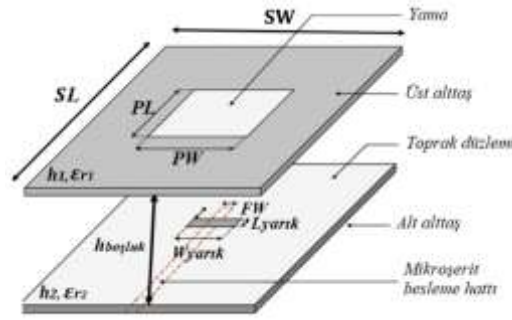
1. Başlangıç rezonansı, koaksiyel beslemeli mikroşerit yama antenler için Bölüm 3'te verilen klasik tasarım bağıntıları esas alınarak, yaklaşık 5 GHz civarında olacak şekilde belirlenmiştir. Bu ilk adım, antenin S, C ve X bantlarını kapsayan çok bantlı bir yapı elde etmesine yönelik temel rezonans frekansını oluşturmaktadır.
2. Antende çoklu rezonans modlarının oluşabilmesi amacıyla, yama üzerine birbirine ters simetrik (180° faz ilişkili) ve eş uzunlukta iki adet L-şekilli slot yerleştirilmiştir. Bu slot yapıları, yamada birden fazla etkin akım yolu meydana

getirerek antenin çok bantlı karakterini kontrollü bir biçimde uyarmaktadır. *L*-şekilli slotların yama kenarlarına yakın konumlandırılmasıyla, özellikle yüksek frekanslarda kenar akımlarının etkinliği artırılmış ve üst bant rezonanslarının oluşumu desteklenmiştir. Bu yerleşim sonucunda, yama ile *L*-şekilli slotlar arasındaki elektromanyetik etkileşim güçlenmiş ve yama–slot etkileşimine dayalı hibrit rezonans modları ortaya çıkmıştır.

3. Daha düşük frekanslı ilave bir rezonans elde edebilmek amacıyla, toprak düzlemine kapalı dikdörtgen halka slot eklenmiştir. Bu halka slotun toplam çevresi, S bandında (yaklaşık 2,4 GHz rezonansı) olacak şekilde kılavuz dalga boyuna göre boyutlandırılmıştır. Toprak düzlemine eklenen bu yapı, aynı zamanda yama ve yama üzerindeki slotlarla düşük düzeyde elektromanyetik bağlaşım oluşturarak mevcut rezonans frekanslarında frekans kaymalarına neden olmuştur.

5.3 Çok Bantlı, Açıklık Bağlaşımlı Yama Antenin Sayısal ve Deneysel Analizi

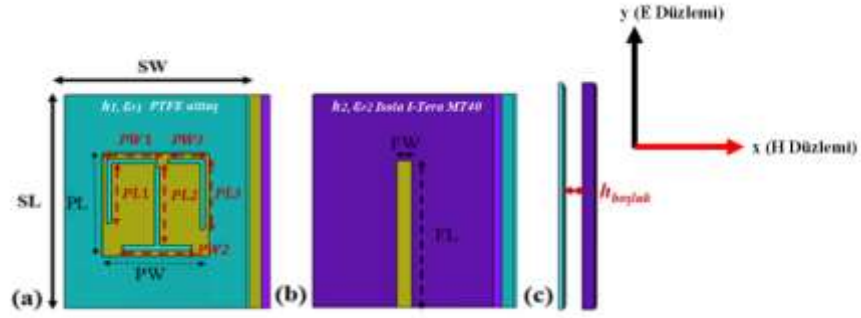
Tezin son çalışması olarak, dört bantlı, açıklık bağlaşımlı beslemeli slotlu bir mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Genel bir açıklık bağlaşımlı beslemeli yama antenin şematik gösterimi Şekil 5.41’de gösterilmiştir. Üst alttaş olarak 0,5 mm kalınlığında (h_1) ve dielektrik sabitinin gerçel kısmı $\epsilon_{r1}=2,2$, kayıp tanjanı $\tan\delta_1=0,003$ olan PTFE (Teflon) kullanılmış, alttaki alttaş olarak 1,524 mm kalınlığında (h_2) ise $\epsilon_{r2}=3,45$ ve $\tan\delta_2=0,0031$ değerlerine sahip Isola I-Tera MT40 tercih edilmiştir. Antende teflon alttaş ile Isola I-Tera MT40’ın toprak düzlemi arasında 2,5 mm kalınlığında ($h_{boşluk}$) bir hava boşluğu oluşturulmuştur.



Şekil 5.41 Açıklık bağlaşımlı temel antenin şematik gösterimi

Alttaşı boyutları genişlik yönünde 40,0 mm, uzunluk yönünde 36,0 mm olarak belirlenmiştir. Antende kullanılan yama ise genişliği 22,0 mm ve uzunluğu 17,0 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Mikroşerit besleme hattının uzunluğu 25 mm olarak belirlenmiş olup, genişliği ise 50Ω empedans uyumunu sağlamak amacıyla yapılan parametrik tarama sonucu 3,25 mm olarak ayarlanmıştır. Toprak düzleminin merkezinde yer alan yarık, antenin 6,0 GHz'deki rezonans frekansına karşılık gelip uzunluğu ($W_{yarık}$) yaklaşık yarım kılavuz dalga boyunda olacak biçimde 16,0 mm olarak ayarlanmıştır. Yarık genişliği ($L_{yarık}$), parametrik tarama sonuçlarına göre 1,0 mm olarak belirlenmiştir.

Anten parametreleri bakımından optimize edilmiş nihai açıklık bağlaşımlı slotlu yama antenin şematik gösterimi geometrik parametreleri ile beraber Şekil 5.42'de sunulmuş olup bu parametrelerin değerleri Çizelge 5.12'de sunulmuştur. Önerilen açıklık bağlaşımlı anten yapısı düzlemsel bir geometriye sahip olup ana ışıma yönü z-ekseni boyunca gerçekleşmektedir. Anten yapısının geometrik düzeni ve besleme konfigürasyonu dikkate alındığında baskın elektrik alan bileşeninin y-yönünde olduğu ve antenin doğrusal y-polarizasyonlu çalıştığı kabul edilmektedir. Buna bağlı olarak, E-düzlemi yz düzlemi, H-düzlemi ise xz düzlemi olarak tanımlanmıştır. Şekil üzerinde bu düzlemlerin yatay izdüşümleri sırasıyla y (E-düzlemi) ve x (H-düzlemi) eksenleri ile gösterilmiştir. Açıklık bağlaşımlı antenin polarizasyon yönü baskın elektrik alan yönü olan y yönüdür.

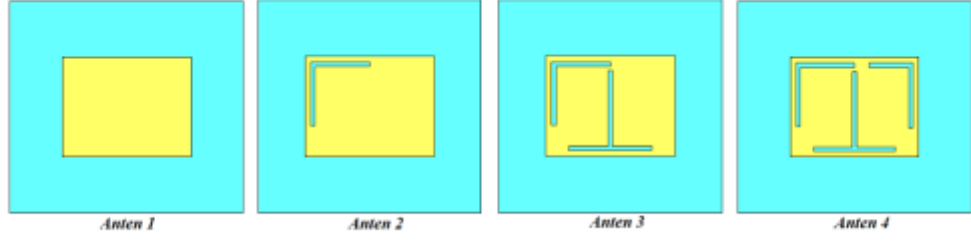


Şekil 5.42 Nihai açıklık bağlaşımlı beslemeli yama anten tasarım konfigürasyonunun (a) ön ve (b) arka yüzeylerinin şematik görünüşleri

Çizelge 5.12 Nihai antenin optimize edilmiş geometrik boyutları

Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
SW	40	$W_{yarık}$	16
SL	36	$L_{yarık}$	1,0
PL	17	FW	3,25
PW	22	FL	25
h_1	0,5	h_2	1,524
$h_{boşluk}$	2,5	ϵ_{r1}	2,2
ϵ_{r2}	3,45	PW1	10,0
PL1	10,0	PW2	14,0
PL2	12,7	PW3	7,5
PL3	11,0	t	0,75

Önerilen anten tasarımı dört aşamada gerçekleştirilmiştir ve tasarım aşamaları Şekil 5.43’de gösterilmiştir. Anten 1, temel bir açıklık bağlaşımlı yama anteni göstermektedir. Antenin Üst ve alt alttaşlar arasındaki dielektrik boşluk ($h_{boşluk}$) 2,5 mm olarak ayarlanmıştır. Anten 2’de yamanın sol üst köşesine ters L şeklinde bir slot eklenmiş ve slot boyutları optimize edilmiştir. Üçüncü aşamada ise yamanın alt kısmına ters T şeklinde bir slot eklenmiş, parametrik taramalar ile nihai geometrik boyutları elde edilmiştir. Son aşamada ise yamanın sağ üst köşesine ters L şeklinde bir slot daha eklenmiş ve tüm slot boyutları optimize edildikten sonra nihai yapı (Anten 4) elde edilmiştir. Slotların ardışık olarak eklenmesiyle antenin akım yolu değiştirilmiş, yama üzerindeki akım dağılımı farklı rezonansları uyuracak biçimde yeniden düzenlenmiştir. Bu sayede anten yüksek performansla beş bantta çalışabilir hâle getirilmiştir.



Şekil 5.43 Önerilen anten yapısının tasarım aşamaları

Toprak düzleminde yer alan dörtgen açıklık slotunun uzunluğu ($W_{yarık}$), antenin istenilen çalışma frekansına karşılık gelen kılavuz yarım kılavuz dalga boyu esas alınarak belirlenmektedir. Bu tasarımda antenin temel rezonans frekansı 6 GHz olarak seçilmiştir. Anten yapısında farklı kalınlık ve dielektrik sabitlerine sahip üç ayrı alttaş kullanıldığından, etkin dielektrik sabiti; katmanların kalınlıkları ve dielektrik sabitlerinin ortalama etkisi dikkate alınarak Buna karşılık teorik olarak hesaplanan kılavuz tam dalga boyu 85 mm olarak hesaplanmıştır (5.7) ve (5.78) yardımıyla hesaplanmış. Toprak düzleminin üst kısmında yer alan teflon ve hava katmanları birlikte değerlendirilerek üst ortam için etkin dielektrik sabiti $\epsilon_{r1_üstort}$ hesaplanmıştır. Daha sonra, toprak düzleminin altında bulunan tek katmanlı alttaş olan Isola Tera MT40'ın dielektrik özellikleri dikkate alınmış ve üst ortam ile alt alttaşın ortalama etkisi alınarak antenin etkin dielektrik sabiti (ϵ_{etkin}) 1,96 olarak belirlenmiştir.

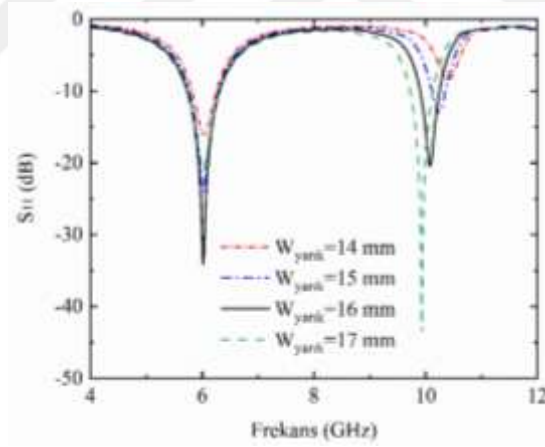
$$\epsilon_{r1_üstort} = \frac{\epsilon_{r1} \times h_1 + \epsilon_{rboşluk} \times h_{boşluk}}{h_1 + h_{boşluk}} \quad (5.7)$$

$$\epsilon_{etkin} = \frac{(h_1 + h_{boşluk}) \times \epsilon_{r1_üstort} + h_2 \times \epsilon_{r2}}{h_{üst} + h_2} \quad (5.8)$$

Daha sonra elde edilen etkin dielektrik sabiti dikkate alınarak (5.1) yardımıyla, 6 GHz çalışma frekansı için açıklık slotunun uzunluğu ($W_{yarık}$) yaklaşık 16 mm olarak hesaplanmış (5.9), slot genişliği ise bağlaşım seviyesini uygun şekilde sağlayacak biçimde 1.0 mm olarak seçilmiştir.

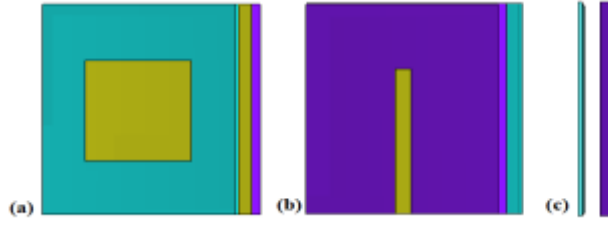
$$\lambda_g/2 = \frac{c}{2 \times f \times \sqrt{\epsilon_{etkin}}} \quad (5.9)$$

Şekil 5.44’de, toprak düzlemindeki açıklık slotunun (W_{yark}) S_{11} spektrumu üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Slot genişliği, besleme hattı ile yama arasındaki elektromanyetik kuplajı belirleyen kritik bir parametredir. Slot genişliği 14–17 mm aralığında incelendiğinde, 16 mm değerinde empedans uyumunun en iyi seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu genişlikte yamaya aktarılan elektromanyetik enerjinin maksimuma ulaşması ve giriş empedansının 50Ω ’a en yakın değeri almasıyla açıklanabilir. Daha dar slot genişliklerinde elektromanyetik bağlaşım yetersiz kalırken, daha geniş değerlerde aşırı bağlaşım nedeniyle slotun kendi rezonans etkisi baskın hâle gelmekte; bu durum giriş empedansının karmaşıklaşmasına ve empedans uyumunun bozulmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, 16 mm slot genişliği, kuplaj etkinliği ile empedans eşleşmesi arasında optimum dengeyi sağlayan ideal değer olarak belirlenmiştir.



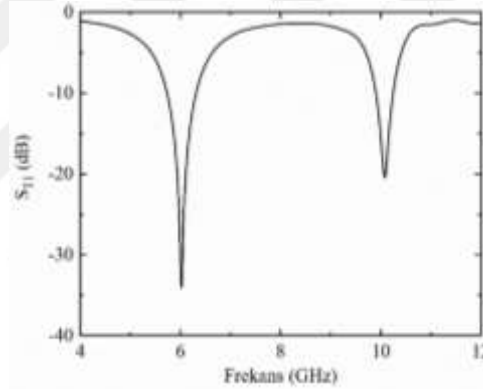
Şekil 5.44 Açıklık slotun uzunluğunun (W_{yark}) S_{11} spektrumuna etkisi

Anten 1, açıklık bağlaşımli yama antenin temel konfigürasyonunu oluşturmaktadır. Tasarım süreci, dikdörtgen biçimindeki yamaya sahip bu temel yapı Şekil 5.45’de gösterildiği gibi başlamaktadır.



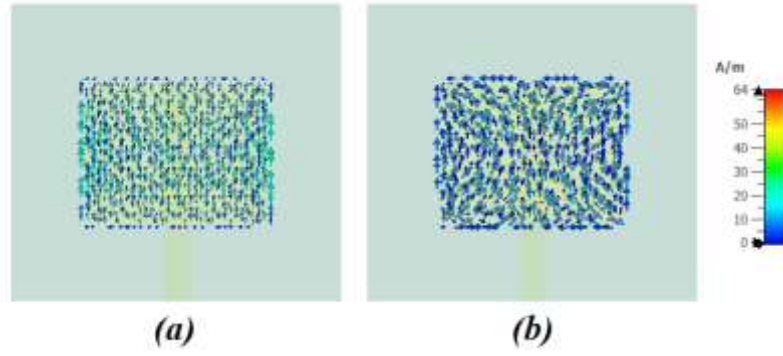
Şekil 5.45 Anten 1 konfigürasyonu: (a) Üst, (b) alt ve (c) yandan görünümü

Anten 1 yapısına ait simülasyon sonucu hesaplanan S_{11} büyüklükleri Şekil 5.46’da verilmiştir. Anten, 6,02 GHz ve 10,08 GHz frekanslarında sırasıyla $-34,08$ dB ve $-20,44$ dB değerlerinde iki rezonans göstermektedir. İkinci rezonans yama profilinden ziyade açıklık ve besleme hattı arasındaki bağlaşımdan kaynaklanmaktadır. Her iki rezonans için -10 dB BG değerleri sırasıyla 0,58 GHz ve 0,35 GHz olarak elde edilmiştir.



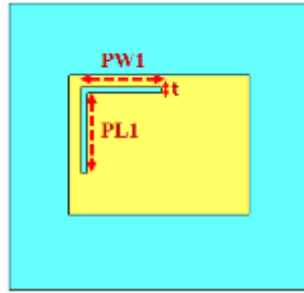
Şekil 5.46 Açıklık bağlaşımlı yama antenin temel yapısına ait simüle edilen S_{11} spektrumu

Anten yapısında teflon alttaş ve toprak düzlemi arasına eklenen 2,5 mm kalınlığındaki hava boşluğu, etkin dielektrik sabitini düşürerek yüzey akımının yama yüzeyi yerine ağırlıklı olarak yama kenarlarında yoğunlaşmasına neden olmuştur (Şekil 5.47). Bu durum, ışıma mekanizmasının kenar etkileri üzerinden gerçekleşmesini sağlamıştır. Yama kenarlarında yoğunlaşan bu elektrik alanları etkin biçimde uyarmak ve farklı akım yolları oluşturarak çok bantlı çalışmayı desteklemek amacıyla, slot yapıları yama kenarlarına yaklaşık 1 mm mesafede konumlandırılmıştır.



Şekil 5.47 Anten 1 konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 6,02 GHz ve (b) 10,08 GHz

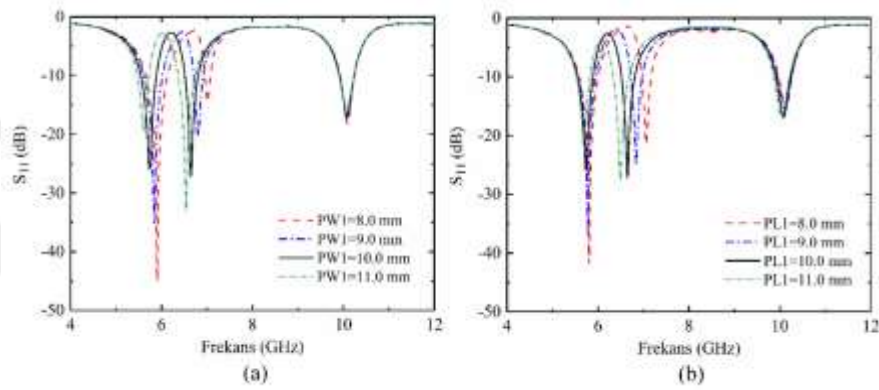
Anten 2 konfigürasyonu Şekil 5.48’de gösterilmiştir. Yamanın sol üst kısmına, yatay uzunluğu $PW1$ ve dikey uzunluğu $PL1$ olan ters L şeklinde bir slot eklenmiştir. Yamanın üzerinde bulunan tüm slotların genişliği (t) parametrik tarama yöntemiyle optimize edilerek 0,75 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.48 Anten 2 konfigürasyonu

Farklı $PW1$ ve $PL1$ değerlerinin S_{11} spektrumu üzerindeki etkisi Şekil 5.49(a) ve (b) ’de, gösterilmiştir. İlk olarak slotun $PW1$ değeri, 8,0 mm ile 11,0 mm arasında 1,0 mm artışlarla değiştirilerek parametrik tarama gerçekleştirilmiştir. Slotun eklenmesiyle birlikte, grafiklerde de görüldüğü üzere, farklı $PW1$ değerleri için 6,5–7,0 GHz aralığında frekans konumu değişen yeni bir rezonans oluşmuştur. $PW1$ değeri arttıkça ilk iki bandın rezonans frekanslarının azaldığı, birinci bandın empedans uyumunun azaldığı, ikinci bandının ise iyileştiği gözlemlenmiştir. Buna karşın üçüncü bandın rezonans frekansı ve S_{11} büyüklükleri belirgin bir değişim göstermemiştir; çünkü açıklık ve besleme hattı arasındaki bağlaşımda değişim olmamıştır. İlk iki bandın BG değerleri ve S_{11} büyüklükleri dikkate alınarak $PW1$ değeri 10,0 mm olarak belirlenmiştir.

Daha sonra $PL1$ değeri, 8,0 mm ile 11,0 mm arasında 1,0 mm artışlarla değiştirilmiştir. Şekil 5.49(b)'de görüldüğü üzere, $PL1$ üçüncü rezonansı etkilemezken, ilk iki bandın rezonans frekansları azalmaktadır. Ayrıca birinci bandın empedans uyumu azalırken, ikinci bandın empedans uyumu iyileşmektedir. İlk iki bandın BG değerleri ve S_{11} büyüklükleri dikkate alınarak $PL1$ değeri 10,0 mm olarak seçilmiştir. Şekil 5.49(b)'de siyah düz eğri ile gösterilen 10,0 mm değeri, Anten 2'nin optimize edilmiş S_{11} spektrumunu göstermektedir.



Şekil 5.49 (a) $PW1$, (b) $PL1$ parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi

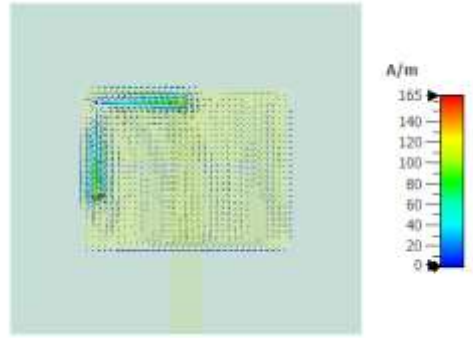
$PW1$ ve $PL1$ genişlikleri sırasıyla 10,0 mm olarak belirlendikten sonra, antenin simüle edilen spektrumu büyüklük ve % cinsinden görel BG değerleri Çizelge 5.13'de sunulmuştur. Anten 2'nin optimize edilmiş yapısı, 5,74 GHz, 6,64 GHz ve 10,08 GHz frekanslarında rezonans göstermektedir.

Çizelge 5.13 Anten 2'ye ait simüle edilen S_{11} büyüklük ve % cinsinden görel BG değerleri

Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	BG (%)
5,74	-25,92	5,92
6,64	-27,13	4,52
10,08	-16,93	3,17

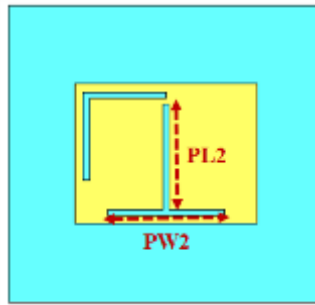
Anten 2 konfigürasyonu için rezonans frekansların yüzey akım dağılımları Şekil 5.50'de gösterilmiştir. Yamanın sol tarafına ters biçimde eklenen L-şekilli slot ile yapı iki farklı rezonans frekansı üretmiştir. Slot eklenmesiyle birlikte, uzayan etkin akım yolu nedeniyle

temel rezonans frekansı 5.74 GHz'e kayarken, slot geometrisinin baskın hâle geldiği ikinci rezonans 6.64 GHz'te oluşmuştur. Yüzey akım dağılımı incelendiğinde 6.64 GHz frekansında akım yoğunluğunun ağırlıklı olarak L-slotun uçları ve kenarları arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu rezonans için etkin dielektrik sabiti 1.96 kabul edildiğinde teorik olarak hesaplanan yarım kılavuz dalga boyu 20.65 mm olarak hesaplanmış ve yüzey akım dağılımından elde edilen etkin fiziksel uzunluğun ($PW1 + PL1 \approx 20.75$ mm) bu değerle yüksek uyum gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.50 Anten 2 yapısı için 6.64 GHz rezonans frekansı için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımı

Anten 3 konfigürasyonu Şekil 5.51'de gösterilmiştir. Yama yapısının alt bölümüne, yatay uzunluğu $PW2$ ve dikey uzunluğu $PL2$ olacak şekilde ters T biçiminde bir slot eklenmiştir.

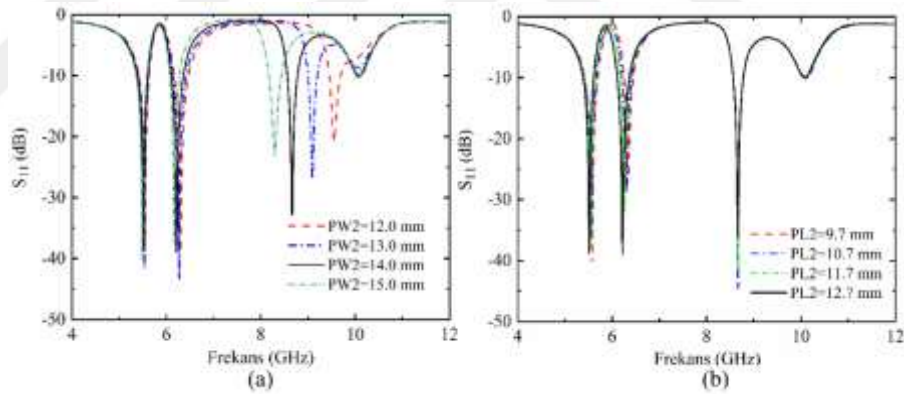


Şekil 5.51 Anten 3 konfigürasyonu

Anten 3 için $PW2$ ve $PL2$ uzunluklarının S_{11} spektrumuna olan etkileri Şekil 5.52(a) ve (b)'de sunulmuştur. İlk olarak, $PW2$ yatay uzunluğu 12,0–15,0 mm aralığında değiştirilmiştir. Yama üzerine eklenen ters T şeklindeki slotun farklı boyutlardaki $PW2$

ve $PL2$ değerlerinde rezonans frekansı 8,1–9,5 GHz aralığında değişen dördüncü bir rezonans oluşmaktadır. $PW2$ değeri, birinci bant özelliklerinde neredeyse hiçbir etkide bulunmamaktadır. $PW2$ değeri arttıkça, ikinci bantın rezonans frekansı ve S_{11} büyüklükleri küçük ölçüde değişmekte, buna karşın BG azalmaktadır. Tüm bantların S_{11} büyüklükleri ve BG değerleri ile birlikte değerlendirildiğinde, $PW2$ uzunluğu için en uygun değer 14,0 mm olarak belirlenmiştir.

$PW2$ uzunluğu 14,0 mm olarak belirlendikten sonra, $PL2$ değeri 9,7 mm ile 12,7 mm aralığında değiştirilmiştir. $PL2$ uzunluğu, üçüncü ve dördüncü bantları neredeyse hiç etkilemezken, ilk iki bantın (özellikle ikinci bantın) BG üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. İlk iki bantın rezonanslarının hem S_{11} büyüklükleri hem de BG açısından yeterli düzeyde elde edilmesi amacıyla, $PL2$ uzunluğu 12,7 mm olarak seçilmiştir. Şekil 5.52(b)'de siyah düz eğri ile gösterilen $PL2=12,7$ mm değeri, Anten 3 için optimize edilmiş S_{11} spektrumunu göstermektedir.



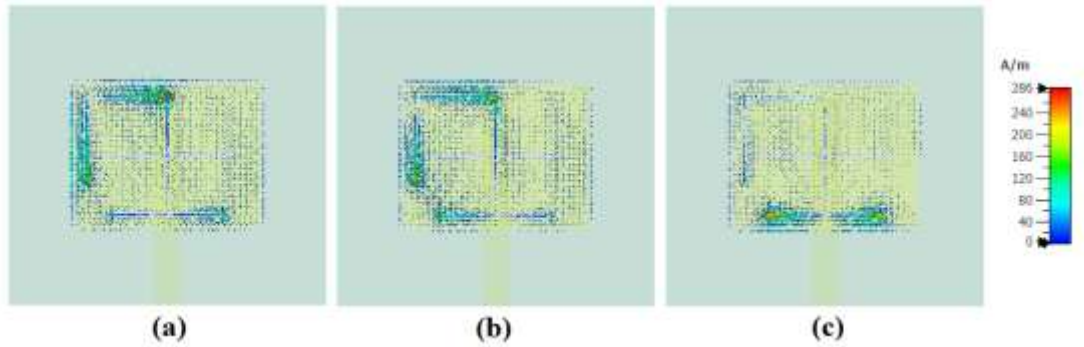
Şekil 5.52 (a) $PW2$, (b) $PL2$ parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi

$PW2$ ve $PL2$ genişlikleri sırasıyla 14,0 mm ve 12,7 mm olarak belirlendikten sonra, antenin rezonanslarının S_{11} büyüklükleri ve % cinsinden görelî BG değerleri Çizelge 5.14'de sunulmuştur. Optimize edilmiş Anten 3 yapısı, 5,51 GHz, 6,21 GHz, 8,67 GHz ve 10,09 GHz frekanslarında rezonans göstermektedir.

Çizelge 5.14 Anten 3'e ait simüle edilen S_{11} büyüklük ve % cinsinden görelî BG değerleri

Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	BG (%)
5,51	-38,78	3,99
6,21	-38,92	4,19
8,67	-36,37	2,42
10,09	-9,98	-

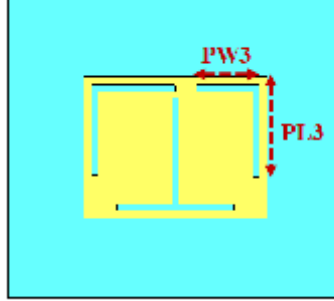
Anten 3 konfigürasyonu için rezonans frekansların yüzey akım dağılımları Şekil 5.53'de verilmiştir. Yamaya ikinci bir slotun ters T biçiminde eklenmesiyle birlikte, mevcut rezonans frekansları daha düşük frekanslara kaymış ve buna ek olarak 8,67 GHz'de üçüncü bir çalışma bandı elde edilmiştir. Yüzey akım dağılımı incelendiğinde, bu frekansta akım yoğunluğunun baskın olarak T -slotun yatay kolu ($PW2$) üzerinde yoğunlaştığı, L -slotun uç bölgelerinde ise düşük düzeyde akım birikimi olduğu gözlemlenmiştir. Bu bant için teorik yarım kılavuz dalga boyu ($\lambda_g/2$) yaklaşık 16 mm olarak hesaplanmasına karşın, yüzey akım dağılımından elde edilen etkin akım uzunluğunun ($PW2$) yaklaşık 14 mm olması; saçak alan etkileri, slotlar arası elektromanyetik bağlaşım ve açıklık bağlaşımli besleme yapısının neden olduğu alan yoğunlaşmaları ile açıklanmaktadır. Elde edilen bulgular, 8,67 GHz'deki baskın rezonansın esas olarak T -slotun yatay kolundan kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 5.53 Anten 3 konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 5,51 GHz, (b) 6,21 GHz ve (c) 8,67 GHz

Tasarım sürecinin son aşamasında (Anten 4), yamanın sağ üst kısmına, yatay uzunluğu $PW3$ ve dikey uzunluğu $PL3$ olarak belirlenen ikinci bir ters L şeklinde slot eklenerek yeni bir akım yolu oluşturulmuş; bu sayede hem yeni bir rezonans eklenmiş hem de 10 GHz'deki rezonansın S_{11} büyüklüğü -10 dB seviyesinin üzerine çıkarılarak

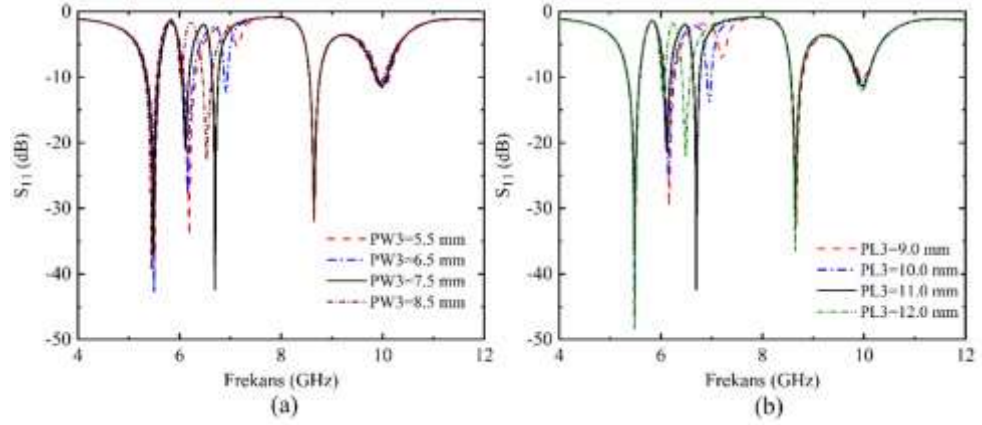
iyileştirilmiştir. Şekil 5.54’de, açıklık bağlaşımlı antenin yamasının nihai yapısı sunulmuştur.



Şekil 5.54 Anten 4 konfigürasyonu

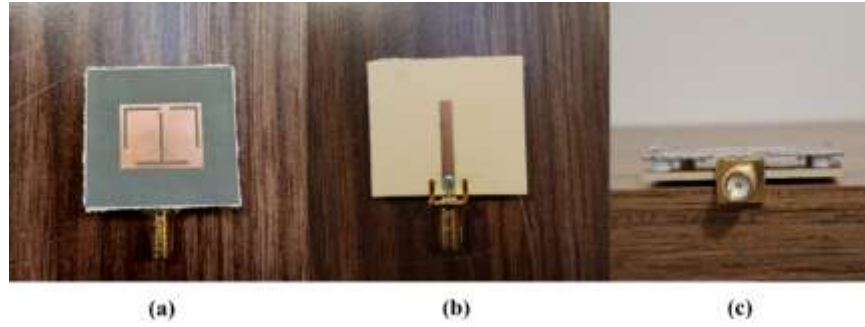
$PW3$ ve $PL3$ uzunluklarının S_{11} spektrumuna olan etkileri Şekil 5.55(a) ve (b)’de sunulmuştur. Yama üzerine eklenen yeni slot sayesinde, farklı $PW3$ ve PL değerleri için 6,0 GHz civarlarında frekansı değişen beşinci bir rezonansın olduğu gözlemlenmiştir. $PW3$ uzunluğu 5,5 ile 8,5 mm aralığında değiştirilmiştir. $PW3$ uzunluğu özellikle ikinci ve üçüncü bantları önemli ölçüde etkilerken, diğer bantları neredeyse etkilememektedir. Tüm bantlar için S_{11} büyüklükleri ve BG dikkate alınarak, $PW3$ uzunluğu 7,5 mm olarak belirlenmiştir. Son olarak, $PL3$ 9,0 ile 12,0 mm aralığında değiştirilmiştir. Şekil 5.55(b) incelendiğinde, $PL3$ ’ün özellikle ikinci ve üçüncü bantları önemli ölçüde etkilediği, diğer bantlar üzerinde ise kayda değer bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Frekansı 6,0–7,0 GHz arasında değişen ikinci ve üçüncü bantların S_{11} büyüklükleri ve BG değerleri göz önünde bulundurularak, $PL3$ uzunluğu 11,0 mm olarak seçilmiştir.

Şekil 5.55(b)’de siyah düz eğri ile gösterilen $PL3=11,0$ mm değeri, Anten 4 için optimize edilmiş S_{11} spektrumunu göstermektedir. Optimize edilmiş nihai yapı, C ve X bantlarına karşılık gelen 5,48 GHz, 6,12 GHz, 6,70 GHz, 8,65 GHz ve 9,97 GHz frekanslarında rezonans göstermektedir.



Şekil 5.55 (a) $PW3$, (b) $PL3$ parametrelerinin S_{11} spektrumuna etkisi

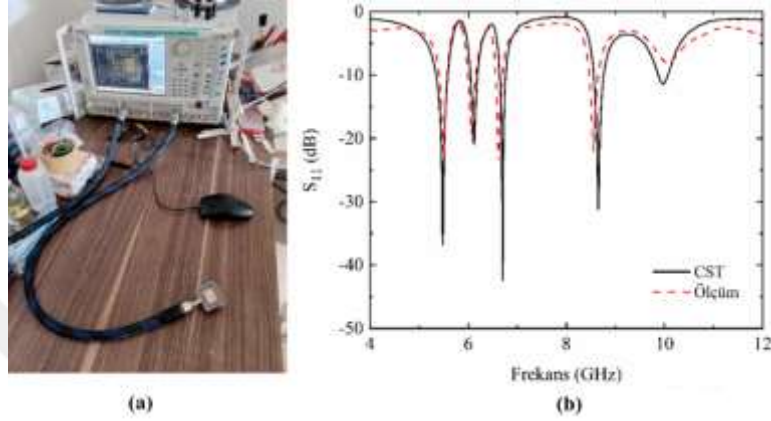
Nihai yapı olan Anten-4 prototipi, geleneksel fotolitografi ve kimyasal aşındırma teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Anten beslemesi için 50Ω empedansa sahip SMA tipi koaksiyel konnektör karta lehimlenmiştir. Üretilen anten prototipine ait fotoğraf Şekil 5.56'da sunulmaktadır. Teflon alttaş ile toprak düzlemi arasında bırakılan 2,5 mm'lik hava boşluğunu sabit tutmak amacıyla, 3D yazıcıda PETG filaman kullanılarak üretilen, 2,5 mm yükseklikte ve 4 mm çapında silindirik ara parçalar kullanılmıştır. Bu desteklerden dört adet, her bir köşeye birer tane olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.56(c)).



Şekil 5.56 Önerilen nihai anten prototipinin (a) ön, (b) arka ve (c) yan görünümü

Antenin 4–12 GHz frekans aralığındaki S_{11} ölçümleri, Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü laboratuvarında bulunan Anritsu MS4644B VNA cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında çekilen prototip fotoğrafı ile ölçüm ve simülasyon sonuçlarına ait S_{11} karşılaştırma grafiği Şekil 5.57'de, bu frekanslara karşılık gelen spektrum değerleri ise Çizelge 5.15'de sunulmuştur. Nihai anten; 5,50 GHz, 6,06

GHz, 6,62 GHz ve 8,55 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla $-22,69$ dB, $-19,27$ dB, $-23,56$ dB ve $-21,99$ dB seviyelerinde çalışmakta olup, ilgili frekanslardaki DDO değerleri ise sırasıyla 1,16; 1,25; 1,14 ve 1,17 olarak hesaplanmıştır. Ölçümlerde beşinci bandın rezonansı $-8,16$ dB seviyesindedir.



Şekil 5.57 Üretilen antenin (a) ölçüm sırasında çekilen fotoğrafı ve (b) ölçülen–simüle edilen S_{11} spektrumlarının karşılaştırılması

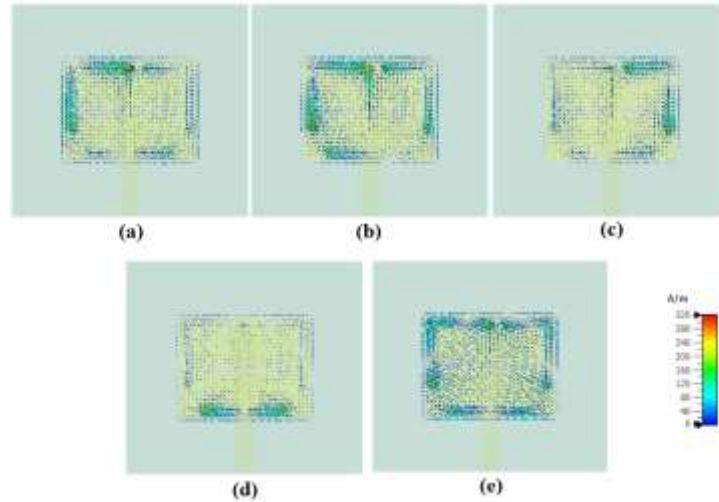
Çizelge 5.15 Üretilen antenin ölçülen ve simüle edilen rezonans frekansları ve S_{11} büyüklük değerleri

Ölçüm		Simülasyon	
Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)
5,50	-22,69	5,48	-36,82
6,06	-19,27	6,12	-20,97
6,62	-23,56	6,70	-42,36
8,55	-21,99	8,65	-31,17
10,07	-8,16	9,97	-11,36

Nihai yapının rezonans frekanslarına karşılık gelen yüzey akım dağılımları Şekil 5.58’de sunulmuştur. Eklenen 3 adet slot uçlarının birbirine oldukça yakın konumlandırılmış olması nedeniyle, slotlar arasında güçlü elektromanyetik bağlaşım meydana gelmiş; bu bağlaşım, alan yoğunlaşmalarını artırarak etkin akım yollarını uzatarak mevcut frekanslarda sınırlı kaymalar gözlemlenmiştir. Örneğin 5,51 GHz rezonansı 5,48 GHz’e, 6,21 GHz rezonansı ise 6,12 GHz’e sınırlı bir kayma göstermiştir. Bununla birlikte, üçüncü ters L şekilli slotun eklenmesiyle 6,70 GHz’de dördüncü bir rezonans bandı oluşmuştur. Bu frekansa ait yüzey akım dağılımı incelendiğinde, akım yoğunluğunun

baskın olarak üçüncü eklenen ters L şekilli slot üzerinde yoğunlaştığı, diğer iki slotun uç bölgelerinde ise düşük düzeyde akım birikimleri olduğu görülmektedir. Bu frekans için teorik yarım kılavuz dalga boyu yaklaşık 20 mm olarak hesaplanırken, yüzey akım dağılımından elde edilen etkin akım yolu uzunluğu yaklaşık 18,5 mm ($PW3 + PL3$) olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, söz konusu rezonansın temel olarak üçüncü L -slot kaynaklı olduğunu doğrulamaktadır.

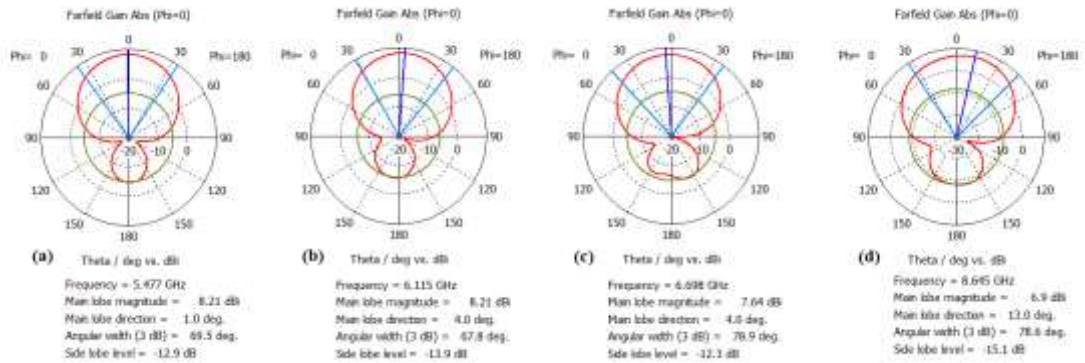
Yapıda gözlemlenen beşinci bant (9,97 GHz), yama üzerinden değil; besleme hattı ile toprak düzlemindeki açıklığın oluşturduğu parazitik ve istenmeyen bir rezonans modundan kaynaklanmaktadır. Bu rezonans, esas olarak besleme hattı–açıklık etkileşimi sonucu olduğundan yama üzerinde baskın bir yüzey akımı gözlenmemektedir. Bununla birlikte, yama üzerinde yer alan slotlar doğrudan bu rezonansı üretmemekle beraber, yama–açıklık arasındaki elektromanyetik bağlaşımı ve giriş empedansını dolaylı olarak etkileyerek söz konusu frekansın çok sınırlı bir miktarda kaymasına neden olmaktadır. Slot geometrilerinin değiştirilmesiyle yama üzerindeki akım dağılımı ve yakın alan koşulları değiştiğinden, besleme hattı ve açıklık tarafından oluşturulan bu parazitik modun empedans uyumu ve rezonans frekansı küçük ölçekli değişimler göstermektedir.



Şekil 5.58 Nihai konfigürasyonu için yapıda yerleşen yüzey akım dağılımları: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz, (d) 8,65 GHz ve (e) 9,97 GHz

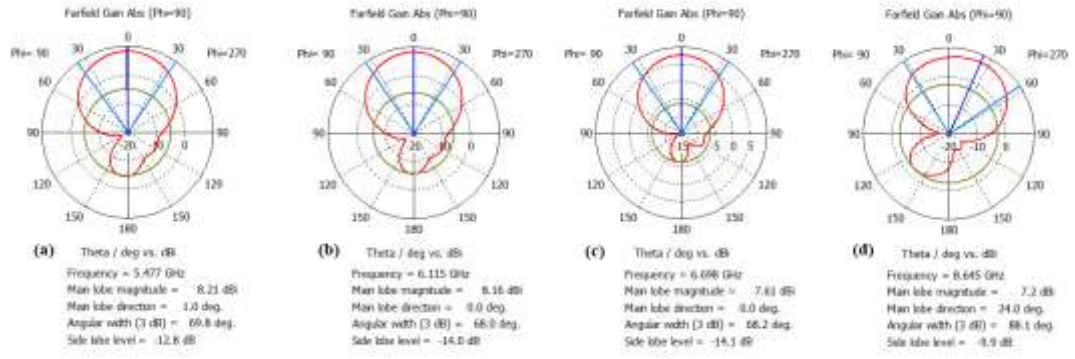
Nihai antenin rezonans frekanslarda CST Studio Suite programında simüle edilen iki boyutlu ışınım örüntüleri, $\varphi = 0^\circ$ ve $\varphi = 90^\circ$ düzlemleri için sırasıyla Şekil 5.59 ve Şekil

5.60° da sunulmuştur. Antenin $\varphi = 0^\circ$ düzlemindeki ışıma örüntüleri incelendiğinde, düşük frekanslarda maksimum ışımanın dik yüzey (broadside, $\theta \approx 0^\circ$) yönünde olduğu görülmekte ve ışıma karakteristiği yönlü ve kararlı biçimde korunmuştur. Yüksek frekanslarda ise ana lobun yönü sırasıyla 13° ve 23° sağa doğru kaymaktadır. Yan lobların tüm frekanslarda düşük seviyede olması tercih edilen bir durumdur; çünkü bu, antenin ışımasını ana yönde yoğunlaştırır ve istenmeyen yönlerdeki paraziti azaltır. Elde edilen sonuçlara göre, antenin ışıma enerjisinin büyük kısmı tüm frekanslarda ana lob yönünde yoğunlaşmaktadır. Genel olarak, anten düşük ve orta frekanslarda kararlı bir broadside ışıma sergilerken, yüksek frekanslarda ana lob yönünün belirli açılara kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek frekanslarda anten yapısında yüksek mertebeden modların uyarılması sonucunda akım ve alan dağılımının değişmesinden kaynaklanmaktadır.



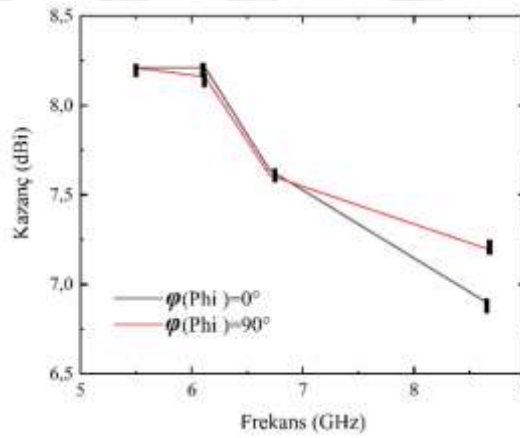
Şekil 5.59 $\varphi=0^\circ$ için antenin ışıma karakteristikleri: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz ve (d) 8,65 GHz

Şekil 5.60 incelendiğinde, $\varphi = 90^\circ$ düzleminde ilk üç rezonans olan 5,48 GHz, 6,12 GHz ve 6,70 GHz frekanslarında anten yönlü bir karakteristiğe sahip olup ana ışımanın 0° yönünde gerçekleştiği görülmektedir. 8,645 GHz frekansında 24° sağa eğimli maksimum ışıma yapan yönlü bir ışıma görülmektedir. Tüm frekanslarda yan lob seviyeleri düşük olup, ışıma enerjisi büyük oranda ana lob yönünde toplanmıştır.



Şekil 5.60 $\varphi=90^\circ$ için antenin ışıma karakteristikleri: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz ve (d) 8,65 GHz

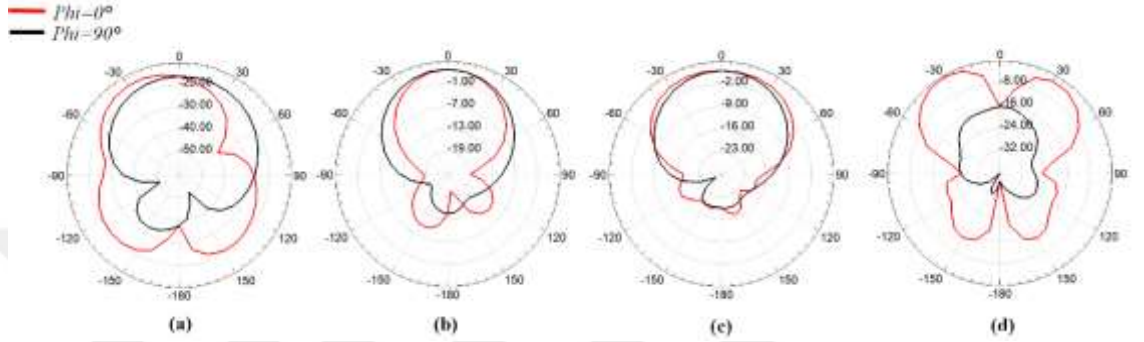
CST Studio Suite tam-dalga elektromanyetik simülasyon programında, $\varphi = 0^\circ$ olan kesit için, temel rezonanstan dördüncü rezonansa kadar kazanç değerleri sırasıyla Şekil 5.61’de gösterildiği gibi şu şekilde belirlenmiştir: 8,21 dBi, 8,21 dBi, 7,64 dBi ve 6,90 dBi. Diğer yandan, $\varphi = 90^\circ$ kesiti için ise kazanç değerleri sırasıyla 8,21 dBi, 8,16 dBi, 7,61 dBi ve 7,20 dBi olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.61 $\varphi=0^\circ$ ve 90° düzlemlerinde frekansa bağlı kazanç değerleri

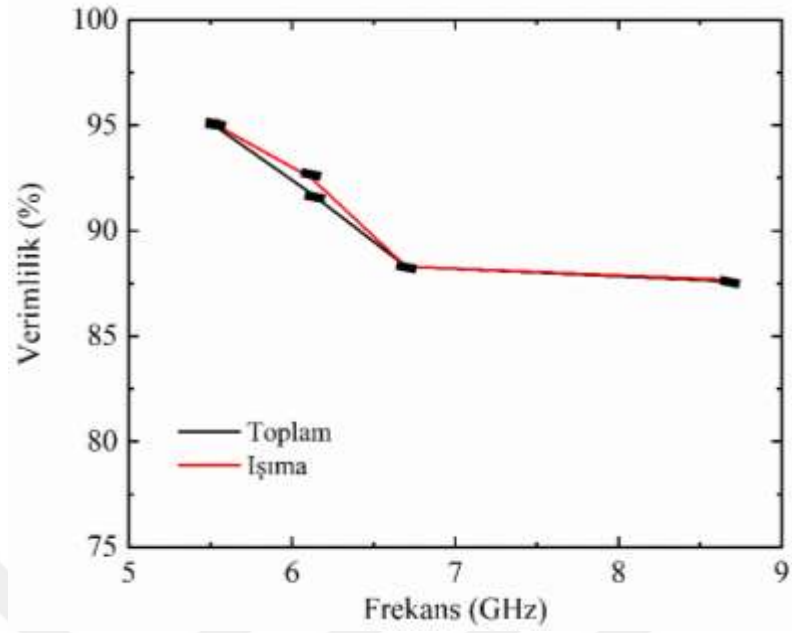
Şekil 5.62’de antenin simüle edilen çapraz polarizasyon örüntüleri verilmiştir. Simüle edilen çapraz polarizasyon örüntülerinde 5,48 GHz frekansında $\varphi = 0^\circ$ ve $\varphi = 90^\circ$ düzlemlerinde çapraz polarizasyon seviyesi genel olarak düşük olup baskın polarizasyon davranışı korunmaktadır. 6,12 GHz frekansında özellikle $\varphi = 90^\circ$ düzleminde çapraz polarizasyon seviyesinde artış gözlenmektedir. 6,70 GHz frekansında asimetrik akım dağılımlarına bağlı olarak çapraz polarizasyon bileşenleri belirginleşmektedir. 8,65 GHz

frekansında ise yüksek mertebeden modların etkisiyle $\varphi = 0^\circ$ düzleminde çok loblu bir örüntü oluşmuştur. $\varphi = 0^\circ$ düzleminde ise çapraz polarizasyon seviyelerinde belirgin bir iyileşme olmuştur. Sonuç olarak, açıklık bağlaşımlı besleme yapısının temel modlarda düşük çapraz polarizasyon sağlamasına karşın, frekans arttıkça yüksek mertebeden modların ve yapısal asimetrielerin çapraz polarizasyonu artırdığı görülmektedir.



Şekil 5.62 Simüle edilen çapraz polarizasyon örüntüleri: (a) 5,48 GHz, (b) 6,12 GHz, (c) 6,70 GHz ve (d) 8,65 GHz

Önerilen antenin simüle edilen ışıma verimliliği ve toplam verimlilik spektrumları Şekil 5.63’de gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre antenin ışıma verimliliği sırasıyla %95,2, %92,5, %88,3 ve %87,7 olup, ortalama ışıma verimliliği %90,91 olarak hesaplanmıştır. Toplam verimlilik ise sırasıyla %95,2, %91,7, %88,3 ve %87,6 değerlerinde olup, ortalama toplam verimlilik %90,70 olarak elde edilmiştir. Bu ortalama değerler, anten tasarımının nispeten yüksek verimli olarak çalıştığını göstermektedir.



Şekil 5.63 Önerilen antenin ışıma ve toplam verimlilik spektrumları

Önerilen anten tasarımının literatürdeki bazı mevcut çalışmalarla karşılaştırması, Çizelge 5.16'da sunulmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, önerilen antenin sunduğu dört bantlı çalışma ve yüksek kazanç değerleri bakımından mevcut tasarımlara göre daha avantajlı olduğu görülmektedir. Khurshid vd. (2019) ve Dash vd. (2022) çalışmalarında elde edilen kazanç değerleri ilgili bantlarda kabul edilebilir olsa da bu antenlerin dört banttan daha az sayıda çalışma bandına sahip olması ve çok bantlı uygulamalar için yeterli bant genişliğini sağlayamaması önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Samsuzzaman vd. (2023) tarafından sunulan ultra geniş bantlı anten oldukça kompakt boyutlara sahip olmakla birlikte tek bir ultra geniş bantta çalıştığı için frekans bantları arasında elektromanyetik bağlaşıma izin vermektedir. Bikrat vd. (2023) çalışması ise yalnızca iki bantta çalışmakta olup bant sayısı açısından sınırlıdır. Ahmad vd. (2023) tarafından önerilen PIN diyotlu yeniden yapılandırılabilir anten, anahtarlama sayesinde üç bant elde edebilmesine rağmen hem bant sayısı hem de kazanç değerleri ile bu çalışmada sunulan tasarımın gerisinde kalmaktadır. Christydass vd. (2025) tarafından geliştirilen üç bantlı ultra geniş bantlı antenin kazanç değerleri oldukça düşüktür ve çok bantlı çalışmayı desteklememektedir. Benzer şekilde Verma vd. (2024) çalışmasında üç bantlı açıklık bağlaşımlı bir yama anten sunulmuş olsa da bant sayısı ve maksimum kazanç değerleri açısından önerilen antenle kıyaslandığında daha düşük performans sergilemektedir.

Bu kapsamda, nihai anten yapısı, C ve X bant uygulamalarına karşılık gelen 5,50 GHz, 6,06 GHz, 6,62 GHz ve 8,55 GHz merkez frekanslarında çalışmaktadır. C bandında yer alan frekanslar; WLAN, WiMAX, uydu haberleşmesi ve radar uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olup, kapsama alanı ile veri iletim kapasitesi arasında dengeli bir performans sunmaktadır. X bandına karşılık gelen daha yüksek frekanslı çalışma ise askeri ve sivil radar sistemleri, yüksek çözünürlüklü algılama ve uydu haberleşmesi gibi uygulamalar için uygun olup, antenin çok bantlı yapısı sayesinde farklı haberleşme ve algılama sistemlerine tek bir kompakt anten üzerinden hizmet verebilmesini mümkün kılmaktadır. Önerilen antenin dört bantta çalışması, simülasyon sonuçlarında sırasıyla 8,21 dBi, 8,21 dBi, 7,64 dBi ve 6,90 dBi seviyelerine ulaşan yüksek kazanç değerleri sunması ve çok katmanlı kompakt bir yapıya sahip olması, literatürdeki benzer tasarımlara kıyasla daha üstün bir performans sergilemesini sağlamaktadır.

Çizelge 5.16 Önerilen antenin performansının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması

Literatür	Bant sayısı	Anten boyutu (mm ³) (λ_0^3)	Rezonans frekansı (GHz)	Empedans BG (GHz)	Kazanç (dBi)
Cao vd., 2015	4	48×18 0,37×0,14	1,575/2,45/3,5/5,2	0,90/0,145/0,700/0,760	3,55/3,93/5,02/4,86
Khurshid vd., 2019	UWB bant	27×33×1,5 0,50×0,61×0,027	2,38-2,57/ 3,2-14/	0,19/10,8	1+ / 3,9
Dash vd., 2022	3	20×20×1,6 0,25×0,25×0,20	3,88/4,47/7,11	0,29/0,16/ 1,37	2,65/2,34/ 3,17
Samsuzzaman vd., 2023	UWB bant	60×70×1,5 0,28×0,22×0,005	1,22-3,45	2,23	~6
Bikrat vd., 2023	2	34×30×0,8 0,28×0,25×0,0067	2,5/4,4	0,39/1,22	4,85 (maks kazanç)
Ahmad vd., 2023	5	20×24×0,127 0,16×0,19×0,001	Açık: 7,9/9,9/12,3 Kapalı: ,85/9,18/13,75	Açık: 2,76/0,48/ 5,3 Kapalı: 0,67/0,9/5,6	Açık: 4,1/3,0/4,8 Kapalı: 2,4/3,5/3,8
Christydass vd., 2025	3	27,84×23,25×1,6 0,29×0,25×0,017	3,16/3,82/5,41	0,18/0,19/2,75	2,19/2,27/ 2,82
Verma vd., 2024	3	40×50×1,6 0,34×0,43×0,014	2,57/3,48/5,37	0,48/0,40/ 1,05	4,45/4,81/ 5,26
Balakrishnan vd., 2024	4	52×60×1,6 0,27×0,31×0,008	1,575/2,6/4,8/8	-	1,0/2,2/3,2/ 3,8
Bu çalışma	4	40×36×4,524 0,73×0,66	5,50/6,06/6,62/8,55	0,17/0,16/ 0,16/0,19	8,21/8,21/7,64/6,90

5.3.1 Açıklık bağlaşımlı yama anten tasarım kılavuzu

Önceki bölümde incelenen çalışmalar, açıklık bağlaşımlı yama antenlerde çok bantlı çalışma karakteristiğinin elde edilmesinde, toprak düzleminde yer alan açıklık geometrisi ile yama üzerindeki yapısal düzenlemelerin belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, gerçekleştirilen tasarım çalışmaları sonuçları esas alınarak, önerilen açıklık bağlaşımlı yama antenin tasarım süreci tasarım kılavuzu niteliğinde aşağıda özetlenmiştir. Böylece, anten rezonanslarının oluşumunda etkili olan temel fiziksel mekanizmalar ile bu rezonansların hangi tasarım parametreleri aracılığıyla kontrol edildiği ortaya konulmuştur.

1. Çok bantlı çalışma hedefi C ve X bantlarını kapsayacak şekilde belirlendiğinden, besleme hattı ile yama arasındaki istenmeyen etkileşimleri azaltmak, parazit ışıma bileşenlerini bastırmak ve daha kararlı empedans uyumu elde etmek amacıyla açıklık bağlaşımlı besleme topolojisi tercih edilmiştir. Temel tasarım referansı olarak 6 GHz seçilmiş ve toprak düzlemindeki dikdörtgen açıklığın uzunluğu, çok katmanlı yapı için hesaplanan etkin dielektrik sabiti dikkate alınarak yaklaşık $\lambda_g/2$ koşulunu sağlayacak biçimde boyutlandırılmıştır. Ayrıca yüksek kazanç ve verimliliği desteklemek amacıyla, düşük dielektrik kayıplı ve düşük ϵ_r değerli üst ortam (teflon + hava boşluğu) ile uygun mekanik/elektriksel özelliklere sahip alt altaş birlikte kullanılmıştır.
2. Toprak düzlemi ile üst alttaş arasına 2,5 mm hava boşluğu yerleştirmedeki amaç etkin dielektrik sabitini düşürmek, yüzey dalgalarını ve dielektrik kayıplarını azaltarak kazanç ve verimliliği artırmaktır.
3. Hava boşluğu nedeniyle elektromanyetik alanların büyük ölçüde serbest uzaya yayılması sonucunda, yüzey akımlarının baskın olarak yama kenarlarında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle çok bantlı çalışma elde etmek amacıyla, yama kenarlarına yaklaşık 1 mm mesafede üç adet slot yerleştirilmiştir.

4. Eklenen slotlar, kendi geometrik uzunluklarıyla yarım kılavuz dalga boylu rezonatörler olarak çalışırken, aynı zamanda yama ile elektromanyetik olarak bağlaşılarak hibrit rezonans modları oluşturmuştur.



6. SONUÇ

Bu tez kapsamında üç farklı mikroşerit anten tasarlanmış ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Çizelge 6.1’de bu tez çalışmaları çerçevesinde geliştirilen üç antenin boyutları, rezonans frekansları, karşı gelen S_{11} (dB) değerleri, anten kazancı ve ışıma verimliliği değerleri gösterilmiştir. Çizelgede, düzlemsel monopol antene ait tüm anten parametrelerinin ölçüm sonuçları yer almaktadır. İkinci ve üçüncü anten tasarımlarında ise yalnızca S_{11} spektrumları ve bant genişlikleri ölçülmüş; anten kazancı ile ışıma verimliliği değerleri simülasyon ortamında elde edilmiştir.

İlk anten tasarımı olan monopol mikroşerit anten üçgen yama geometrisine sahip olup, slot tekniği kullanılarak düşük profilli dört bantlı bir monopol anten olarak gerçekleştirilmiştir. Anten $50 \times 50 \times 1,6 \text{ mm}^3$ boyutlarında olup, ön yüzünde ayna simetrik ters çift basamaklı bir slot bulunmaktadır. Toprak düzlemine yatay ve dikey slotların eklenmesiyle akım yolları uzatılmış, böylece rezonans frekanslarının sayısı artırılmış ve S_{11} büyüklüğü ile kazanç gibi temel anten performans parametreleri iyileştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla ara bir prototip (Anten 3) ve nihai optimize edilmiş anten üretilmiş ve S_{11} spektrumları ve anten parametreleri ölçülmüştür. Her iki prototipten elde edilen S_{11} spektrumları, simülasyonlarla yüksek uyum göstererek uygulanan tasarım yaklaşımının doğruluğunu kanıtlamıştır. Nihai anten, sırasıyla GSM, WLAN, WiMAX ve üst WLAN uygulamalarına karşılık gelen 1,87 GHz, 2,42 GHz, 3,27 GHz ve 5,44 GHz merkez frekanslarında çalışmaktadır. Bu bantlarda ölçülen S_{11} değerleri -15 dB ’den daha iyi olup, elde edilen en düşük yansıma katsayısı büyüklüğü değeri $-22,47 \text{ dB}$ seviyesindedir. Anten, tüm bantlar boyunca yaklaşık $2,0-2,9 \text{ dBi}$ kazanç ve ortalama %73 ışıma verimliliği sunarak pratik mühendislik uygulamaları için yeterli performansı sağlamaktadır. Kompakt yapısı, geniş servis kapsamı ve çok bantlı çalışma yeteneği sayesinde önerilen anten, GSM, WLAN ve WiMAX gibi yaygın kablosuz iletişim sistemlerini verimli bir şekilde destekleyen ve modern 6-altı GHz uygulamalarının gereksinimlerini karşılayan uygun bir adaydır.

İkinci anten tasarımı olan koaksiyel beslemeli slotlu yama anten, slotlu dörtgen yama ve kusurlu toprak düzlemine sahip olup düşük bir profil ve S, C, ile X bantlarında olmak üzere beş bantta çalışma kapasitesine sahiptir. $37 \times 32 \times 1,524 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip antenin hem yama hem de toprak düzlemi üzerine yerleştirilen slotlar sayesinde rezonans sayısı artırılarak beş bantlı çalışma elde edilmiştir. Nihai anten, sırasıyla 2,36 GHz, 5,08 GHz, 6,05 GHz, 8,64 GHz ve 10,93 GHz merkez frekanslarında çalışmaktadır. Simüle edilen S_{11} değerleri tüm bantlarda -15 dB seviyesinin altında kalarak başarılı bir empedans uyumu sergilemiştir. Baskı devre tekniğiyle üretilen prototipin ölçülen S_{11} spektrumu, simülasyon sonuçlarıyla yüksek uyum göstermiştir. Anten kazancı tam-dalga simülasyonlarına göre 2,69–5,45 dBi arasında değişmekte olup toplam verimlilik ortalama %90,42 olarak elde edilmiştir. Antenin ışıma karakteristiği frekansa bağlı olarak farklılık göstermekte; bazı bantlarda çift yönlü, bazı bantlarda ise çok yönlü ışıma örüntüsü davranışı sergilemektedir. Antenin beş çalışma bandının eş zamanlı kullanılması istenen uygulamalarda, döner platformlar üzerine yerleştirilebileceği değerlendirilmiştir.

Üçüncü anten, dört bantta çalışabilen açıklık bağlaşımlı beslemeli, çok katmanlı ve slotlu bir dörtgen yama antendir. $40 \times 36 \times 4,524 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip antenin yama düzlemine eklenen slotlar sayesinde akım yolları çeşitlendirilmiş ve böylece dört bantta çalışması sağlanmıştır. Baskı devre yöntemiyle üretilen prototip antenin ölçülen S_{11} spektrumu, simülasyon sonuçlarıyla yüksek uyum göstererek tasarımın doğruluğunu teyit etmiştir. Nihai anten, C ve X bant uygulamalarına karşılık gelen 5,50 GHz, 6,06 GHz, 6,62 GHz ve 8,55 GHz merkez frekanslarında çalışmaktadır. Antenin rezonanslarda ölçülen $S_{11}(\text{dB})$ değerleri $-19,3 \text{ dB}$ ile $-23,6 \text{ dB}$ arasında değişiklik göstermektedir. Tam-dalga simülasyon sonuçlarına göre antenin kazancı 6,90–8,21 dBi arasında değişmektedir. Antenin toplam verimlilik değeri ise yüksek seviyelerde olup ortalaması %90,70 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.1 Tez kapsamında geliştirilen antenlerin bant sayısı, anten boyutu, rezonans frekansı, S_{11} , anten kazancı ve ışıma verimliliği değerleri

Tasarımlar	Bant sayısı	Anten boyutu (mm ³)	Rezonans frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	Kazanç (dBi)	İşıma verimliliği (%)
Mikroşerit monopol anten	4	50×50×1,6	1,87, 2,42, 3,27, 5,44	-20,87, -19,75, -22,47, -22,04	2,04, 2,21, 2,90, 2,35	80,6, 84,2, 65,5, 63,0
Koaksiyel beslemeli yama anten	5	37×32×1,524	2,36, 5,09, 6,05, 8,65, 10,94	-25,13, -17,07, -20,51, -37,78, -20,43	3,20, 2,62, 5,09, 2,58, 3,45	92,3, 85,7, 88,8, 93,8, 92,6
Açıklık bağlaşımlı yama anten	4	40×36×4,524	5,50, 6,06, 6,62, 8,55	-22,69, -19,27, -23,56, -21,99	8,21, 8,16, 7,61, 7,20	95,2, 92,5, 88,3, 87,7

Bu çalışma kapsamında üç farklı mikroşerit anten tasarlanmış ve çok bantlı çalışma yeteneği ölçüm sonuçlarıyla gösterilmiştir. Tasarlanan antenler, çalışma frekansları göz önüne alındığında düşük profilli yapılara sahiptir. Slot tabanlı yapısal modifikasyonların kullanılmasıyla rezonans frekanslarının etkin bir şekilde kontrol edilebildiği ve bant sayısının artırılabilirdiği gösterilmiştir. Bu özellikler, antenlere frekans seçilebilirliği açısından önemli bir esneklik kazandırmaktadır. Elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar, önerilen anten yapılarının uygun yansıma katsayısı büyüklüğü, yeterli anten kazancı ve verimliliği ile çok bantlı çalışma kabiliyetleri sayesinde kablosuz haberleşme, IoT sistemleri, sensör ağları ve çeşitli modern RF uygulamalarında kullanılabilecek rekabetçi adaylar olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, A., Lee, G. O., Choi, D. Y. 2023. Design and performance evaluation of a Compact frequency-reconfigurable coplanar-waveguide-fed slotted patch antenna for multi-band wireless communication. *Electronics*, 12(18), 3889.
- Ali, T., Aw, M. S., Biradar, R. C., Andújar, A., Anguera, J. 2018. A miniaturized slotted ground structure UWB antenna for multiband applications. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 60(8), 2060–2068. <https://doi.org/10.1002/mop.31298>
- Ali, T., Khaleeq, M. M., Biradar, R.C. 2018. A multiband reconfigurable slot antenna for wireless applications, *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, 84, 273-280, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.11.033>
- Anonim, “Radiation Pattern”, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_pattern (Erişim Tarihi: 26 Kasım 2025).
- Bağcı, F., Eser, M. 2024. Kablosuz uygulamalara yönelik çok bantlı slotlu mikroşerit anten tasarımları ve deneysel analizi. Ankara Üniversitesi Lisansüstü Tez Projesi. Proje No: FYL-2024-3299; Ankara.
- Balakrishnan, S. A., Devisowjanya, P., Ram, R. A., Sai, B. S. 2024. Implementation of low-profile multiband planar antenna for internet of vehicle communication, *Wirel. Pers. Commun.*, 138(1), 229–243, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11487-4>
- Balanis, C.A., *Antenna Theory: Analysis and Design* (3rd ed.). 2005. John Wiley & Sons, Inc., s. 27–114.
- Bikrat, M., Bri, S., Bravo, A. G., Manterola, A. M., Gonzalez-Atienza, M., & Amador, F. 2023. A multi-bandwidth reconfigurable patch antenna for devices in WLAN and UWB technology applications. *Applied Sciences*, 13(16), 9367.
- Cao, Y. F., Cheung, S. W., Yuk, T.I. 2015. A multiband slot antenna for GPS/WiMAX/WLAN systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(3), 952-958.
- Christydass, S. P. J., Samithas, D., Balachandran, P. K., Mohd Zainuri, M. A. A. 2025. Open complementary split-ring resonator-embedded tri-band rectangular monopole antenna with offset feed for next-gen wireless applications. *Scientific Reports*, 15(1), 35658.
- Cheng, D. K. 1989. *Field and wave electromagnetics* (2nd ed.). Reading, MA: Addison-Wesley. ISBN 0-201-10974-3
- Collin, R. E. 1985. *Antennas and radiowave propagation*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-035185-9
- Dash, R. K., Saha, P. B., Ghoshal, D., Palai, G. 2022. Design of triangular shaped slotted patch antennas for both wideband and multiband applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 68(3), 275-294.
- Eser, M., Bağcı, F., Akaoğlu, B. 2025. High-efficiency penta-band coaxial-fed slotted patch antenna. 2025 33rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). 25-28 Haziran 2025. İstanbul, Türkiye.
- Fadamiro, A.O., Ntawangaheza, J.D., Famoriji, O.J., Zhang, Z., Lin, F. 2019. Design of a multiband hexagonal patch antenna for wireless communication systems, *IETE J. Res.*, 68, 1675–1682.
- Garg, R. et al., *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, 2001.

- Garg, R. K., Agarwal, S., Tomar, R. 2018. Multi-band rectangular patch antenna with F-type defected metal structure. *International Journal of Research in Advent Technology* E-ISSN: 2321-9637
- Hammache, B., Messaoudene, I., Messai, A., Kesavan, A., Denidni, T. A. 2025. Very compact ultra-wideband slot antenna with integrated LTE band, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 123(2), 1–10.
- Hertleer, C., 2009. Design of planar antennas based on textile materials, *Doktora tezi*, Ghent University, 2009.
- Khan, I., Ali, T., Devanagavi, G. D., Sudhindra, K. R., Biradar, R. C. 2019. A compact multiband band slot antenna for wireless applications, *Internet Technology Letters*, 2(6), e94, 2019.
- Khurshid, A., Dong, J., Shi, R. 2019. A metamaterial-based compact planar monopole antenna for Wi-Fi and UWB applications. *Sensors*, 19(24), 5426.
- Kumar, G., Ray, K.P. 2003. *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House. ISBN 1-58053-392-7.
- Mokal, V.H., Gagare, S.R., Labade, R.P. 2018. Design of X-shaped multi band printed antenna for GSM-1800, Bluetooth, Wi-MAX and WLAN applications with improved gain, 2018 International Conference on Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT), IEEE.
- Moosazadeh, M., Kharkovsky, S. 2014. Compact and small planar monopole antenna with symmetrical L-and U-shaped slots for WLAN/WiMAX applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 388–391.
- Pandya, A., Upadhyaya, T. K., Pandya, K. 2021. Tri-band defected ground plane based planar monopole antenna for Wi-Fi/WiMAX/WLAN applications, *Prog. Electromagn. Res.*, 108, 127–136. <https://doi.org/10.2528/PIERC20120702>
- Patel, R., Desai, A., Upadhyaya, T. K. 2018. An electrically small antenna using defected ground structure for RFID, GPS and IEEE 802.11 a/b/g/s Applications,” *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, 75, 75–81. <https://doi.org/10.2528/PIERL18021901>
- Patel, R., Desai, A., Upadhyaya, T., Nguyen, T.K., Kaushal, H., Dhasarathan, V. 2021. Meandered low profile multiband antenna for wireless communication applications. *Wirel. Netw.*, 27, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02437-6>
- Pozar, D.M. 1992. *Microstrip Antennas*. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
- Ren, W., Wang, P.-H. 2019. Design of a quad-band monopole antenna with independent frequency control. *J. Circuits Syst. Comput.*, 28(06) 1950101. <https://doi.org/10.1142/S0218126619501019>
- Rezvani, M., Zehforoosh, Y. 2017. Design of multi-band microstrip antenna for wireless communications and ITU applications,” *Natl. Acad. Sci. Lett.*, 40(5), 331–334. <https://doi.org/10.1007/s40009-017-0574-1>
- Rhazi, Y., Bri, S., Touahani, R. 2013. Effect of Microstrip Antenna Feeding in the K-band, *International Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 515.
- Roy, A., Bhunia, S., Sarkar, D. C., Sarkar, P.P. 2020. Compact wideband meandered slotted multi frequency microstrip antenna. *Wirel. Pers. Commun.*, 115(2), 1769–1782. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07653-z>

- Samsuzzaman, M., Talukder, M. S., Alqahtani, A., Alharbi, A. G., Azim, R., Soliman, M. S., Islam, M.T. 2023. Circular slotted patch with defected grounded monopole patch antenna for microwave-based head imaging applications. *Alexandria Engineering Journal*, 65, 41-57.
- Sathishkumar, N., Palanisamy, S., Natarajan, R., Ouahada, K., Hamam, H. 2024. Design of dual mode antenna using CMA and broadband dual-polarized antenna for 5G networks. *Sci. Rep.*, 14, 15553, 2024.
- Singh, A.K., Abegaonkar, M.P., Koul, S.K. 2018. Miniaturized multiband microstrip patch antenna using metamaterial loading for wireless application. *Prog. Electromagn. Res. C*, 83, 71–82. <https://doi.org/10.2528/PIERC18012905>
- Singh, G., Kumar, A., Kumar, A., Pharwaha, A.P.S. 2025. Development of H-shaped fractal slot antenna for WLAN/WiMAX and sub-6 GHz 5G wireless applications. *Eng. Res. Express*, 7(2), 025312. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adc16b>
- Tan, L., Li, Z., Gao, Y., Zhai, Y., Duan, W. 2023. Multiband deformed off-set octagonal patch antenna with improved impedance matching. *AEÜ-Int. J. Electron. Commun.*, 171, 154900.
- Verma, R. K., Bali, V., Kumar, A., Pattanayak, P., Prasad, R. K., & Singh, M. 2024. Design and analysis of microstrip line fed gap coupled triple band slotted patch antenna for WIMAX, WLAN, and sub-6 GHz 5G applications. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 37(6), e70005.
- Weng, L. H., Guo, Y. C., Shi, X. W., Chen, X. Q. 2008. An overview on defected ground structure. *Progress in Electromagnetics Research B*, 7, 173-189.
- Yahia, A. S., Shaalan, N. M., El-Aasser, M. A. F., Razik, M. H. A. 2011. Simulation of electromagnetic radiation patterns of microstrip antennas in RFID systems. *Journal of Materials Science and Engineering*, 5(3), 354, 2011.
- Yang, F. Rahmat-Samii, Y. 2008. *Electromagnetic band gap (EBG) structures in antenna engineering*. Cambridge University Press, s. 1–25.
- Zaidi, A., Awan, W. A., Ghaffar, A., Alzaidi, M. S., Alsharef, M., Elkamchouchi, D. H., Ghoneim, S. S. M., Alharbi, T. E. A. 2022. A low profile ultra-wideband antenna with reconfigurable notch band characteristics for smart electronic systems. *Micromachines*, 13(11), 1803. <https://doi.org/10.3390/mi13111803>