T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ULTRA GENİŞ BANTLI EŞ YÖNLÜ ANTENLERİN TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

LONA DANA ABDALQADIR ABDALQADIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Seyit Ahmet SİS (Tez Danışmanı)**
Doç. Dr. Ersin AKYÜZ
Doç. Dr. Muhammet Hilmi NİŞANCI

BALIKESİR, AĞUSTOS – 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımca hazırlanan "**Ultra Geniş Bantlı Eş Yönlü Antenlerin Tasarımı ve Karakterizasyonu**" başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Lona Dana Abdalqadır ABDALQADIR

ÖZET

ULTRA GENİŞ BANTLI EŞ YÖNLÜ ANTENLERİN TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
LONA DANA ABDALQADIR ABDALQADIR
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. SEYİT AHMET SİS)
BALIKESİR, AĞUSTOS - 2026

Kablosuz haberleşme sistemlerinde artan veri hızı ve geniş frekans kapsamı gereksinimi, birden fazla bantta çalışabilen anten yapılarına duyulan ihtiyacı artırmıştır. Bu tezde, geniş bantlı çalışma ve eş yönlü ışıma hedeflenerek bikonik, diskon ve düzlemsel monopol antenler tasarlanmış; simülasyon, üretim ve ölçüm süreçleri incelenmiştir.

İlk olarak, 750 ile 1150 MHz frekans aralığında çalışan bir referans bikonik anten tasarlanmış ve antenin iki özdeş örneği dikey olarak yerleştirilerek çift anten yapısı oluşturulmuştur. Farklı antenler arası mesafelerde, üst antenin koaksiyel besleme kablosunun alt antenin içinden geçirildiği içten besleme düzeni ile kabloların dışarıdan yönlendirildiği dıştan besleme düzeni değerlendirilmiştir. Her iki düzen için empedans uyumu, antenler arası izolasyon ve ışıma özellikleri analiz edilerek en uygun koşullar belirlenmiştir.

Ardından, 1 GHz merkez frekansı esas alınarak klasik bir diskon anten tasarlanmış ve geometrik düzenlemelerle iki yeni versiyon geliştirilmiştir. Üç tasarımın karşılaştırılması sonucunda seçilen nihai yapıda, 0,87 ile 2,64 GHz ve 3,42 ile 10 GHz frekans aralıklarında VSWR değerinin 2,5'in altında kaldığı görülmüştür. Nihai tasarım üretilmiş ve ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Son olarak, eş düzlemsel dalga kılavuzu beslemeli düzlemsel bir ultra geniş bant monopol anten geliştirilmiş ve 2,15 ile 11,1 GHz frekans aralığında yansıma katsayısının -10 dB'nin altında kaldığı belirlenmiştir. Daha sonra aynı radyatör geometrisinin mikroşerit hat beslemeli versiyonu tasarlanmıştır. Her iki anten üretilmiş, ölçüm sonuçları simülasyonlarla karşılaştırılmış ve besleme yapılarının anten performansına etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca her iki antenin grup gecikmesi simülasyon ortamında incelenmiştir. Bulgular, tasarım değişkenlerinin performansta belirleyici olduğunu ve geliştirilen antenlerin geniş bantlı uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Bikonik anten, diskon anten, düzlemsel monopol anten, eş yönlü anten, ultra geniş bant antenler

Bilim Kod / Kodları : 93415 Sayfa Sayısı : 104

ABSTRACT

DESIGN AND CHARACTERIZATION OF ULTRA WIDEBAND OMNI DIRECTIONAL ANTENNAS
MSC THESIS
LONA DANA ABDALQADIR ABDALQADIR
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. SEYİT AHMET SİS)
BALIKESİR, AUGUST - 2026

The increasing demand for higher data rates and broader frequency coverage in wireless communication systems has intensified the need for antenna structures capable of operating over multiple frequency bands. In this thesis, biconical, discone, and planar monopole antennas were designed to achieve broadband operation and omnidirectional radiation characteristics, and their simulation, fabrication, and measurement processes were investigated.

First, a reference biconical antenna operating over the frequency range of 750–1150 MHz was designed, and a dual-antenna configuration was formed by vertically positioning two identical antennas. At different inter-element spacings, an internal feed configuration, in which the coaxial feed cable of the upper antenna passed through the lower antenna, and an external feed configuration, in which the cables were routed outside the antennas, were evaluated. For both configurations, impedance matching, inter-antenna isolation, and radiation characteristics were analyzed to determine the most suitable operating conditions.

Subsequently, a conventional discone antenna was designed based on a center frequency of 1 GHz, and two new versions were developed through geometric modifications. Following a comparison of the three designs, the final configuration exhibited a VSWR below 2.5 over the frequency ranges of 0.87–2.64 GHz and 3.42–10 GHz. The final design was fabricated, and the measured results were compared with the simulation results.

Finally, a coplanar waveguide-fed planar ultra-wideband monopole antenna was developed, achieving a reflection coefficient below -10 dB over the frequency range of 2.15–11.1 GHz. A microstrip line fed version using the same radiator geometry was then designed. Both antennas were fabricated, their measured results were compared with simulations, and the effects of the feeding structures on antenna performance were evaluated. In addition, the group-delay characteristics of both antennas were investigated in the simulation environment. The findings demonstrated that the design variables significantly influenced antenna performance and that the developed antennas are suitable for broadband applications.

KEYWORDS: Biconical antenna, discone antenna, omnidirectional antenna, planar monopole antenna, ultra-wideband antennas

Science Code / Codes : 93415 Page Number : 104

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **viii**
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ ..... **ix**
ÖNSÖZ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tez Amacı ve Önemi 2
1.2 Tezin Varsayımları 2
1.3 Tezin Kapsamı ve Organizasyonu 3
1.4 Kablosuz Haberleşme Sistemlerinin Bant Genişliğine Göre Sınıflandırılması 3
1.5 Ultra Geniş Bant (UGB) Teknolojisi 4
1.5.1 UGB teknolojisinin tarihçesi 7
1.5.2 UGB sistemlerin avantajları ve dezavantajları 7
1.5.3 UGB teknolojisinin kullanım alanları 8
2. UGB ANTEN TEORİSİ VE TASARIM KRİTERLERİ **10**
2.1 UGB Antenlerin Temel Karakteristikleri 10
2.1.1 Frekans alan parametreleri 10
2.1.2 Zaman alan parametreleri 12
2.2 Antenlerin Işıma Özelliklerine Göre Sınıflandırılması 14
2.2.1 Yönlü antenler 14
2.2.2 Eş yönlü antenler 15
2.3 Eş Yönlü UGB Anten Türleri 15
2.3.1 Metal plaka üzerinde geniş bantlı monopol antenler 15
2.3.2 Bikonik antenler 16
2.3.3 Diskon antenler 18
2.3.4 Düzlemsel antenler 19
2.3.4.1 Düzlemsel monopol antenler 19
2.3.4.2 Yarıklı antenler 20
2.3.4.3 Düzlemsel dipol antenler 21
2.3.4.4 Bant çentikli antenler 22
3. UGB ÇİFT BİKONİK ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ **24**
3.1 Literatürde Yapılmış Çalışmalar 24
3.2 Referans Tekil Bikonik Anten Modeli 26
3.2.1 Anten geometrisi ve konfigürasyonu 26
3.2.2 Geri dönüş kaybı analizi 28
3.2.3 Işıma örüntüsü analizi 28
3.3 Dikey Konumlandırılmış Çift Bikonik Anten Tasarımı 29
3.3.1 Anten üretimi ve malzeme seçimi 30
3.4 Tasarım 1: İçten Koaksiyel Geçişli Beslemeli Antenin Analizi 31
3.4.1 Işıma örüntüsü analizi 33
3.4.2 Ölçüm düzeneği ve ölçüm sonuçları 34
3.4.3 Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması 36
3.5 Tasarım 2: Dıştan Koaksiyel Beslemeli Antenin Analizi 39
3.5.1 Işıma örüntüsü analizi 41
3.5.2 Ölçüm düzeneği ve ölçüm sonuçları 42

İÇİNDEKİLER (devam)

3.5.3 Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması 45
3.6 Genel Performans Değerlendirmesi ve Sonuç 47
4. DİSKON ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU 48
4.1 Literatürde Yapılmış Çalışmalar 48
4.2 Diskon Anten Tasarımı 50
4.2.1 Referans diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri 50
4.2.2 İkinci versiyon diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri 54
4.2.3 Üçüncü versiyon diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri 55
4.3 Diskon Anten Tasarımlarının Karşılaştırılması ve Nihai Tasarımın Seçilmesi 59
4.4 Nihai Diskon Antenin Performans Analizi 60
4.5 Nihai Diskon Antenin Üretimi ve Deneysel Doğrulaması 64
4.6 Nihai Diskon Antenin Simülasyonu ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması 65
5. DÜZLEMSEL UGB MONOPOL ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU 67
5.1 Literatürde Yapılmış Çalışmalar 67
5.2 Düzlemsel UGB Antenlerde Besleme Yöntemleri 70
5.3 Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu (CPW) Beslemeli Düzlemsel UGB Monopol Anten Tasarımı 71
5.3.1 Anten geometrisi ve parametrik çalışmalar 71
5.3.2 Kazanç ve ışıma örüntüsü analizi 75
5.3.3 Grup gecikmesi analizi 76
5.3.4 Işıma verimi analizi 78
5.3.5 Yüzey akım dağılımı analizi 79
5.3.6 Prototip üretimi ve deneysel ölçümler 80
5.4 Mikroşerit Hat Beslemeli Düzlemsel UGB Monopol Anten Tasarımı 83
5.4.1 Anten geometrisi 83
5.4.2 Kazanç ve ışıma örüntüsü analizi 85
5.4.3 Grup gecikmesi analizi 87
5.4.4 Işıma verimi analizi 88
5.4.5 Yüzey akım dağılımı analizi 89
5.4.6 Prototip üretimi ve deneysel ölçümler 89
5.5 Mikroşerit ve CPW Beslemeli Tasarımların Karşılaştırmalı Analizi 92
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 94
6.1 Elde Edilen Bulguların Özeti 94
6.2 Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler 95
7. KAYNAKLAR 97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kesirli bant genişliği esas alınarak haberleşme sistemlerinin sınıflandırılması ... 4
Şekil 1.2: FCC tarafından iç mekân UGB sistemleri için belirlenen maksimum EIRP güç spektral yoğunluğu sınırları ... 6
Şekil 1.3: FCC tarafından dış mekân UGB sistemleri için belirlenen maksimum EIRP güç spektral yoğunluğu sınırları ... 6
Şekil 2.1: Literatürde önerilen farklı geometrilerdeki metal plaka monopol anten yapıları ... 16
Şekil 2.2: Bikonik anten yapısı; (a) iki boyutlu geometrik gösterim, (b) gerçekleştirilmiş bikonik anten örneği ... 17
Şekil 2.3: Diskon anten iki boyutlu geometrisi ... 18
Şekil 2.4: Düzlemsel monopol anten geometrilerine örnekler; (a) mikroşerit beslemeli yapılar, (b) CPW beslemeli yapılar ... 20
Şekil 2.5: Düzlemsel yarıklı anten geometrilerine örnekler; (a) mikroşerit beslemeli yapılar, (b) CPW beslemeli yapılar ... 21
Şekil 2.6: Literatürde yaygın olarak kullanılan düzlemsel dipol anten geometrileri; (a) yelpaze dipol, (b) papyon (bow-tie) dipol, (c) elmas (diamond) dipol ve (d) eliptik dipol anten ... 22
Şekil 2.7: Literatürde önerilen bant çentikli anten örnekleri; (a) tek çentikli yapılar, (b) çift çentikli yapılar ve (c) çoklu çentikli yapılar ... 23
Şekil 3.1: Antenin iki boyutlu geometrisi ve üç boyutlu modeli sunulmaktadır ... 27
Şekil 3.2: Referans tekil bikonik antene ait geri dönüş kaybı (S_{11}) sonuçları ... 28
Şekil 3.3: Referans tekil bikonik antenin farklı frekanslardaki ışıma örüntüleri: (a) 750 MHz, (b) 1000 MHz ve (c) 1150 MHz ... 29
Şekil 3.4: Çift bikonik anten için kullanılan besleme yapıları: (a) tasarım 1: içten koaksiyel geçişli besleme yapısı, (b) tasarım 2: dıştan koaksiyel besleme yapısı. ... 30
Şekil 3.5: Üretilmiş çift bikonik anten prototipi (dikey konumlandırılmış) ... 31
Şekil 3.6: Tasarım 1 için geri dönüş kaybı ve izolasyon simülasyon sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ ... 32
Şekil 3.7: Tasarım 1 için (phi=90) ve (phi=0) düzlemlerindeki ışıma örüntüleri: (a) 750 MHz, (b) 1000 MHz ve (c) 1150 MHz ... 34
Şekil 3.8: Tasarım 1 için gerçekleştirilen ölçüm düzeneği ... 35
Şekil 3.9: Tasarım 1'e ait ölçüm sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ ... 36
Şekil 3.10: Tasarım 1 için $d = 1.0\ \lambda_0$ ayrım mesafesinde simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ ... 38
Şekil 3.11: Tasarım 2 için farklı ayrım mesafelerinde elde edilen simülasyon sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ ... 40
Şekil 3.12: Tasarım 2 için (phi=90) ve (phi=0) düzlemlerindeki ışıma örüntüleri: (a) 750 MHz, (b) 1000 MHz ve (c) 1150 MHz ... 42
Şekil 3.13: Tasarım 2 için gerçekleştirilen ölçüm düzeneği ... 43
Şekil 3.14: Tasarım 2'e ait ölçüm sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ ... 44
Şekil 3.15: Tasarım 2 için $d = 1.0\ \lambda_0$ ayrım mesafesinde simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ ... 46
Şekil 4.1: Referans diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri ... 52
Şekil 4.2: L_c=75mm için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları ... 53
Şekil 4.3: L_c =90mm için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları ... 54
Şekil 4.4: İkinci versiyon diskon anten geometrisi ve H_1 parametresi ... 54

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 4.5: Farklı H_1 değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları 55
Şekil 4.6: Üçüncü versiyon diskon anten geometrisi 56
Şekil 4.7: Farklı L_d değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları 57
Şekil 4.8: Farklı H_k değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları 58
Şekil 4.9: Farklı ϕ_k değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları 59
Şekil 4.10: Üç farklı diskon anten tasarımına ait S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması 60
Şekil 4.11: Nihai diskon anten tasarımına ait VSWR sonuçları 60
Şekil 4.12: Nihai diskon anten tasarımına ait toplam verim sonuçları 61
Şekil 4.13: Nihai diskon anten tasarımına ait iki boyutlu ışıma örüntüleri; (a) 1 GHz, (b) 2 GHz, (c) 6 GHz, (d) 8 GHz ve (e) 10 GHz 62
Şekil 4.14: Nihai diskon anten tasarımının phi=90 düzlemindeki maksimum kazanç değerleri 63
Şekil 4.15: Üretilen diskon anten prototipi ve geri dönüş kaybı ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği 64
Şekil 4.16: Nihai diskon anten tasarımına ait simülasyon ve ölçüm S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması 65
Şekil 4.17: Nihai diskon anten tasarımına ait simülasyon ve ölçüm VSWR sonuçlarının karşılaştırılması 65
Şekil 5.1: (a) mikroşerit besleme hattı, (b) eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme yapısı 71
Şekil 5.2: Dairesel radyatör yapısına sahip eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) beslemeli düzlemsel monopol anten 72
Şekil 5.3: L_g parametresinin farklı değerleri için geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri .. 73
Şekil 5.4: Farklı a parametresi değerleri için geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri 73
Şekil 5.5: Kesit açısı parametresinin farklı değerleri için geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri 74
Şekil 5.6: Eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) beslemeli nihai düzlemsel monopol anten geometrisi 74
Şekil 5.7: Antenin farklı frekanslardaki E ve H düzlemlerine ait ışıma örüntüleri: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz, (d) 12 GHz 75
Şekil 5.8: Antenin çalışma bandı boyunca maksimum kazanç değişimi 76
Şekil 5.9: Önerilen anten yapısına ait frekansa bağlı grup gecikmesi karakteristiği 78
Şekil 5.10: FR-4 alt tabakasının kayıplı ve kayıpsız durumları için toplam ışıma veriminin frekansa bağlı değişimi 79
Şekil 5.11: Optimize edilmiş CPW beslemeli düzlemsel monopol antenin farklı frekanslardaki yüzey akım dağılımları: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz, (d) 12 GHz 80
Şekil 5.12: Üretilen CPW beslemeli düzlemsel monopol anten prototipinin fiziksel görünümleri: (a) arka yüzey, (b) ön yüzey 81
Şekil 5.13: CPW beslemeli antene ait ölçüm düzeneği 82
Şekil 5.14: CPW beslemeli anten yapısına ait simülasyon ve ölçüm geri dönüş kaybı karakteristiklerinin karşılaştırılması 83
Şekil 5.15: Yarıklı ve yarıksız mikroşerit beslemeli anten yapılarının geri dönüş kaybı sonuçları 84
Şekil 5.16: Nihai mikroşerit beslemeli düzlemsel monopol anten geometrisi 85
Şekil 5.17: Mikroşerit beslemeli nihai antenin farklı frekanslardaki E ve H düzlemlerine ait ışıma örüntüleri: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz 86
Şekil 5.18: Mikroşerit beslemeli antenin frekansa bağlı maksimum kazanç değişimi 87

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 5.19: Mikroşerit beslemeli anten yapısına ait frekansa bağlı grup gecikmesi karakteristiği 87
Şekil 5.20: Mikroşerit beslemeli anten yapısına ait frekansa bağlı toplam verim karakteristiği 88
Şekil 5.21: Mikroşerit beslemeli düzlemsel monopol antenin farklı frekanslardaki yüzey akım dağılımları: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz 89
Şekil 5.22: Üretilen mikroşerit beslemeli düzlemsel monopol anten prototipinin fiziksel görünümleri: (a) arka yüzey, (b) ön yüzey 90
Şekil 5.23: Mikroşerit beslemeli antene ait ölçüm düzeneği 91
Şekil 5.24: Mikroşerit beslemeli anten yapısına ait simülasyon ve ölçüm geri dönüş kaybı karakteristiklerinin karşılaştırılması 92

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Optimize edilmiş referans tekil bikonik anten parametreleri 28
Tablo 4.1: Literatürde önerilen diskon anten tasarımlarının karşılaştırılması 50
Tablo 4.2: Nail'in (1953) tarafından kullanılan parametreler ile bu çalışmada kullanılan parametrelerin karşılaştırılması 51
Tablo 4.3: L_c =90mm için hesaplanan referans anten parametreleri 53
Tablo 4.4: Geliştirilen nihai diskon antenin temel performans özellikleri 66
Tablo 5.1: Literatürde önerilen düzlemsel UGB monopol anten tasarımlarının karşılaştırılması 70
Tablo 5.2: Optimize edilmiş anten geometrisine ait parametre değerleri 75
Tablo 5.3: Optimize edilmiş anten geometrisine ait parametre değerleri 85
Tablo 5.4: Geliştirilen düzlemsel UGB monopol antenlerin temel performans özellikleri 93

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

BW : Bant genişliği (Bandwidth)
c : Işık hızı
CPW : Eş düzlemsel dalga kılavuzu (Coplanar Waveguide)
CPWG : Toprak düzlemli eş düzlemsel dalga kılavuzu (Coplanar Waveguide with Ground)
dB : Desibel
dBi : İzotropik antene göre kazanç birimi
dBm : 1 mW referanslı güç düzeyi
E : Elevation (düşey) düzlemi
EBG : Elektromanyetik bant aralığı (Electromagnetic Band Gap)
EIRP : Eşdeğer izotropik yayılan güç (Equivalent Isotropically Radiated Power)
EMC : Elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility)
f : Frekans
f_0 : Merkez frekansı
$f(t)$: Giriş sinyali
$\hat{f}(t)$: Normalize edilmiş giriş sinyali
FBW : Kesirli bant genişliği (Fractional Bandwidth)
FCC : Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission)
f_H : Üst kesim frekansı
f_L : Alt kesim frekansı
f_{max} : En yüksek frekansı
FR-4 : Alev geciktirici sınıf 4 (Flame Retardant 4)
GHz : Gigahertz
GPR : Yer altı radarı (Ground-Penetrating Radar)
H : Horizontal (yatay) düzlemi
HPBW : Yarı güç hüzme genişliği (Half-Power Beamwidth)
I_v : Antenler arasındaki izolasyon (dB)
kHz : Kilohertz
MHz : Megahertz
PET : Polietilen tereftalat (Polyethylene Terephthalate)
P_{in} : Antene uygulanan giriş gücü (W)
PLA : Polilaktik asit (Polylactic Acid)
P_{rad} : Anten tarafından ışınan güç (W)
$r(t)$: Anten tarafından yayılan sinyal
$\hat{r}(t)$: Normalize edilmiş yayılan sinyal
RF : radyo frekans (Radio Frequency)
R_{ff} : Uzak alan sınır mesafesi (m)
RL : Geri dönüş kaybı (Return Loss)
S_{11} : Birinci portun yansıma katsayısı
S_{12} : İkinci porttan birinci porta iletim katsayısı
S_{21} : Birinci porttan ikinci porta iletim katsayısı
S_{22} : İkinci portun yansıma katsayısı
SMA : A Tipi Alt-Minyatür (SubMiniature Version A)
SRR : Ayrık halkalı rezonatör (Split-Ring Resonator)
TEM : Enine elektromanyetik (Transverse Electromagnetic)

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ (devam)

UHF : Ultra yüksek frekans (Ultra High Frequency)
VHF : Çok yüksek frekans (Very High Frequency)
VSWR : Gerilim duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio)
WBAN : Kablosuz vücut alan ağı (Wireless Body Area Network)
WiMAX : Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WLAN : Kablosuz yerel alan ağı (Wireless Local Area Network)
WPAN : Kablosuz kişisel alan ağı (Wireless Personal Area Network)
Z_0 : Karakteristik empedans (Ω)
Z_i : Anten giriş empedansı (Ω)
Γ : Yansıma katsayısı
ε_r : Bağıl dielektrik sabiti
η : Işıma verimi (%)
λ : Dalga boyu (m)
λ_0 : Merkez frekansına karşılık gelen dalga boyu (m)
λ_{min} : En küçük dalga boyu (m)
τ : Zaman kayması (s)
τ_0 : İdeal serbest uzay yayılım gecikmesi (s)
τ_g : Grup gecikmesi (s)
ϖ : Faz açısı
ω : Açısal frekans (rad/s)
Ω : Ohm

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başlangıcından tamamlanmasına kadar bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden, görüşleriyle çalışmanın şekillenmesine önemli katkılar sağlayan danışmanım Prof. Dr. Seyit Ahmet Sis'e içten teşekkürlerimi sunarım. Uzun ve yoğun geçen bu süreçte yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma; her aşamada bana güvenen, karşılaştığım zorluklarda sabrı ve anlayışıyla yanımda duran sevgili eşim Yasin Biçer'e gönülden teşekkür ederim. Onun desteği, bu çalışmayı kararlılıkla sürdürebilmemde benim için büyük bir güç kaynağı olmuştur. Hayatımın her döneminde sevgileri ve emekleriyle bana güç veren aileme minnettarım. Özellikle bugünlere ulaşmamda büyük emeği bulunan, eğitim hayatım boyunca bana inanan ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen anneme en derin teşekkürlerimi sunarım. Onun sevgisi, fedakârlığı ve bana duyduğu güven, yalnızca bu tezin değil, elde ettiğim bütün başarıların temelini oluşturmuştur.

Balıkesir, 2026 **Lona Dana Abdalqadır Abdalqadır**

1. GİRİŞ

Son yıllarda kablosuz haberleşme sistemlerinde artan veri hızı, kapasite ve güvenilirlik gereksinimleri, geniş frekans aralıklarında çalışabilen haberleşme teknolojilerine olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Geleneksel dar bant sistemlerde farklı frekans bantları için birden fazla anten kullanılması gerekirken, ultra geniş bant (UGB) teknolojisi sayesinde çok geniş bir frekans aralığı tek bir anten yapısı ile kapsanabilmektedir. Bu durum, anten sistemlerinin daha kompakt, hafif ve düşük maliyetli olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. UGB sistemlerinde haberleşme çok kısa süreli darbeler kullanılarak gerçekleştirildiğinden, düşük güç spektral yoğunluğu, yüksek zaman çözünürlüğü ve sinyalin yansıma ve saçılmalar nedeniyle farklı yollar üzerinden alıcıya ulaşmasından kaynaklanan çoklu yol etkilerine karşı dayanıklılık gibi önemli avantajlar elde edilmektedir. Ayrıca düşük güç seviyelerinde çalışabilmesi, sinyalin tespit edilmesini zorlaştırarak haberleşme güvenliğine katkı sağlamakta; yüksek bant genişliği ise yüksek veri iletim hızlarının gerçekleştirilmesine imkân vermektedir. Bu özellikleri sayesinde UGB teknolojisi; radar sistemleri, hassas konum belirleme, kısa mesafeli kablosuz haberleşme, iç mekân konumlandırma, endüstriyel uygulamalar, sağlık teknolojileri ve askeri sistemler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. UGB teknolojisine olan ilginin artmasıyla birlikte farklı anten geometrileri geliştirilmiş ve bu antenlerin performansını iyileştirmeye yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte UGB anten tasarımı, yalnızca geniş empedans bant genişliği elde edilmesini değil, aynı zamanda tüm çalışma bandı boyunca kararlı ışıma örüntüsü, yüksek verim, düşük geri dönüş kaybı ve uygun giriş empedansı gibi frekans alanı performanslarının sağlanmasını gerektirmektedir. Bunun yanında, darbe tabanlı haberleşme yapısı nedeniyle faz doğrusallığı, sabit grup gecikmesi ve düşük sinyal bozulması gibi zaman alanı performans kriterlerinin de karşılanması büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla UGB anten tasarımında frekans ve zaman alanı gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesi, başarılı bir anten performansının elde edilmesinde temel tasarım kriterlerinden biridir.

Bu tez çalışmasında, eş yönlü UGB anten yapıları kapsamında bikonik, diskon ve düzlemsel anten tasarımları ele alınmıştır. İlk olarak, klasik bikonik anten geometrisi geliştirilerek konik radyatörün belirli bir bölümünden sonra silindirik yapıya dönüştürüldüğü hibrit bir anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ardından aynı anten yapısından iki adet kullanılarak dikey doğrultuda anten dizilimi oluşturulmuş ve farklı besleme kablosu yerleşimlerinin

antenler arasındaki izolasyon performansına etkisi hem simülasyon hem de deneysel ölçümler ile incelenmiştir.

İkinci aşamada, klasik diskon anten geometrisi temel alınarak bir referans anten tasarlanmış, daha sonra literatürde bant genişliğini artırmak amacıyla önerilen farklı geometrik düzenlemeleri anten yapısına uygulanarak optimize edilmiş bir diskon anten geliştirilmiştir. Tasarlanan antenin prototipi üretilmiş ve performansı simülasyon ile deneysel ölçümler kullanılarak değerlendirilmiştir.

Son olarak, FR-4 alt tabakası üzerinde düzlemsel monopol UGB anten tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde mikroşerit ve eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme teknikleri karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar doğrultusunda uygun besleme yapısı belirlenmiştir. Nihai anten tasarımının frekans alanındaki performansı değerlendirilmiş, ayrıca iki antenin alıcı ve verici olarak kullanıldığı bir düzenekte grup gecikmesi analizi gerçekleştirilerek antenin zaman alanındaki davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda tez çalışması, farklı anten geometrilerinin tasarım süreçlerini, simülasyon ve deneysel sonuçlarını birlikte ele alarak ultra geniş bantlı eş yönlü anten yapılarına yönelik bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır.

1.1 Tez Amacı ve Önemi

Bu tez çalışmasının temel amacı, UGB eş yönlü antenlerin karakteristik özelliklerini ve farklı anten geometrilerini inceleyerek bikonik, diskon ve düzlemsel anten yapılarının tasarımını gerçekleştirmek ve elde edilen performanslarını değerlendirmektir. Bu kapsamda literatürde önerilen tasarım yaklaşımlarından yararlanılarak anten geometrileri geliştirilmiş, tasarlanan antenlerin simülasyon sonuçları deneysel ölçümler ile doğrulanmıştır. Ayrıca düzlemsel monopol antende farklı besleme tekniklerinin anten performansına etkileri karşılaştırılmış, çift bikonik anten yapısında ise farklı besleme kablosu yerleşimlerinin antenler arasındaki izolasyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Böylece, ultra geniş bantlı eş yönlü antenlerin tasarımı, karakterizasyonu ve deneysel doğrulanmasına yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Varsayımları

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen elektromanyetik simülasyonlarda, iletken malzemelerin elektriksel iletkenlikleri sonsuz kabul edilmiştir, dielektrik malzemeler ise üretimde kullanılacak malzemeler ile aynı elektriksel özellikleri gösterecek şekilde modellenmiştir.

Simülasyon analizlerinde antenlerin serbest uzay koşullarında çalıştığı esas alınmıştır. Deneysel ölçümlerin uygun kalibrasyon koşulları altında gerçekleştirildiği, ölçüm sisteminden kaynaklanan belirsizliklerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve üretim toleranslarının anten performansı üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı varsayılmıştır.

1.3 Tezin Kapsamı ve Organizasyonu

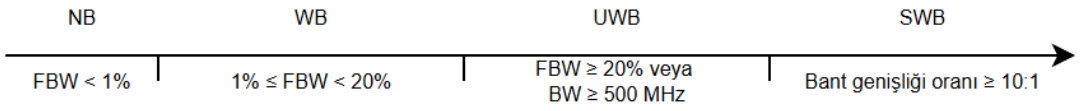
Bu tez yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amacı, önemi ve varsayımları açıklanmış, kablosuz haberleşmenin temel kavramları ile UGB teknolojisinin tanımı, tarihsel gelişimi, avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları ele alınmıştır. İkinci bölümde UGB anten teorisi ve tasarım kriterleri açıklanmış; antenlerin frekans ve zaman alanı performans parametreleri incelenmiştir. Ayrıca antenler ışıma özelliklerine göre sınıflandırılmış ve eş yönlü UGB anten çeşitleri tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde UGB çift bikonik anten tasarımı gerçekleştirilmiş, anten prototipleri üretilmiş ve farklı besleme kablosu yerleşimlerinin antenler arasındaki izolasyon performansına etkisi simülasyon ve deneysel ölçümler ile değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde klasik diskon anten geometrisi temel alınarak anten tasarımı, optimizasyonu süreci sunulmuş, geliştirilen antenin performansı simülasyon ve deneysel ölçümler ile analiz edilmiştir. Beşinci bölümde düzlemsel ultra geniş bant monopol anten tasarlanmış, farklı besleme teknikleri karşılaştırılarak antenlerin performans analizleri sunulmuştur. Altıncı bölümde tez kapsamında elde edilen bulgular genel olarak değerlendirilmiş, ulaşılan sonuçlar özetlenmiş ve gelecekte gerçekleştirilebilecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur. Yedinci bölümde ise tez kapsamında yararlanılan kaynaklar listelenmiştir.

1.4 Kablosuz Haberleşme Sistemlerinin Bant Genişliğine Göre Sınıflandırılması

Kablosuz haberleşme sistemleri, kesirli bant genişliğine (Fractional Bandwidth, FBW) göre genel olarak dar bant (Narrowband, NB), geniş bant (Wideband, WB) ve ultra geniş bant (Ultra-Wideband, UWB) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, haberleşme sistemlerinin kullandıkları kesirli bant genişliğini esas almakta olup farklı haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan temel ölçütlerden biridir (Ghavami et al., 2007).

Şekil 1.1'de haberleşme sistemlerinin kesirli bant genişliğine göre genel sınıflandırılması gösterilmektedir. FBW değerinin %1'in altında olması durumunda sistem dar bant, %1 ile %20 arasında olması durumunda ise geniş bant olarak tanımlanmaktadır. FBW değerinin

%20 veya daha büyük olması ya da mutlak bant genişliğinin en az 500 MHz olması durumunda ise sistem ultra geniş bant olarak kabul edilmektedir. Bu sınıflandırma, UWB teknolojisini diğer haberleşme sistemlerinden ayıran temel kriterlerden biridir (Zheng et al., 2023). Son yıllarda anten literatüründe, ultra geniş bant antenlerden daha yüksek bant genişliği oranına sahip anten yapıları için süper geniş bant (Super Wideband, SWB) kavramı kullanılmaya başlanmıştır. UWB teknolojisinden farklı olarak SWB için uluslararası standart kuruluşları tarafından kabul edilmiş kesin bir tanım bulunmamaktadır. Bununla birlikte birçok çalışmada, bant genişliği oranı 10:1 veya daha yüksek olan antenler süper geniş bant olarak değerlendirilmektedir (K.-R. Chen et al., 2011; Dey and Karmakar, 2020 ;Tran et al., 2010). Bu tür antenler, sahip oldukları çok geniş çalışma bantları sayesinde farklı frekans bantlarında çalışabilmeleri ve çok sayıda kablosuz haberleşme ile algılama uygulamasında kullanılabilmeleri açısından önemli avantajlar sunmaktadır.



Şekil 1.1: Kesirli bant genişliği esas alınarak haberleşme sistemlerinin sınıflandırılması.

Bu tez çalışmasının temelini oluşturan ultra geniş bant teknolojisinin tanımı, tarihsel gelişimi, avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

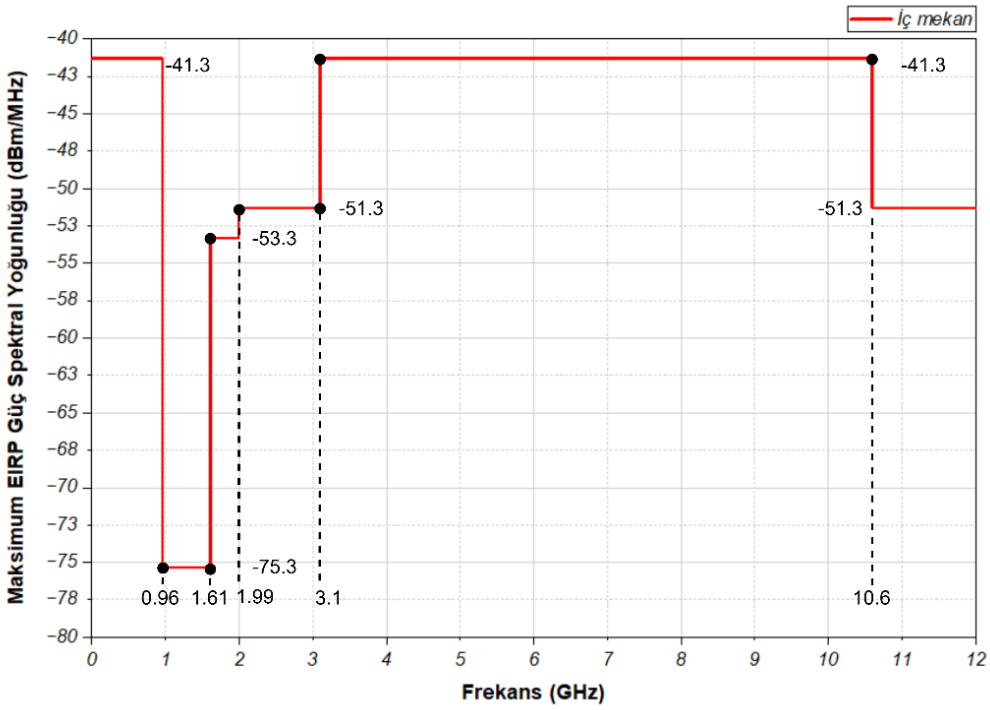
1.5 Ultra Geniş Bant (UGB) Teknolojisi

UGB teknolojisi, klasik dar bant haberleşme sistemlerinden farklı olarak bilgiyi çok kısa süreli elektromanyetik darbeler kullanarak ileten geniş bantlı bir haberleşme teknolojisidir. Bu darbelerin nanosaniye mertebesinde kısa süreli olması, sinyal enerjisinin geniş bir frekans aralığına yayılmasına neden olmaktadır. Böylece UGB sistemleri, geniş bir bantta düşük güç seviyelerinde çalışabilmekte ve aynı frekans spektrumunu kullanan diğer haberleşme sistemleriyle birlikte kullanılabilmektedir. Bu çalışma prensibi, UGB teknolojisini geleneksel dar bant haberleşme sistemlerinden ayıran en temel özelliklerden biridir (Ghavami et al., 2007). UGB teknolojisi uzun yıllar boyunca düşük yakalanma olasılığı (Low Probability of Intercept, LPI), yüksek mesafe çözünürlüğü ve hassas algılama yetenekleri nedeniyle ağırlıklı olarak askeri haberleşme ve radar sistemlerinde kullanılmıştır. Ancak teknolojinin sivil ve ticari haberleşme alanında yaygınlaşmasındaki en önemli

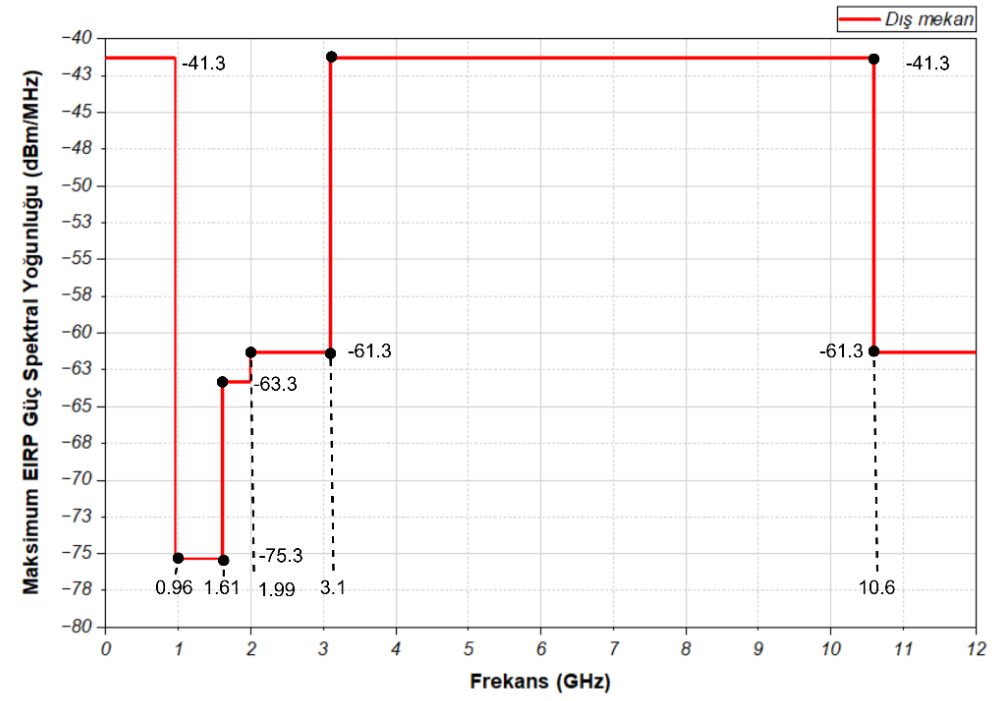
gelişme, 2002 yılında Amerika Birleşik Devletleri Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission, FCC) tarafından yayımlanan düzenleme olmuştur. Bu düzenleme ile 3,1–10,6 GHz frekans bandının belirlenen güç sınırları içerisinde lisans gerektirmeden UGB haberleşme sistemleri tarafından kullanılmasına izin verilmiş, aynı zamanda mevcut kablosuz haberleşme sistemleriyle birlikte çalışabilmesi amacıyla izin verilen maksimum güç spektral yoğunluğu sınırları belirlenmiştir (FCC, 2003).

FCC tarafından belirlenen güç sınırları, eşdeğer izotropik yayılan gücü (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP) esas alınarak ifade edilmektedir. EIRP, anten kazancı da dikkate alınarak bir verici sisteminin izotropik bir antene eşdeğer olarak yaydığı etkin çıkış gücünü ifade etmektedir. Düşük EIRP güç spektral yoğunluğu sayesinde UGB sistemleri, aynı frekans spektrumunu kullanan diğer kablosuz haberleşme sistemleriyle elektromanyetik girişim oluşturmadan birlikte çalışabilmektedir. FCC tarafından iç mekân ve dış mekân uygulamaları için belirlenen maksimum EIRP güç spektral yoğunluğu sınırları sırasıyla Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te gösterilmektedir (FCC, 2003).

FCC tarafından izin verilen düşük güç spektral yoğunluğu nedeniyle UGB sistemleri, yüksek veri iletim hızının hedeflendiği uygulamalarda genellikle kısa mesafeli haberleşme için tercih edilmektedir. Daha uzun haberleşme mesafelerine ihtiyaç duyulması durumunda ise veri iletim hızından ödün verilmesi gerekmektedir. UGB teknolojisinin önemli özelliklerinden biri, fiziksel katman yapısı sayesinde veri iletim hızı ile haberleşme mesafesi arasında esnek bir denge kurulabilmesidir UGB sistemlerinde bir bitlik bilginin iletimi, bir veya birden fazla düşük enerjili darbe kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bir bitin iletiminde kullanılan darbe sayısının artırılması veri iletim hızını azaltırken haberleşme mesafesini artırmakta, darbe sayısının azaltılması ise daha yüksek veri iletim hızlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde aynı UGB sistemi, farklı veri iletim hızı ve haberleşme mesafesi gereksinimlerine uyarlanabilmektedir (Oppermann et al., 2004).



Şekil 1.2: FCC tarafından iç mekân UGB sistemleri için belirlenen maksimum EIRP güç spektral yoğunluğu sınırları (FCC, 2003)



Şekil 1.3: FCC tarafından dış mekân UGB sistemleri için belirlenen maksimum EIRP güç spektral yoğunluğu sınırları (FCC, 2003)

1.5.1 UGB teknolojisinin tarihçesi

UGB teknolojisinin kökeni, kablosuz haberleşmenin ilk yıllarına kadar uzanmaktadır. Elektromanyetik dalgaların James Clerk Maxwell tarafından teorik olarak açıklanmasının ardından Heinrich Hertz'in 1886 yılında gerçekleştirdiği deneyler, kısa süreli elektromanyetik darbelerin üretilebildiğini göstermiştir. Daha sonra Guglielmo Marconi tarafından geliştirilen kıvılcım aralıklı (spark-gap) vericiler ile gerçekleştirilen ilk kablosuz haberleşme sistemleri, geniş bantlı darbeli sinyaller üretmeleri nedeniyle günümüzde UGB teknolojisinin ilk örnekleri olarak kabul edilmektedir. Ancak bu sistemler, geniş spektrum kaplamaları ve diğer haberleşme sistemleri üzerinde oluşturdukları girişim nedeniyle zamanla yerlerini sürekli dalga tabanlı dar bant haberleşme sistemlerine bırakmıştır (Nikookar and Prasad, 2009). UGB teknolojisine yönelik ilgi, 1960'lı yıllarda zaman alanı elektromanyetiği üzerine yapılan çalışmalarla yeniden artmıştır. 1 nanosaniyeden daha kısa süreli darbe üretme teknikleri geliştirilmesi, örnekleme osiloskoplarının kullanılmaya başlanması ve darbe yanıtı temelli analiz yöntemlerinin geliştirilmesi, modern UGB sistemlerinin teorik ve deneysel altyapısını oluşturmuştur. Aynı dönemde Gerald Ross, Kenneth Robbins ve Henning Harmuth tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, darbe tabanlı haberleşme sistemlerinin gelişimine önemli katkılar sağlamış, 1989 yılında ise Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından ilk kez Ultra Wideband (UWB) terimi kullanılmaya başlanmıştır (Powell, 2004). 2000'li yıllarla birlikte UGB teknolojisine yönelik akademik ve endüstriyel araştırmalar önemli ölçüde hız kazanmıştır. Özellikle haberleşme sistemleri, darbe üretim teknikleri, alıcı-verici yapıları ve geniş bant anten tasarımlarına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar, UGB teknolojisinin olgunlaşmasına önemli katkılar sağlamıştır. Günümüzde UGB teknolojisi, geliştirilen uluslararası standartlar ve artan araştırma faaliyetleri sayesinde kablosuz haberleşme alanında önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir.

1.5.2 UGB sistemlerin avantajları ve dezavantajları

UGB teknolojisi, geleneksel dar bant haberleşme sistemlerine göre birçok önemli üstünlüğe sahiptir. Geniş frekans spektrumunu kullanabilmesi sayesinde yüksek veri iletim hızlarına ulaşılabilmekte, çok kısa süreli darbeler kullanılması ise çoklu yol yayılımının olumsuz etkilerini azaltmaktadır. Düşük güç spektral yoğunluğu ile çalışması, aynı frekans spektrumunu kullanan diğer kablosuz haberleşme sistemleriyle minimum elektromanyetik girişim oluşturarak birlikte çalışabilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca taşıyıcı frekans gerektirmeyen darbe tabanlı iletim yapısı, alıcı-verici mimarisini sadeleştirirken düşük

ortalama çıkış gücü sinyalin tespit edilmesini zorlaştırmaktadır (Altuntaş, 2016). Bunun yanında yüksek zaman çözünürlüğü ve farklı malzemeler içerisinden yayılabilme özelliği sayesinde UGB teknolojisi, haberleşme sistemlerinin yanı sıra radar ve görüntüleme uygulamalarında da önemli avantajlar sunmaktadır (Aydın, 2019).

Bununla birlikte UGB teknolojisinin bazı teknik sınırlamaları da bulunmaktadır. Düşük güç seviyelerinde çalışması nedeniyle haberleşme mesafesi sınırlı kalmaktadır. Ayrıca nanosaniye seviyesindeki darbelerin üretilmesi ve işlenmesi; darbe bozulması, kanal kestirimi, zaman senkronizasyonu ve çok kullanıcılı haberleşme gibi konularda önemli tasarım zorluklarını beraberinde getirmektedir. Bunun yanı sıra yüksek örnekleme hızına sahip donanım gereksinimi ve alıcı-verici devrelerinin hassas zamanlama ihtiyacı, UGB sistemlerinin gerçekleştirilmesini güçleştiren diğer önemli etkenlerdir (Aydın, 2019). Bu nedenle UGB sistemlerinde yüksek performans elde edebilmek için anten, alıcı-verici ve sinyal işleme birimlerinin birlikte optimize edilmesi gerekmektedir.

1.5.3 UGB teknolojisinin kullanım alanları

UGB teknolojisinin en yaygın kullanım alanlarından biri kısa mesafeli yüksek hızlı kablosuz haberleşme sistemleridir. UGB'nin sunduğu geniş bant kapasitesi sayesinde çok yüksek veri iletim hızlarına ulaşılabilmekte, bu sayede kablosuz kişisel alan ağları (WPAN), kablosuz USB (Wireless USB), yüksek çözünürlüklü ses ve video aktarımı, ev eğlence sistemleri ile farklı elektronik cihazlar arasında kablosuz veri paylaşımı gibi uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir. Düşük güç tüketimi ve çoklu yol yayılımına karşı gösterdiği dayanıklılık da UGB teknolojisini özellikle iç mekân haberleşme uygulamaları için uygun hâle getirmektedir (Guo, 2009).

UGB teknolojisinin öne çıktığı bir diğer önemli uygulama alanı hassas konum belirleme ve takip sistemleridir. Nanosaniye mertebesindeki darbe sinyalleri sayesinde sinyalin uçuş süresi (Time of Flight, ToF) yüksek doğrulukla ölçülebilmekte ve böylece santimetre seviyesinde konum belirleme gerçekleştirilebilmektedir (Zheng et al., 2023). Bu özellik; depo yönetimi, akıllı fabrikalar, robotik sistemler, otonom araçlar gibi uygulamalarda UGB teknolojisinin yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Özellikle iç mekân ortamlarında çoklu yol yayılımının başarılı şekilde ayrıştırılabilmesi, UGB tabanlı konumlandırma sistemlerini Wi-Fi ve Bluetooth gibi diğer kısa mesafeli haberleşme teknolojilerine göre daha avantajlı hâle getirmektedir (Zheng et al., 2023).

UGB teknolojisi, radar ve görüntüleme sistemlerinde de önemli bir kullanım alanına sahiptir. Çok kısa süreli darbeler ve geniş çalışma bant genişliği sayesinde yüksek mesafe çözünürlüğü elde edilebilmekte, hedeflerin konumu ve geometrik özellikleri daha ayrıntılı olarak belirlenebilmektedir. Bu özelliklerden yararlanılarak yer altı görüntüleme radarları (Ground Penetrating Radar, GPR), duvar arkası görüntüleme sistemleri, mayın tespiti, sınır güvenliği, afet ve arama-kurtarma uygulamaları ile çeşitli savunma sistemleri geliştirilmektedir. Ayrıca biyomedikal görüntüleme uygulamalarında da farklı dokuların elektromanyetik özelliklerinden yararlanılarak teşhis amaçlı görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir (Saha et al., 2019).

UGB teknolojisinin düşük güç tüketimi ve basit darbe tabanlı haberleşme yapısı, kablosuz sensör ağları ile vücut alan ağlarında (Wireless Body Area Network, WBAN) da önemli avantajlar sağlamaktadır. Düşük enerji gereksinimi sayesinde uzun pil ömrüne sahip sensör düğümleri tasarlanabilmekte, aynı zamanda güvenilir veri iletimi gerçekleştirilebilmektedir (Ranga, 2011). Bu özellikleri nedeniyle UGB teknolojisi; hasta takip sistemleri, giyilebilir sağlık cihazları, çevresel izleme, endüstriyel otomasyon, akıllı bina uygulamaları ve Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) tabanlı haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son yıllarda konum belirleme doğruluğu, düşük gecikme süresi ve güvenilir kısa mesafeli haberleşme özellikleri sayesinde UGB teknolojisinin tüketici elektroniğinde kullanım alanı da hızla genişlemektedir. Akıllı telefonlar, akıllı saatler, dijital anahtar sistemleri ve gerçek zamanlı cihaz takibi gibi uygulamalarda UGB teknolojisi yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olup, gelecekte 6G haberleşme sistemleri ve yüksek hassasiyet gerektiren kablosuz haberleşme uygulamalarında daha geniş kullanım alanı bulması beklenmektedir.

2. UGB ANTEN TEORİSİ VE TASARIM KRİTERLERİ

2.1 UGB Antenlerin Temel Karakteristikleri

UGB antenlerin tasarım ve performans değerlendirme süreçlerinde frekans alanı ve zaman alanı parametreleri birlikte ele alınmaktadır. Antenin empedans uyumu, bant genişliği, ışıma karakteristikleri ve darbe iletim performansı gibi özellikler, tasarım sürecinde dikkate alınan temel kriterleri oluşturmaktadır (Verma et al., 2026). Ayrıca anten geometrisi ve ışıma yapısı da elde edilen performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İzleyen alt bölümlerde, antenlerin frekans alanı ve zaman alanı parametreleri ayrı başlıklar altında açıklanmıştır.

2.1.1 Frekans alan parametreleri

Frekans alanı parametreleri, anten performansının değerlendirilmesinde kullanılan temel ölçütleri oluşturmaktadır. Bu parametreler sayesinde antenin empedans uyumu, çalışma frekans aralığı ve ışınım karakteristikleri belirlenebilmektedir. Bu bölümde anten performansını tanımlayan temel frekans alanı parametreleri açıklanmıştır.

Geri Dönüş Kaybı: Bir antenin besleme portuna uygulanan gücün ne kadarının empedans uyumsuzluğu nedeniyle kaynağa geri yansıdığını gösteren temel performans parametrelerinden biridir. Bu parametre, anten giriş empedansı ile besleme hattının karakteristik empedansı arasındaki uyumun bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Geri dönüş kaybının mutlak değerinin artması, yansıyan güç miktarının azalmasına ve anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyumunun iyileşmesine karşılık gelmektedir (Abotalebi, 2023). Geri dönüş kaybı, yansıma katsayısı Γ kullanılarak

$$\mathrm{RL(dB)} = -20\log_{10}|\Gamma| \tag{2.1}$$

Burada yansıma katsayısı, anten giriş empedansı (Z_i) ile referans empedans (Z_0) arasındaki ilişki kullanılarak

$$\Gamma = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \tag{2.2}$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Abotalebi, 2023).

Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR): Anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyumunu değerlendirmek için kullanılan önemli bir parametredir. VSWR değeri, yansıma katsayısı Γ kullanılarak

$$\mathrm{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{2.3}$$

şeklinde ifade edilmektedir (Balanis, 2005).

VSWR değerinin 1'e yaklaşması, anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyumunun iyileştiğini göstermektedir. Anten uygulamalarında genellikle (VSWR < 2) koşulu kabul edilebilir çalışma kriteri olarak değerlendirilmektedir (Balanis, 2005).

Bant Genişliği (BW): Ultra geniş bant antenleri tanımlayan en önemli performans parametrelerinden biridir. Bu parametre, antenin belirlenen empedans uyumu, kazanç ve verim kriterlerini sağladığı frekans aralığını ifade etmektedir. UGB antenlerde geniş bant genişliği elde edilmesi, antenin geniş bir frekans aralığında etkin şekilde çalışabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Stutzman and Thiele, 1981).

Kesirli bant genişliği (Fractional Bandwidth, FBW), alt ve üst çalışma frekansları kullanılarak

$$\mathrm{FBW} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \times 100 \tag{2.4}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada; f_H antenin çalışma bandındaki üst frekans sınırını, f_L antenin çalışma bandındaki alt frekans sınırını ifade etmektedir.

UGB antenlerde alt ve üst frekans sınırları genellikle geri dönüş kaybının -10 dB'den küçük olduğu veya VSWR değerinin 2'den küçük olduğu frekanslar dikkate alınarak belirlenmektedir (Karamanoğlu, 2014).

Verim (Efficiency): Antene uygulanan giriş gücünün ne kadarının elektromanyetik enerji olarak ışımaya dönüştürüldüğünü gösteren önemli bir performans parametresidir. Anten yapısında bulunan iletken ve dielektrik kayıplar nedeniyle giriş gücünün tamamı ışımaya

dönüştürülememektedir. Bu nedenle verim, antenin enerjiyi ne kadar etkin kullandığının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Volakis, 2007).

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \tag{2.5}$$

Burada; η anten verimini, P_{rad} anten tarafından ışınan gücü, P_{in} anten girişine uygulanan toplam gücü ifade etmektedir.

Anten verimi, çalışma frekansına bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Özellikle geniş bantlı antenlerde verimin çalışma bandı boyunca kararlı bir şekilde korunması istenmektedir. Bu nedenle anten tasarımında yalnızca empedans uyumu değil, aynı zamanda çalışma bandı boyunca elde edilen verim değerleri de önemli bir performans ölçütü olarak değerlendirilmektedir (Volakis, 2007).

Işıma Örüntüsü: Bir anten tarafından yayılan elektromanyetik enerjinin uzaydaki yönsel dağılımını gösteren temel anten parametrelerinden biridir. Bu parametre, antenin farklı yönlerdeki ışınım karakteristiğinin incelenmesine olanak sağlayarak anten performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Işıma örüntüleri genellikle iki veya üç boyutlu grafikler ile gösterilmekte olup antenin maksimum ışınım yönü, ana lobu, yan lobları ve arka lobu hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca antenin enerjiyi belirli bir doğrultuda mı yoğunlaştırdığı yoksa geniş bir alana mı dağıttığı da ışıma örüntüsü üzerinden değerlendirilebilmektedir.

Bu nedenle ışıma örüntüsü, antenlerin kapsama özelliklerinin belirlenmesi ve farklı anten yapılarının karşılaştırılmasında kullanılan önemli performans parametrelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Volakis, 2007).

2.1.2 Zaman alan parametreleri

UGB antenlerin performansının değerlendirilmesinde frekans alanı parametrelerinin yanı sıra zaman alanı parametreleri de önemli bir yer tutmaktadır. Zaman alanı analizleri, antenlerin geniş bantlı sinyallerin iletimi sırasında oluşturduğu gecikme ve bozulmaların incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede antenlerin sinyal iletim performansı daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Grup Gecikmesi (Group Delay): Bir sinyalin verici antenden alıcı antene iletilmesi sırasında uğradığı zaman gecikmesini ifade eden önemli bir zaman alanı parametresidir. Bu parametre, anten sisteminin farklı frekanslardaki sinyalleri ne kadar benzer sürelerde ilettiğini göstermektedir (Wiesbeck et al., 2009).

$$\tau_g = -\frac{\mathrm{d}\omega(\omega)}{\mathrm{d}\omega} \tag{2.6}$$

Burada; τ_g grup gecikmesini, ω anten sisteminin faz açısını, ω açısal frekansı ifade etmektedir.

Grup gecikmesinin çalışma frekans aralığı boyunca mümkün olduğunca sabit olması istenmektedir. Grup gecikmesinde meydana gelen ani değişimler, sinyalin farklı frekans bileşenlerinin alıcıya farklı zamanlarda ulaşmasına neden olabilmekte ve bu durum sinyal bozulmalarına yol açabilmektedir (Wiesbeck et al., 2009).

Darbe Yanıtı (Impulse Response): Bir anten veya haberleşme sisteminin çok kısa süreli bir giriş darbesine verdiği zaman alanı cevabını ifade etmektedir. UGB sistemlerde bilgi aktarımı kısa süreli elektromanyetik darbeler ile gerçekleştirildiğinden, antenlerin iletilen sinyal üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde darbe yanıtı önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Darbe yanıtı, sistemin zaman alanındaki karakteristiğini tanımlamakta ve iletilen sinyalin genlik, faz ve zaman bakımından ne ölçüde değişime uğradığını göstermektedir. İdeal durumda alınan darbenin, gönderilen darbenin şeklini mümkün olduğunca koruması beklenmektedir. Darbe yanıtında meydana gelen zamansal yayılmalar ve istenmeyen salınımlar ise sinyal bozulmalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle darbe yanıtı, UGB antenlerin zaman alanındaki performansının ve sinyal bütünlüğünü koruma yeteneğinin değerlendirilmesinde kullanılan temel parametrelerden biridir (Nikookar and Prasad, 2009).

Benzerlik Faktörü (Fidelity Factor): Bir antenin darbe şeklini ne ölçüde koruyabildiğini değerlendirmek için kullanılan bir parametredir. Bu parametre, anten girişine uygulanan darbe sinyali ile anten tarafından yayılan darbe arasındaki şekil benzerliğini ifade etmektedir. Benzerlik faktörünün hesaplanabilmesi için giriş sinyali r(t) ve yayılan sinyal f(t) öncelikle normalize edilmektedir. Bu işlem, sinyallerin genliklerinden bağımsız olarak yalnızca şekillerinin karşılaştırılmasını sağlamaktadır (Quintero Díaz de León, 2010).

$$\hat{r}(t) = \frac{r(t)}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |r(t)|^2 dt\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.7}$$

$$\hat{f}(t) = \frac{f(t)}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt\right]^{1/2}} \tag{2.8}$$

Benzerlik faktörü, normalize edilmiş sinyaller arasındaki çapraz korelasyonun maksimum değeri olarak tanımlanmaktadır (Quintero Díaz de León, 2010):

$$FF = \max_{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(t)\, \hat{r}(t+\tau) dt \tag{2.9}$$

Burada (τ), iki sinyal arasındaki zaman kaymasını ifade etmektedir. Benzerlik faktörü 0 ile 1 arasında değer almakta olup, değerin 1'e yaklaşması yayılan darbenin giriş darbesine daha fazla benzediğini ve antenin darbe şeklini daha iyi koruduğunu göstermektedir. Düşük FF değerleri ise darbe üzerindeki bozulmaların arttığını ifade etmektedir. Bu nedenle benzerlik faktörü, antenlerin darbe iletim performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan zaman alanı parametrelerinden biridir.

2.2 Antenlerin Işıma Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Antenler, elektromanyetik enerjiyi uzaya yayma biçimlerine göre sınıflandırılabilmektedir. Işımanın belirli bir doğrultuda yoğunlaşması veya farklı yönlere yayılması antenlerin temel özelliklerinden biridir. Bu kapsamda antenler, ışıma karakteristiklerine göre yönlü ve eş yönlü antenler olarak iki grupta incelenmektedir (Balanis, 2005).

2.2.1 Yönlü antenler

Yönlü antenler, elektromanyetik enerjiyi belirli bir doğrultuda yoğunlaştıracak şekilde tasarlanmış antenlerdir. Bu antenlerde ışıma enerjisinin büyük bölümü belirli bir açı içerisinde toplanırken diğer yönlerdeki ışıma seviyeleri daha düşük kalmaktadır. Bu özellik, yüksek kazanç elde edilmesine ve uzak mesafeli haberleşme bağlantılarının kurulmasına olanak sağlamaktadır. Ancak etkin ışımanın belirli bir doğrultuda gerçekleşmesi nedeniyle antenin hedef bölgeye doğru yönlendirilmesi gerekmektedir. Parabolik reflektör antenler, horn antenler, vivaldi antenler, log-periyodik antenler, patch anten dizileri ve Yagi-Uda antenler yönlü antenlere örnek olarak verilebilir.

2.2.2 Eş yönlü antenler

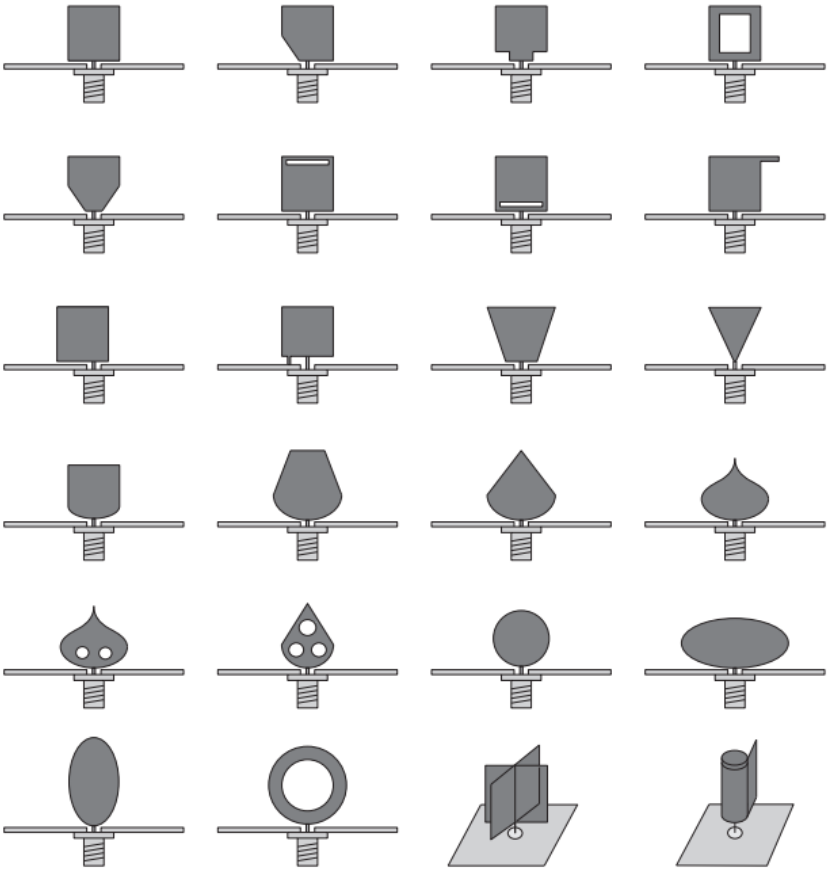
Eş yönlü antenler, elektromanyetik enerjiyi yatay düzlemde mümkün olduğunca eşit şekilde dağıtacak biçimde tasarlanan antenlerdir. Bu antenlerde belirli bir doğrultuya yoğunlaşmış ışımadan ziyade geniş açılı kapsama alanı hedeflenmektedir. Eş yönlü antenler; mobil haberleşme sistemleri, yayın sistemleri, ölçüm uygulamaları ve ultra geniş bant sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük yönlülüğe sahip olmalarına rağmen geniş kapsama alanı sağlayabilmeleri bu antenlerin başlıca avantajları arasında yer almaktadır. Bu tez kapsamında incelenen eş yönlü UGB anten türleri bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.3 Eş Yönlü UGB Anten Türleri

Eş yönlü UGB antenler, çalışma frekans aralığı, boyut, üretim yöntemi, besleme yapısı ve uygulama gereksinimleri gibi çeşitli kriterlere bağlı olarak farklı geometrilerde tasarlanabilmektedir. Geniş bant karakteristiğinin sağlanabilmesi amacıyla literatürde farklı anten yapıları geliştirilmiş olup, her bir yapı kendine özgü avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Bu bölümde literatürde yaygın olarak kullanılan eş yönlü UGB anten türleri incelenmiş ve temel özellikleri özetlenmiştir.

2.3.1 Metal plaka üzerinde geniş bantlı monopol antenler

Metal plaka üzerinde geniş bantlı monopol antenler, klasik tel monopol antenlerin bant genişliğini artırmak amacıyla geliştirilmiş yapılardan biridir. Bu antenlerde ışıyıcı eleman; dairesel, eliptik, dikdörtgen, konik ve benzeri farklı geometrilerde metal plakalar kullanılarak oluşturulabilmektedir Şekil 2.1'de metal plaka tabanlı geniş bant monopol antenler için literatürde önerilmiş farklı ışıyıcı eleman geometrilerine örnekler gösterilmektedir (Cicchetti et al., 2017). Metal plaka kullanımı, daha geniş empedans bant genişliği elde edilmesine ve mekanik olarak daha dayanıklı anten yapılarının gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu antenler uygun bir toprak düzlemi ile birlikte kullanıldığında yatay düzlemde eş yönlü ışıma karakteristiği sağlayabilmekte ve bu nedenle kara, hava ve deniz platformlarında kullanılan haberleşme sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 2.1: Literatürde önerilen farklı geometrilerdeki metal plaka monopol anten yapıları (Cicchetti et al., 2017)

2.3.2 Bikonik antenler

Bikonik antenler, geniş bant çalışma gereksinimlerini karşılamak amacıyla geliştirilmiş en temel anten yapılarından biridir. Tarihsel olarak ilk bikonik anten tasarımlarının 1897 yılında Sir Oliver Lodge tarafından gerçekleştirildiği, daha sonra ise Marconi tarafından farklı haberleşme uygulamalarında kullanıldığı bilinmektedir. Geniş frekans aralığında çalışabilmeleri nedeniyle bikonik antenler, geniş bant anten teorisinin gelişiminde önemli bir yere sahip olmuş ve birçok anten yapısının analizinde temel model olarak kullanılmıştır (Kraus, 1997). Bikonik antenin temel geometrisi ve örnek bir gerçekleştirilmiş yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

Bikonik anten, ortak bir besleme noktasında birleştirilen iki iletken koniden oluşmaktadır. Bu yapı, geometrik olarak genişleyen bir iletim hattına benzetilebildiğinden antenin analizi çoğunlukla iletim hattı teorisine dayanmaktadır. Koniler arasındaki bölgede baskın olarak TEM (Transverse Electromagnetic) mod yayılmakta ve bu durum antenin geniş frekans aralığında kararlı bir empedans karakteristiği göstermesine olanak sağlamaktadır. Sonsuz

uzunlukta ideal bir bikonik anten için karakteristik empedans yalnızca koni açıklık açısına bağlı olup frekanstan bağımsızdır (Galvan-Tejada et al., 2016). Bikonik antenlerin geniş bant özelliği, tek bir rezonans frekansına bağlı olmamalarından kaynaklanmaktadır. Anten yapısında birbirine yakın çok sayıda rezonansın oluşması sonucunda geniş bir çalışma bandı elde edilebilmektedir. Ayrıca koni açıklık açısının artırılması, anten giriş empedansının reaktif bileşenini azaltarak daha geniş bant genişliklerinin elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Licul, 2004). Bu nedenle bikonik antenler, ultra geniş bant uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen eş yönlü anten türlerinden biri haline gelmiştir.

Bikonik antenler; geniş empedans bant genişliği, kararlı giriş empedansı ve eş yönlü ışıma karakteristikleri gibi önemli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte düşük frekanslarda çalışabilmek için fiziksel boyutlarının büyümesi, bu antenlerin en önemli dezavantajlarından biridir. Bu nedenle kompaktlık gerektiren uygulamalarda bikonik antenlerden türetilmiş farklı anten yapıları geliştirilmektedir.

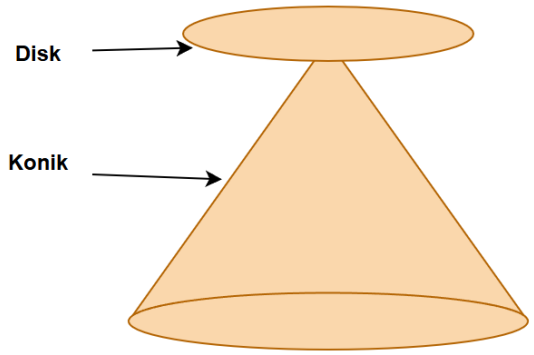
Geniş bant performansları ve eş yönlü ışıma özellikleri nedeniyle bikonik antenler; EMC ölçümleri, anten kalibrasyon sistemleri, spektrum izleme sistemleri, elektronik harp uygulamaları, geniş bant haberleşme sistemleri ve ultra geniş bant ölçüm platformlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca birçok modern UGB anten yapısının geliştirilmesinde referans anten modeli olarak da kullanılmaktadır.



Şekil 2.2: Bikonik anten yapısı; (a) iki boyutlu geometrik gösterim, (b) gerçekleştirilmiş bikonik anten örneği (Licul, 2004)

2.3.3 Diskon antenler

Diskon antenler, bikonik antenlerden türetilmiş geniş bantlı anten yapılarından biridir. Klasik bikonik antenlerde iki konik iletken kullanılırken, diskon antenlerde üst koni yerine iletken bir disk kullanılarak daha kompakt bir yapı elde edilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde bikonik antenlerin geniş bant özellikleri büyük ölçüde korunurken antenin fiziksel boyutları azaltılabilmektedir. Diskon anten ilk olarak Kandoian tarafından önerilmiş, daha sonra Nail tarafından 1953 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile geometrik parametreleri ve tasarım esasları sistematik olarak ortaya konulmuştur (Nail, 1953). Diskon antenin temel geometrisi Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Diskon anten iki boyutlu geometrisi

Diskon anten, koaksiyel besleme hattının iç iletkenine bağlanan bir disk ile dış iletkenine bağlanan konik iletken yapıdan oluşmaktadır. Disk çapı, koninin eğik uzunluğu, koni açıklık açısı ve disk-koni aralığı antenin empedans uyumu ve çalışma bandı üzerinde doğrudan etkilidir. Alt çalışma frekansı büyük ölçüde koninin eğik uzunluğu tarafından belirlenmekte olup bu uzunluk genellikle en düşük çalışma frekansındaki dalga boyunun yaklaşık dörtte biri civarında seçilmektedir. Nail (1953) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda disk çapı, disk-koni aralığı ve koni açıklık açısı için optimum oranlar önerilmiş ve bu oranların geniş bant performansı sağladığı gösterilmiştir.

Diskon antenler, bikonik antenlere kıyasla daha kompakt bir yapı sunarken geniş bant özelliklerini büyük ölçüde koruyabilmektedir. Bununla birlikte yapının asimetrik geometrisi nedeniyle frekans yükseldikçe ışıma örüntüsünde değişimler meydana gelebilmekte ve ana ışıma yönü ideal yatay düzlemden sapabilmektedir. Buna rağmen geniş bant performansları nedeniyle diskon antenler; VHF/UHF haberleşme sistemleri, yayın sistemleri, spektrum

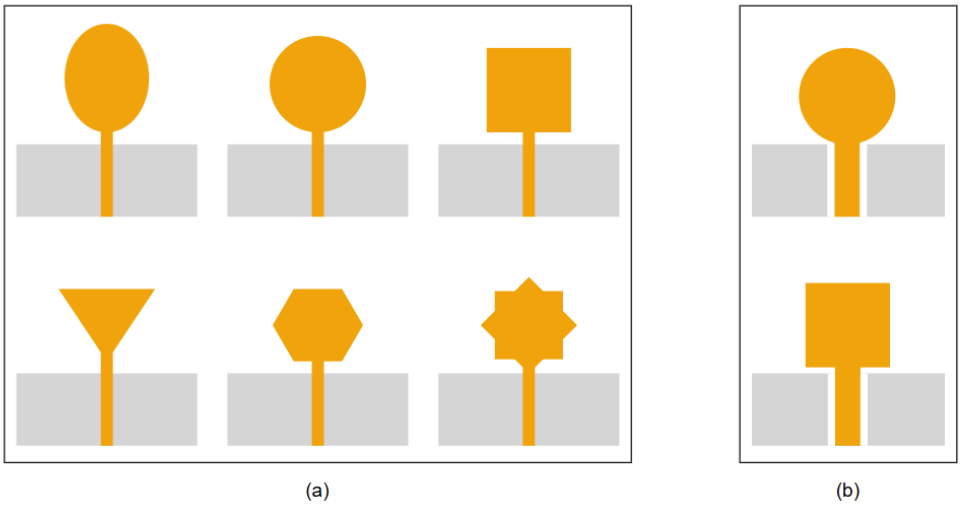
izleme uygulamaları, elektromanyetik uyumluluk ölçümleri ve geniş bant alıcı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.4 Düzlemsel antenler

Bikonik ve diskon antenler geniş bant performanslarıyla öne çıkmalarına rağmen, düşük frekanslarda fiziksel boyutlarının büyümesi ve üç boyutlu yapıları nedeniyle bazı uygulamalarda kullanım açısından sınırlamalar oluşturabilmektedir. Bu nedenle daha kompakt, hafif ve elektronik sistemlere kolay entegre edilebilen anten yapılarına ihtiyaç duyulmuştur. Düzlemsel antenler, kompakt yapıları, düşük maliyetleri ve baskı devre teknolojileri kullanılarak üretilebilmeleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak tercih edilen anten türlerinden biridir. Bu antenler genellikle mikroşerit veya eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme yapıları kullanılarak dielektrik bir altlık üzerine gerçekleştirilmektedir. Küçük boyutları ve elektronik sistemlere kolay entegre edilebilmeleri, özellikle taşınabilir cihazlar ve modern haberleşme sistemleri için önemli avantajlar sağlamaktadır. Düzlemsel antenler kendi içerisinde farklı geometrilere ve çalışma özelliklerine sahip alt türlere ayrılmaktadır. Bu kapsamda düzlemsel monopol antenler, yarıklı antenler, düzlemsel dipol antenler ve bant çentikli UGB antenler en yaygın kullanılan düzlemsel UGB anten yapıları arasında yer almaktadır. Bu anten türlerinin temel özellikleri ve çalışma prensipleri aşağıda açıklanmaktadır.

2.3.4.1 Düzlemsel monopol antenler

Düzlemsel monopol antenler, klasik monopol antenlerin baskı devre teknolojilerine uyarlanmış iki boyutlu bir türevi olarak geliştirilmiştir. Bu antenlerde sonsuz toprak düzlemi yerine baskı devre üzerinde oluşturulan sınırlı bir toprak düzlemi kullanılmakta ve radyatör elemanı dairesel, eliptik, üçgensel, kare veya farklı geometrilerde tasarlanabilmektedir (Li et al., 2014). Literatürde önerilen bazı düzlemsel monopol anten geometrileri Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şekil 2.4(a)'da mikroşerit beslemeli, Şekil 2.4(b)'de ise CPW beslemeli düzlemsel monopol anten örnekleri yer almaktadır.

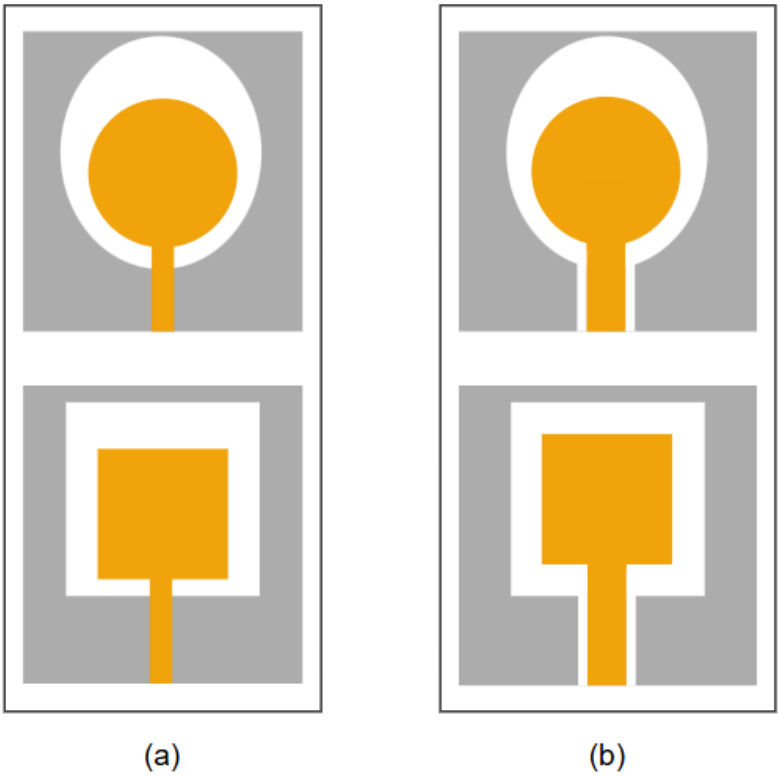


Şekil 2.4: Düzlemsel monopol anten geometrilerine örnekler; (a) mikroşerit beslemeli yapılar, (b) CPW beslemeli yapılar.

Genellikle mikroşerit veya eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme yapıları kullanılarak gerçekleştirilen bu antenler, kompakt yapıları ve elektronik sistemlere kolay entegre edilebilmeleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. eş yönlü ışıma özellikleri sayesinde kablosuz haberleşme sistemleri, WLAN, WiMAX, konumlandırma sistemleri, taşınabilir elektronik cihazlar ile askeri, endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.3.4.2 Yarıklı antenler

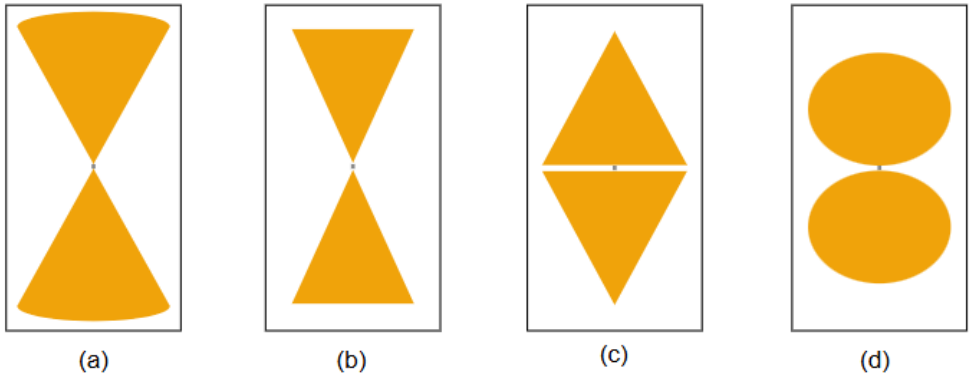
Yarıklı antenler, düzlemsel antenlerin bir alt türü olup anten performansının büyük ölçüde iletken yüzey üzerinde oluşturulan yarık geometrisi tarafından belirlendiği yapılardır. Bu antenlerde yarık; dikdörtgen, dairesel, eliptik veya farklı geometrilerde tasarlanabilmekte, yarığın boyutları ve şekli antenin çalışma bandını ve empedans karakteristiğini doğrudan etkilemektedir (Cicchetti et al., 2017). Besleme yapısı ise mikroşerit veya eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.5'te mikroşerit ve CPW beslemeli farklı yarıklı anten geometrilerine örnekler gösterilmektedir. Geniş bant performansı, düşük profil yapısı ve baskı devre teknolojileriyle uyumlu olmaları nedeniyle yarıklı antenler özellikle UGB haberleşme sistemleri, görüntüleme uygulamaları ve elektromanyetik uyumluluk çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.5: Düzlemsel yarıklı anten geometrilerine örnekler; (a) mikroşerit beslemeli yapılar, (b) CPW beslemeli yapılar.

2.3.4.3 Düzlemsel dipol antenler

Düzlemsel dipol antenler, geleneksel silindirik tel dipollerin baskı devre kartı (PCB) teknolojisine uyarlanmış, düşük profilli, hafif ve kolay üretilebilir karşılıklarıdır. Bu antenlerde iki iletken kol besleme noktasının iki tarafına simetrik olarak yerleştirilmekte olup, eleman geometrisinin değiştirilmesiyle antenin empedans ve ışıma özellikleri kontrol edilebilmektedir (Allen et al., 2007). Literatürde papyon (bow-tie), eliptik, yelpaze ve elmas (diamond) biçimli düzlemsel dipol yapıları önerilmiş olup, bu geometrilere ait örnekler Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Simetrik yapıları sayesinde daha dengeli bir akım dağılımı elde edilebilmekte ve bu durum ışıma karakteristiğine olumlu katkı sağlamaktadır. Ayrıca geniş bant performansı korunurken, üç boyutlu dipol yapılara kıyasla daha kompakt ve düşük profilli antenler gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, her iki kolun da ışıyıcı eleman olarak görev yapması nedeniyle aynı çalışma frekansı için düzlemsel monopol antenlere kıyasla daha büyük fiziksel boyutlara sahip olabilmektedir.



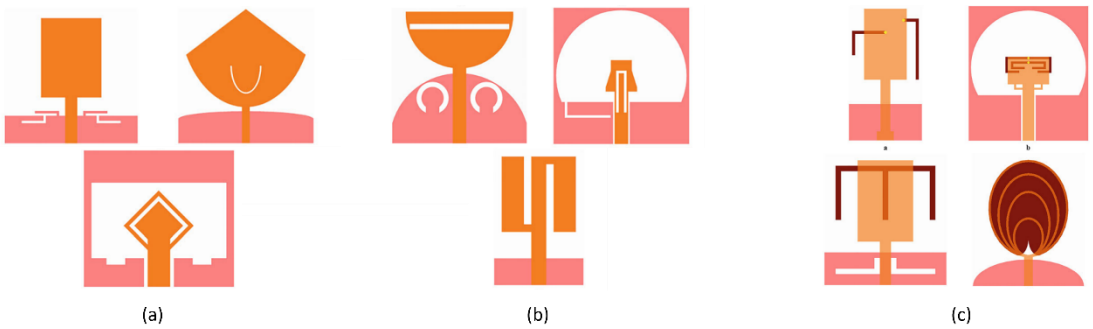
Şekil 2.6: Literatürde yaygın olarak kullanılan düzlemsel dipol anten geometrileri; (a) yelpaze dipol, (b) papyon (bow-tie) dipol, (c) elmas (diamond) dipol ve (d) eliptik dipol anten.

2.3.4.4 Bant çentikli antenler

Bant çentikli antenler, ultra geniş bant (UGB) sistemlerinin çalışma aralığı içerisinde yer alan ve girişime neden olabilen belirli frekans bantlarını bastırmak amacıyla geliştirilen özel anten yapılarıdır. UGB sistemleri 3.1–10.6 GHz frekans aralığında çalışırken, WiMAX, WLAN , C-bandı ve bazı uydu haberleşme servisleri ile aynı frekans bölgelerini paylaşabilmektedir. Bu nedenle söz konusu bantlardan kaynaklanan elektromanyetik girişimlerin azaltılması, UGB anten tasarımında önemli bir gereksinim hâline gelmiştir (Matin, 2021). Bu amaçla geliştirilen bant çentikli antenlerde, geniş çalışma bandı korunurken yalnızca hedeflenen frekans aralıklarında yüksek yansıma ve düşük kazanç değerleri oluşturulmaktadır.

Çentik karakteristiği; radyatör üzerine açılan yarıklar, toprak düzleminde gerçekleştirilen geometrik değişiklikler, besleme hattına eklenen parazitik elemanlar veya anten üzerine entegre edilen rezonatör ve filtre yapıları kullanılarak elde edilebilmektedir (Saha et al., 2019). Bu yapılar belirli frekanslarda rezonansa girerek anten üzerindeki akım dağılımını değiştirmekte ve ilgili frekansta empedans uyumsuzluğu oluşturmaktadır. Bunun sonucunda anten, hedeflenen frekans bandında etkin ışınım yapamazken diğer frekanslarda geniş bant çalışma özelliğini korumaktadır. Şekil 2.7'de literatürde önerilen bant çentikli anten yapılarına örnekler sunulmaktadır. Şekil 2.7(a)'da tek çentikli, Şekil 2.7(b)'de çift çentikli ve Şekil 2.7(c)'de çoklu çentikli anten geometrileri gösterilmektedir (Matin, 2021).

Literatürde U,L,T, C, E, V, dairesel ve çatal biçimli yarık geometrilerinin yanı sıra parazitik şeritler, ayrık halka rezonatörler (SRR) ve elektromanyetik bant aralıklı (EBG) yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır (Matin, 2021). Özellikle SRR ve EBG tabanlı rezonatörler, antenin temel geometrisini önemli ölçüde değiştirmeden belirli frekanslarda güçlü rezonanslar oluşturarak istenmeyen bantların bastırılmasına olanak sağlamaktadır. Çentik merkez frekansı, kullanılan yarık yapısının elektriksel uzunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle yarığın boyutu, şekli ve anten üzerindeki konumu değiştirilerek çentik frekansı istenilen değerlere ayarlanabilmektedir.



Şekil 2.7: Literatürde önerilen bant çentikli anten örnekleri; (a) tek çentikli yapılar, (b) çift çentikli yapılar ve (c) çoklu çentikli yapılar (Matin, 2021)

3. UGB ÇİFT BİKONİK ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Bu bölümde, yazar tarafından yayımlanan (Abdalqadir ve Sis, 2025) çalışmada sunulan çift bikonik anten yapısı ele alınmaktadır. Çalışmada, 750–1150 MHz frekans bandında çalışan, elektriksel olarak yalıtılmış iki bikonik anten elemanından oluşan bir anten sistemi tasarlanmış ve farklı besleme senaryoları için antenler arası izolasyon performansı araştırılmıştır. Tasarım sürecinde zaman bölgesi tam dalga elektromanyetik simülasyonlar kullanılmış, ardından her iki besleme yapısına ait anten prototipleri üretilerek ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak anten performansı değerlendirilmiştir. Bu bölümde öncelikle konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş, ardından anten tasarımı ile simülasyon ve ölçüm sonuçları sunulmuştur.

3.1 Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Geniş bantlı anten tasarımına yönelik çalışmalarda temel amaç; geniş frekans aralığında empedans uyumunun sağlanması, çok-yönlü ışıma karakteristiğinin korunması ve anten boyutlarının mümkün olduğunca küçültülmesidir. Bu amaç doğrultusunda literatürde farklı anten geometrileri ve yapısal iyileştirmeler önerilmiştir.

Konik ve konik-silindirik anten yapıları, geniş bant özellikleri nedeniyle literatürde sıklıkla incelenmektedir. Jeong et al. (2007) tarafından dairesel bir toprak düzlemi üzerinde çalışan konik-silindirik monopol anten yapısı ele alınmış ve silindirik bölümün eklenmesiyle geniş bant empedans uyumunun iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Çalışmada antenin yatay düzlemde dairesel ışıma karakteristiğini koruduğu, ancak düşey düzlemde maksimum ışımanın yaklaşık 60° yükselim açısında gerçekleştiği rapor edilmiştir. Benzer şekilde, konik geçiş bölgesi ile silindirik radyatörlerin birleştirildiği geniş bantlı bir dipol anten tasarımı sunulmuş ve önerilen yapının 1,8–28 GHz frekans aralığında geniş bantlı çalışma sağlayabildiği gösterilmiştir (Rahim and Xu, 2017).

Geniş bant performansının artırılması amacıyla kullanılan bir diğer yöntem, anten kollarının kılıf ve kafes tipi yardımcı yapılarla desteklenmesidir. SaiRam et al. (2018), farklı temel geometrilerin bir araya getirildiği kompakt geniş bantlı bir anten yapısı önermiş ve 500–3600 MHz frekans aralığında çok yönlü ışıma karakteristiği elde edildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, Sai Ram et al. (2019) kılıf ve kafes elemanlarının birlikte kullanıldığı

kompakt bir anten tasarımı gerçekleştirmiş ve UHF bandında geniş bant empedans uyumu sağlamıştır. Kumar et al. (2022) ise yer altı radarı uygulamaları için geliştirdikleri kafes dipol anten yapısında konik geçiş bölgesi kullanarak yaklaşık %105 bant genişliği elde etmiş ve yapının düşük grup gecikmesi değişimi sergilediğini göstermiştir.

Bikonik antenler üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda hem bant genişliğinin hem de ışıma performansının iyileştirilmesine odaklanılmıştır. Wang et al. (2025), koni açıklık açısının kademeli olarak değiştirildiği ağaç benzeri bir bikonik anten yapısı önermiştir. Çalışmada, yüksek frekanslarda ortaya çıkan kazanç dalgalanmalarının nedenleri incelenmiş ve önerilen yapı ile 0,6–5 GHz frekans aralığında daha kararlı bir çok yönlü ışıma karakteristiği elde edildiği gösterilmiştir. Bobreshov et al. (2020) ise bikonik antenin açıklık bölgesine yerleştirilen homojen olmayan dielektrik lens yardımıyla yüksek frekanslarda yan lob düzeylerinin azaltılabileceğini ve anten kazancının iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Bikonik antenlerin geliştirilmesine yönelik diğer çalışmalarda besleme yapısının ve anten geometrisinin etkileri incelenmiştir. Zhekov et al. (2017), konilere eklenen halka ve silindirik elemanlar yardımıyla geniş bant empedans uyumu ve kararlı çok-yönlü ışıma karakteristiği elde etmiş, ayrıca koaksiyel besleme kablosunun anten performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Benzer şekilde aynı araştırma grubu tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada Zhekov et al. (2016), iki adet içi boş yarı küresel radyatörden oluşan üç boyutlu bir dipol anten tasarlamış ve besleme kablosunun performansa etkisini inceleyerek yüksek verimli geniş bant çalışma elde etmiştir.

Literatürde birden fazla bikonik elemanın aynı yapı içerisinde kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Zhang and Chu (2022), üç farklı bikonik elemanın aynı eksen üzerinde istiflendiği bir anten yapısı önermiş ve 0,38–10,35 GHz frekans aralığında geniş bant çalışma ile artırılmış kazanç elde etmiştir. Bu çalışma, aynı eksen üzerinde yerleştirilen bikonik yapıların geniş bant özelliklerini korurken anten performansını iyileştirebildiğini göstermesi bakımından dikkat çekicidir.

Antenler arası izolasyon ise özellikle aynı platform üzerinde birden fazla antenin bulunduğu sistemlerde önemli bir tasarım kriteridir. Dikey doğrultuda yerleştirilen antenler arasındaki izolasyonun tahmini için literatürde yaygın olarak kullanılan denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$Iv[dB] = 28 + 40\, log_{10}(d|\lambda) \quad (3.1)$$

Burada (Iv) desibal cinsinden antenler arasındaki izolasyonu, (d) anten merkezleri arasındaki dikey mesafeyi ve (λ) çalışma frekansına karşılık gelen dalga boyunu ifade etmektedir. Zhou et al. (2014), bu bağıntının geçerlilik sınırlarını incelemiş ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için antenler arasındaki kenar-kenara mesafenin yaklaşık ($4\,\lambda$)'dan büyük olması gerektiğini göstermiştir. Daha küçük ayrım mesafelerinde ise yakın alan etkilerinin belirgin hâle gelmesi nedeniyle hesaplanan ve ölçülen izolasyon değerleri arasında farklılıklar oluşabilmektedir.

Bununla birlikte eş-yerleşimli anten sistemlerinde elde edilen izolasyonun yalnızca antenler arasındaki mesafeye bağlı olmadığı, anten yönelimi, polarizasyon, yerleşim geometrisi, çevredeki iletken yapılar ve kablo düzeni gibi faktörlerden de etkilendiği rapor edilmiştir (International Telecommunication Union [ITU], 2012; Okorogu et al., 2013). Bu nedenle, izolasyon performansının değerlendirilmesinde analitik yaklaşımların yanı sıra elektromanyetik simülasyonlar ve deneysel ölçümler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde geniş bantlı antenlerin performansını iyileştirmeye yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, aynı eksen üzerinde yerleştirilmiş ve bağımsız olarak beslenen çift bikonik antenlerde izolasyon performansına odaklanan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada çift bikonik anten yapısının tasarımı gerçekleştirilmiş ve antenler arası izolasyon performansı incelenmiştir.

3.2 Referans Tekil Bikonik Anten Modeli

Bu bölümde, önerilen çift bikonik anten yapısının temelini oluşturan referans tekil bikonik anten modeli sunulmaktadır. Geleneksel bikonik antenlerde radyatör elemanları boyunca sürekli konik geometri kullanılmaktadır. Ancak bu yapı, antenin maksimum çapının ve kapladığı hacmin artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden daha kompakt bir anten geometrisi elde edebilmek amacıyla radyatör elemanları belirli bir çap değerine ulaştıktan sonra silindirik yapı ile devam ettirilmiştir. Böylece antenin elektriksel uzunluğu korunurken fiziksel boyutlarının azaltılması hedeflenmiştir.

3.2.1 Anten geometrisi ve konfigürasyonu

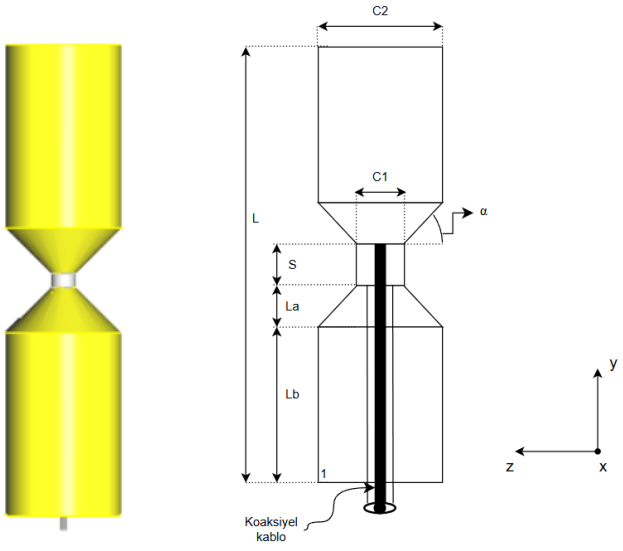
Anten tasarımında merkez frekans 1 GHz olarak seçilmiştir. Serbest uzay dalga boyu, denklem (3.2)'de verilen

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \tag{3.2}$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada (c) ışık hızını, (f_0) ise çalışma frekansını göstermektedir. 1 GHz frekansında serbest uzay dalga boyu yaklaşık 300 mm olarak hesaplandığından, antenin toplam fiziksel uzunluğu 300 mm olarak belirlenmiştir.

Referans anten geometrisinin oluşturulmasında konik yapıların maksimum ve minimum çapları parametrik olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar geri dönüş kaybı, bant genişliği ve genel anten performansı açısından değerlendirilmiştir. Yapılan parametrik analizler sonucunda, konik yapının maksimum çapını temsil eden C_2 parametresinin 74,4 mm olduğu durumda en uygun performansın elde edildiği belirlenmiştir.

Antenin gerçek çalışma koşullarına daha yakın şekilde modellenebilmesi amacıyla RG402 koaksiyel kablo simülasyon modeline dâhil edilmiş ve optimizasyon çalışmaları koaksiyel besleme yapısı ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Antenin tasarımı ve optimizasyonu zaman bölgesi tam dalga elektromanyetik simülasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Referans tekil bikonik antenin iki boyutlu ve üç boyutlu görünümleri Şekil 3.1'de verilmiş olup, optimize edilmiş anten parametreleri Tablo 3.1'de sunulmaktadır.



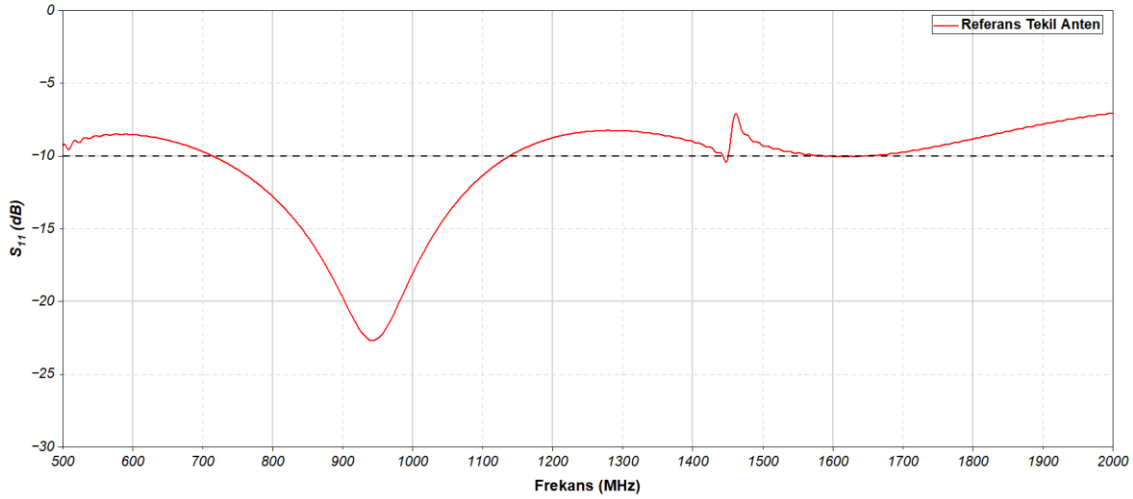
Şekil 3.1: Antenin iki boyutlu geometrisi ve üç boyutlu modeli sunulmaktadır

Tablo 3.1: Optimize edilmiş referans tekil bikonik anten parametreleri

Parametre	Değer	Birim
L	299.8	mm
La	28.48	mm
Lb	116.61	mm
S	9.62	mm
C1	16	mm
C2	74.4	mm
α	44.3	derece

3.2.2 Geri dönüş kaybı analizi

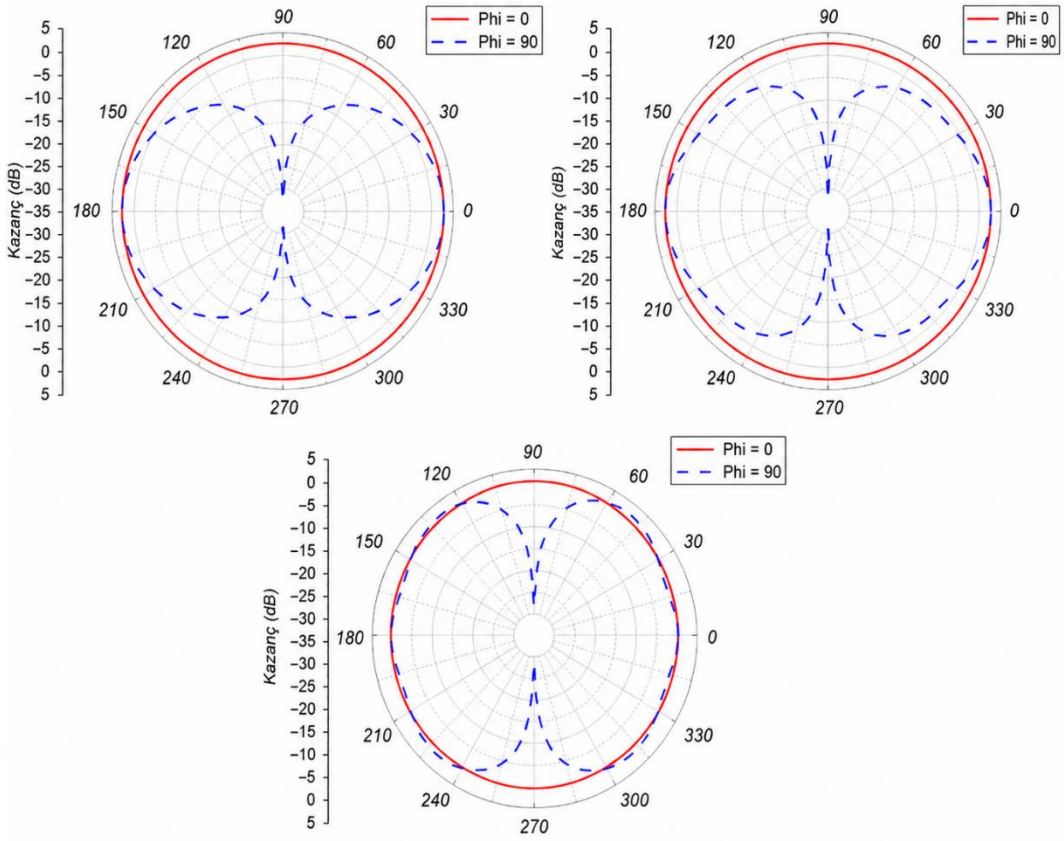
Referans tekil bikonik antene ait geri dönüş kaybı sonuçları Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, antenin 750 MHz ile 1150 MHz frekans aralığında (S_{11}) değerinin -10 dB seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca anten yaklaşık %42,1 kesirsel bant genişliği sağlamakta olup, elde edilen sonuçlar antenin UGB özellik gösterdiğini doğrulamaktadır.



Şekil 3.2: Referans tekil bikonik antene ait geri dönüş kaybı (S_{11}) sonuçları

3.2.3 Işıma örüntüsü analizi

Referans tekil bikonik antene ait 750 MHz, 1000 MHz ve 1150 MHz frekanslarındaki ışıma örüntüleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Anten yerleşimi, Şekil 3.1'de gösterilen koordinat sistemi esas alınarak modellenmiş ve her üç frekans için yatay ve dikey düzlemdeki ışıma karakteristikleri incelenmiştir.



Şekil 3.3: Referans tekil bikonik antenin farklı frekanslardaki ışıma örüntüleri: (a) 750 MHz, (b) 1000 MHz ve (c) 1150 MHz.

Şekil 3.3 incelendiğinde, antenin tüm çalışma frekanslarında eş yönlü ışıma karakteristiğini koruduğu görülmektedir. Ayrıca ana hüzmenin her üç frekansta da 0° doğrultusunda oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, antenin çalışma bandı boyunca kararlı bir ışıma performansı sergilediğini göstermektedir.

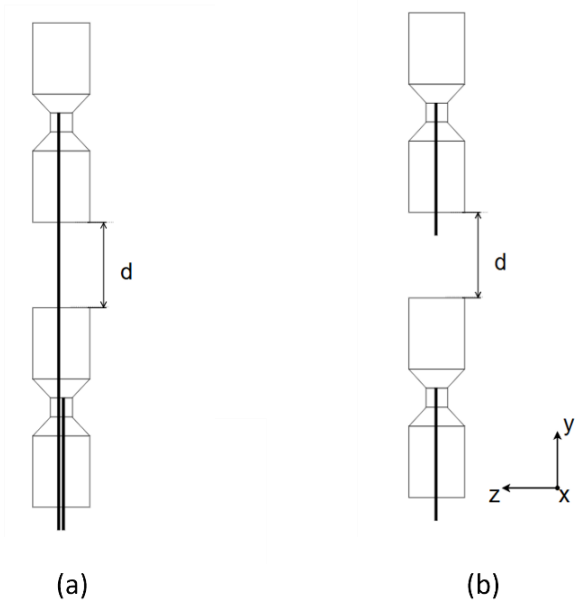
750 MHz frekansında maksimum gerçekleşen kazanç 2,92 dBi, yarı güç hüzme genişliği (HPBW) ise 61,7° olarak elde edilmiştir. 1000 MHz frekansında maksimum gerçekleşen kazanç 2,62 dBi ve yarı güç hüzme genişliği 57,9° olarak hesaplanmıştır. 1150 MHz frekansında ise maksimum gerçekleşen kazanç 1,51 dBi olurken yarı güç hüzme genişliği 136,4° olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, antenin çalışma bandı boyunca yaklaşık 1,5–3 dBi aralığında kazanç sağladığını ve eş yönlü ışıma özelliğini koruduğunu göstermektedir.

3.3 Dikey Konumlandırılmış Çift Bikonik Anten Tasarımı

Bir önceki bölümde tasarlanan referans tekil bikonik anten kullanılarak çift antenli yapı oluşturulmuştur. Bu yapıda iki adet aynı bikonik anten dikey doğrultuda konumlandırılmış

ve antenler arasındaki izolasyon performansı incelenmiştir. İzolasyon analizlerinde antenler arasındaki ayrım mesafesi (d), merkez frekansa karşılık gelen dalga boyu (λ_0) cinsinden ($0.25\lambda_0$, $0.5\lambda_0$, $1.0\lambda_0$, $1.5\lambda_0$, $2.0\lambda_0$) değerleri için değerlendirilmiştir. İncelenen ayrım mesafelerinin ($2\lambda_0$)'dan küçük olması nedeniyle, (3.1)'de verilen formül yalnızca referans bir üst sınır olarak dikkate alınmıştır.

Çalışmada iki farklı besleme yapısı karşılaştırılmıştır. Her iki tasarımda da antenler bağımsız portlar üzerinden beslenmiştir. İlk tasarımda, alt anten doğrudan beslenirken üst antene ait koaksiyel kablo alt antenin merkezinden geçirilerek üst antene ulaştırılmıştır. Böylece her iki antenin besleme noktaları yapının alt kısmında konumlandırılmıştır. İkinci tasarımda ise her iki anten kendi koaksiyel kablosu ile dışarıdan beslenmiş ve üst antene ait besleme kablosu alt antenin içerisinden geçirilmemiştir. Bu yapıda besleme kabloları antenlerin dış tarafından yönlendirilmiştir. Her iki besleme yapısına ait iki boyutlu modeller Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Her bir (d) değeri için elektromanyetik simülasyonlar gerçekleştirilmiş, ardından anten prototipleri üretilerek ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları sonraki bölümlerde sunulmaktadır.



Şekil 3.4: Çift bikonik anten için kullanılan besleme yapıları: (a) tasarım 1: içten koaksiyel geçişli besleme yapısı, (b) tasarım 2: dıştan koaksiyel besleme yapısı.

3.3.1 Anten üretimi ve malzeme seçimi

Önerilen çift bikonik anten modellerinin üretiminde radyatör elemanları için 0,2 mm kalınlığında pirinç plaka kullanılmıştır. Konik ve silindirik parçaların boyutlarının hassas

şekilde elde edilebilmesi amacıyla pirinç plakalar lazer kesim yöntemi ile işlenmiştir. Üretilen parçalar daha sonra birleştirilerek lehimlenmiş ve anten radyatörleri oluşturulmuştur.

Antenlerin beslenmesinde RG402 koaksiyel kablo kullanılmış olup, kablo uçlarına SMA erkek konnektörler monte edilmiştir. Antenlerin dikey doğrultuda sabit şekilde konumlandırılabilmesi amacıyla 20 mm genişliğinde ve 1,5 mm kalınlığında cam elyaf fiber çıtalar kullanılmıştır. Bu çıtalar aynı zamanda antenler arasındaki ayrım mesafesinin sabit tutulmasını sağlamıştır. Üretilen çift bikonik anten prototipine ait görüntü Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5: Üretilmiş çift bikonik anten prototipi (dikey konumlandırılmış)

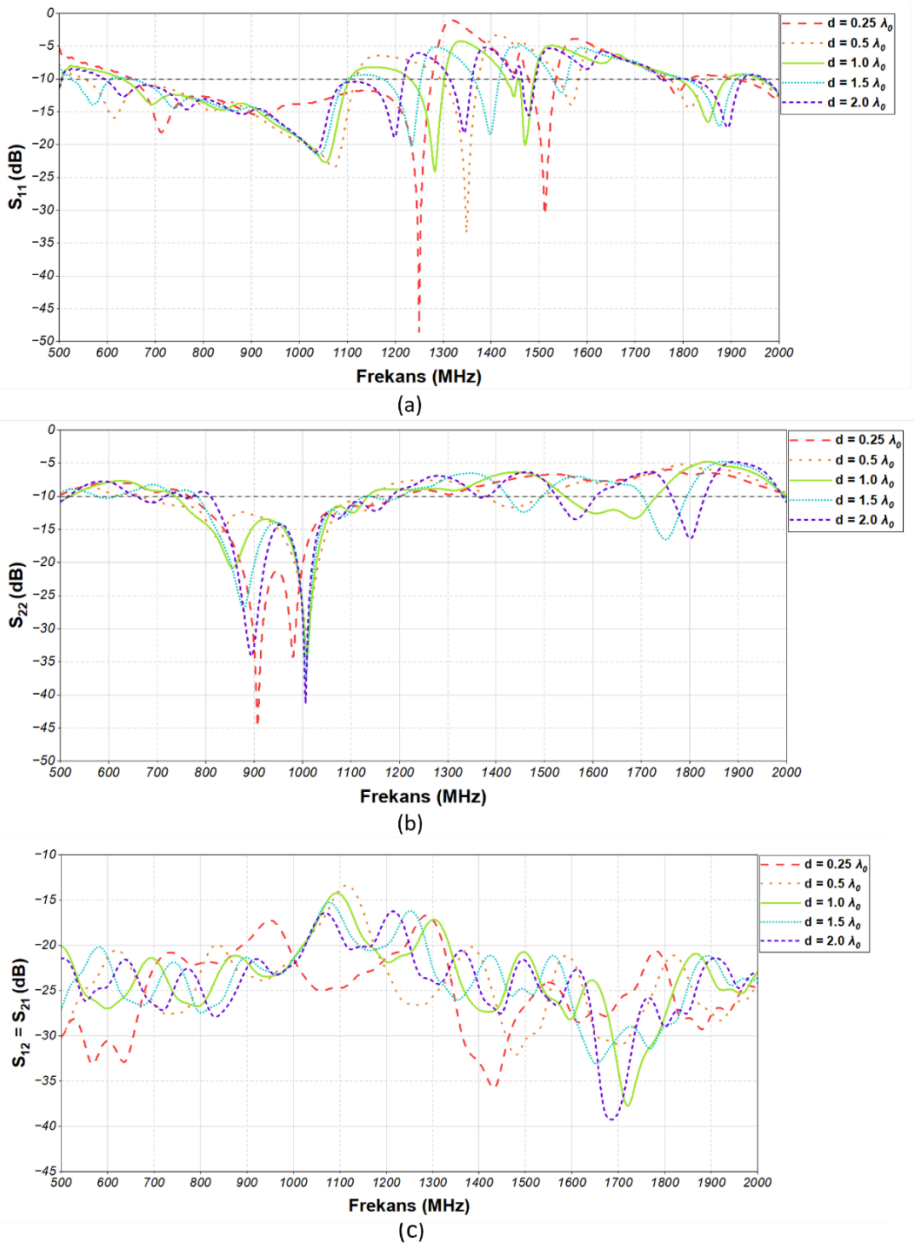
3.4 Tasarım 1: İçten Koaksiyel Geçişli Beslemeli Antenin Analizi

Çift bikonik anten yapısı elektromanyetik simülasyon ortamında modellendikten sonra, antenler arasındaki ayrım mesafesi (d) parametresi ($0.25\lambda_0$, $0.5\lambda_0$, $1.0\lambda_0$, $1.5\lambda_0$, $2.0\lambda_0$) değerleri için analiz edilmiştir. Her bir ayrım mesafesi için elde edilen (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$ sonuçları Şekil 3.6'da verilmiştir.

Şekil 3.6(a) ve Şekil 3.6(b) incelendiğinde, çalışma bandı olarak belirlenen 750–1150 MHz frekans aralığında (S_{11}) sonuçlarının (S_{22}) sonuçlarına kıyasla nispeten daha olumsuz olduğu görülmektedir. Bu durumun, ikinci antenin besleme kablosunun birinci antenin içerisinden

geçirilmesi sonucunda oluşan ortak mod akımları ve kablo kaynaklı kuplaj etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

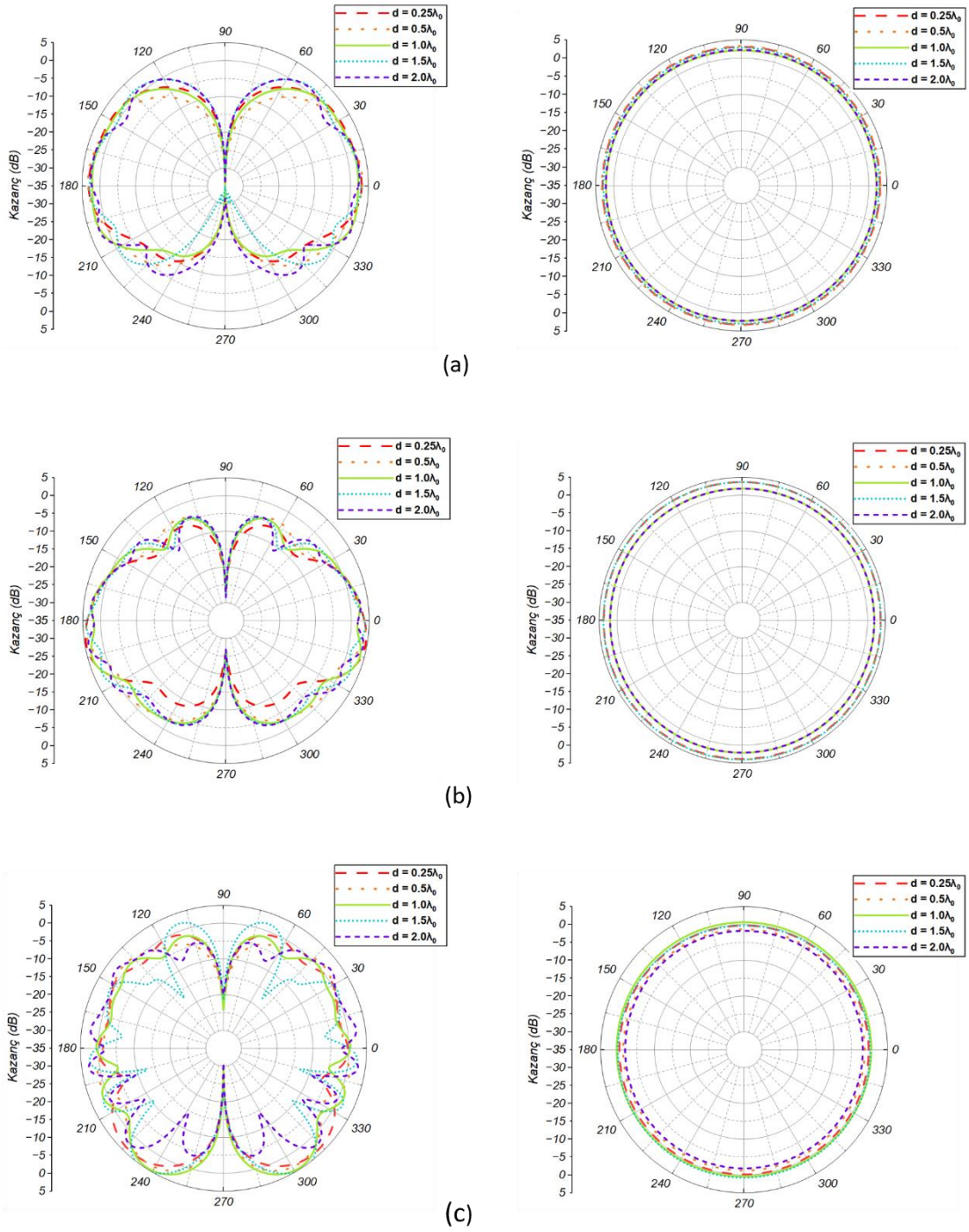
Şekil 3.6(c)'de verilen izolasyon sonuçları incelendiğinde, tüm ayrım mesafeleri için S_{12} değerinin genel olarak -15 dB'in altında kaldığı görülmektedir. Mesafe arttıkça genel eğilim olarak kuplaj seviyesinin azaldığı görülmekle birlikte, ışıyıcı ve besleme yapılarının karmaşık elektromanyetik etkileşimleri nedeniyle bazı frekans aralıklarında bu eğilimin tersine sonuçlar da gözlenmektedir.



Şekil 3.6: Tasarım 1 için geri dönüş kaybı ve izolasyon simülasyon sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$

3.4.1 Işıma örüntüsü analizi

Tasarım 1 için elde edilen iki boyutlu ışıma örüntüleri Şekil 3.7'de verilmiştir. Sonuçlar, 750 MHz, 1000 MHz ve 1150 MHz frekanslarında farklı (*d*) ayrım mesafeleri için elde edilmiş olup her frekansta (phi=90) ve (phi=0) düzlemlerindeki ışıma karakteristiklerini göstermektedir. Anten yerleşimi Şekil 3.4'de verilen koordinat sistemine göre değerlendirilmiştir. Şekil 3.7 incelendiğinde, farklı ayrım mesafeleri için elde edilen ışıma örüntülerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ayrım mesafesindeki değişimin antenin ışıma karakteristiği üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığı ve tüm frekanslarda eş yönlü yapının büyük ölçüde muhafaza edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca maksimum ışımanın genel olarak 0° doğrultusuna yakın açılarda gerçekleştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre maksimum gerçekleşen kazanç değerleri genel olarak yaklaşık 3 dBi seviyesindedir.



Şekil 3.7: Tasarım 1 için (phi=90) ve (phi=0) düzlemlerindeki ışıma örüntüleri: (a) 750 MHz, (b) 1000 MHz ve (c) 1150 MHz.

3.4.2 Ölçüm düzeneği ve ölçüm sonuçları

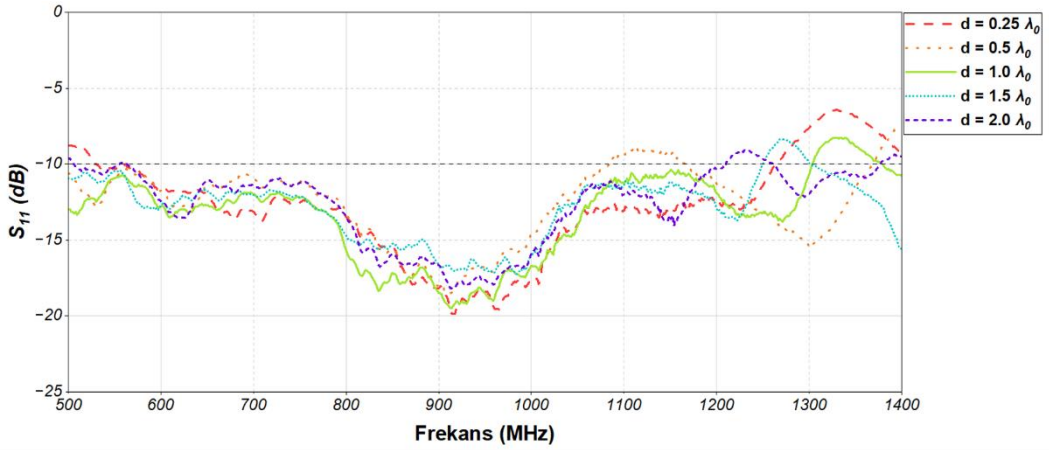
Tasarım 1 için üretilen anten prototipinde, üst antenin beslenebilmesi amacıyla alt antenin besleme noktasının yanında RG402 koaksiyel kablonun geçişine uygun bir açıklık oluşturulmuş ve koaksiyel kablo alt antenin içerisinden geçirilerek üst antene bağlanmıştır. Ölçümler sırasında anten yapısı yerden yaklaşık ($2.0\lambda_0$) yükseklikte ahşap bir direğe

sabitlenmiş ve çevresine yansımaların azaltılması amacıyla RF absorber malzemeler yerleştirilmiştir. Antenler arasındaki ayrım mesafesi (d) parametresi ($0.25\lambda_0$, $0.5\lambda_0$, $1.0\lambda_0$, $1.5\lambda_0$, $2.0\lambda_0$) değerleri için ayrı ayrı ölçülmüştür. Ölçümlerde 100 kHz–8 GHz frekans aralığında çalışan Rohde & Schwarz FSH8 vektör ağ analizörü kullanılmıştır. Ölçüm öncesinde, uzatma kablosunun ucunda SMA kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve ardından 500–1400 MHz frekans aralığında S-parametre ölçümleri alınmıştır. Ölçüm düzeneğine ait görüntü Şekil 3.8'de verilmiştir.

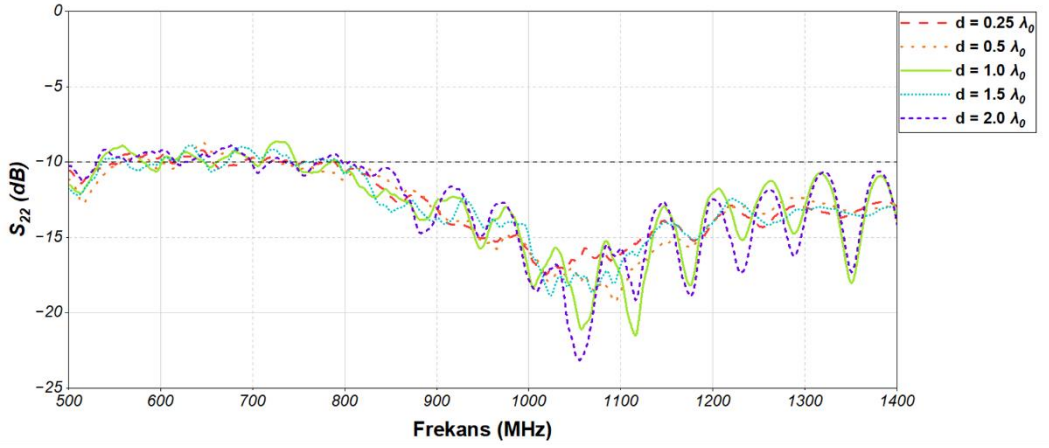


Şekil 3.8: Tasarım 1 için gerçekleştirilen ölçüm düzeneği

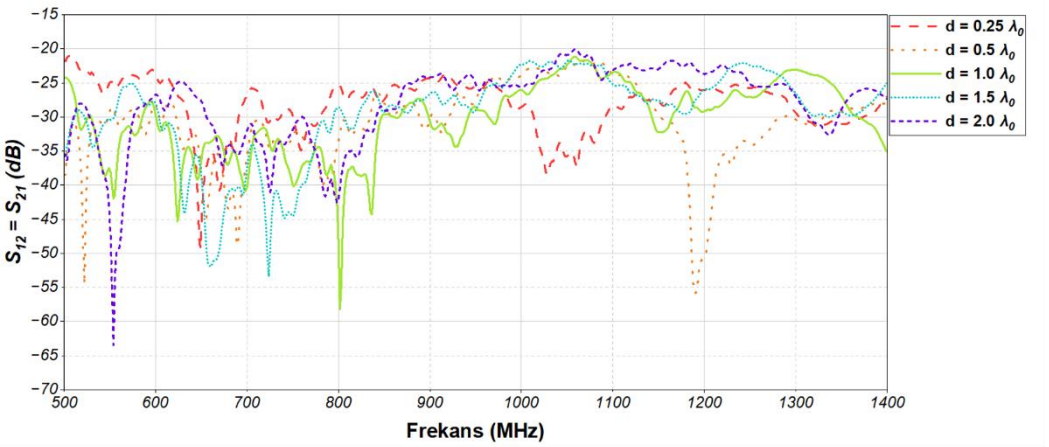
Elde edilen S_{11}, S_{22} ve $S_{12} = S_{21}$ sonuçları Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Şekil 3.9(a) ve Şekil 3.9(b) incelendiğinde, her iki anten için geri dönüş kaybının çalışma bandı boyunca genel olarak -10 dB seviyesinin altında olduğu görülmektedir. Şekil 3.9(c)'de verilen izolasyon sonuçları incelendiğinde ise antenler arasındaki kuplajın genel olarak -20 dB'in altında kaldığı görülmektedir. Ölçüm sonuçları, Tasarım 1'in hedeflenen frekans bandında yeterli empedans uyumu ve izolasyon performansı sağladığını göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.9: Tasarım 1'e ait ölçüm sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$

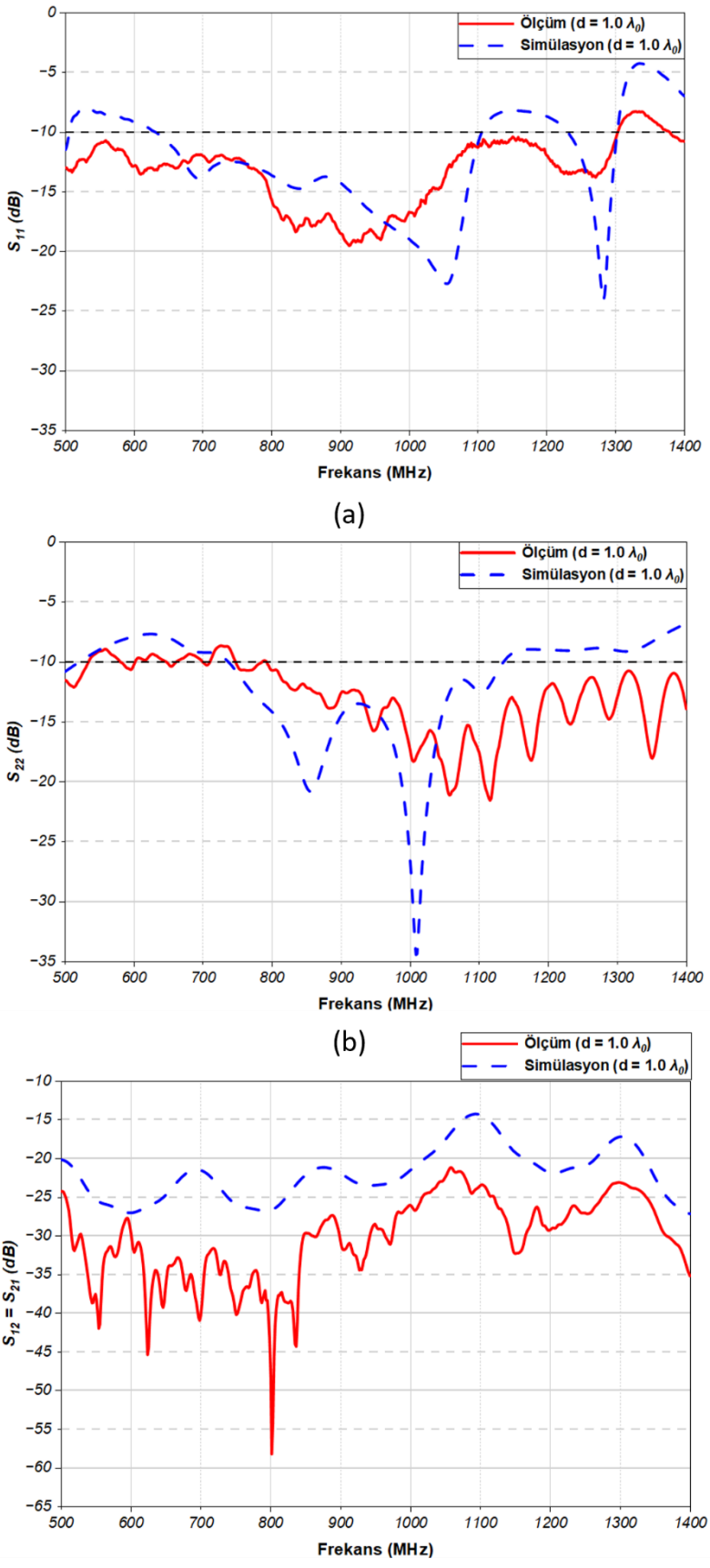
3.4.3 Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 3.6'da verilen simülasyon sonuçları ile Şekil 3.9'da verilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, farklı antenler arası ayrım mesafeleri için elde edilen S-parametre karakteristiklerinin genel eğilim açısından birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Hem

simülasyon hem de ölçüm sonuçlarında (S_{11}) ve (S_{22}) parametrelerinin çalışma bandı boyunca genel olarak -10 dB seviyesinin altında kaldığı gözlenmiştir. Ölçüm sonuçlarında görülen küçük frekans kaymaları ve genlik farklılıklarının üretim toleransları, koaksiyel kablo yerleşimi ve ölçüm ortamındaki etkilerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

İzolasyonu temsil eden (S_{12}) sonuçları incelendiğinde, antenler arası ayrım mesafesinin artırılmasıyla kuplaj seviyesinin genel olarak azaldığı görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında bazı frekans bölgelerinde $d = 2.0\lambda_0$ mesafesi en düşük kuplaj seviyelerini sağlarken, ölçüm sonuçlarında $d = 1.0\lambda_0$ mesafesinin çalışma bandı boyunca daha dengeli bir izolasyon performansı sunduğu görülmektedir. Ayrıca $d = 1.0\lambda_0$ durumunda geri dönüş kaybı karakteristikleri korunurken anten boyutları da makul seviyede tutulabilmiştir.

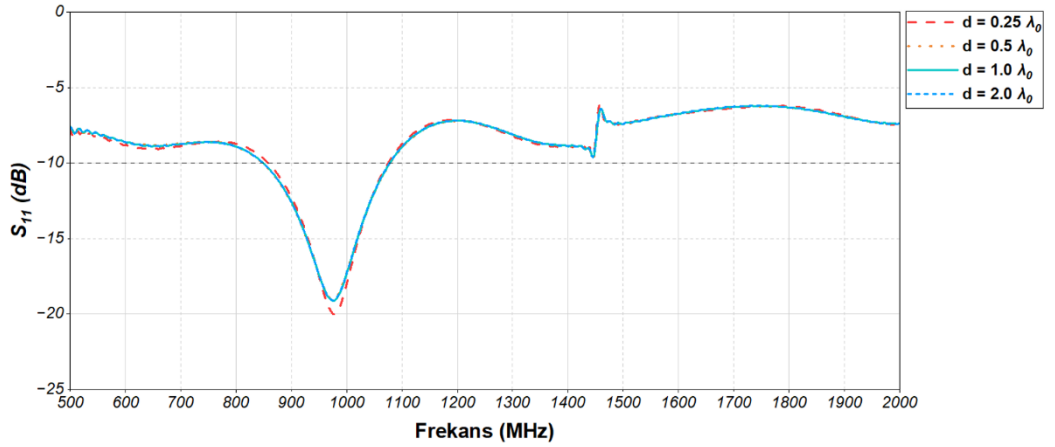
Bu nedenle empedans uyumu, izolasyon performansı, simülasyon-ölçüm uyumu ve fiziksel boyut kriterleri birlikte değerlendirildiğinde, Tasarım 1 için optimum antenler arası ayrım mesafesi $d = 1.0\lambda_0$ olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum ayrım mesafesi için elde edilen S_{11}, S_{22} ve $S_{12} = S_{21}$ simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



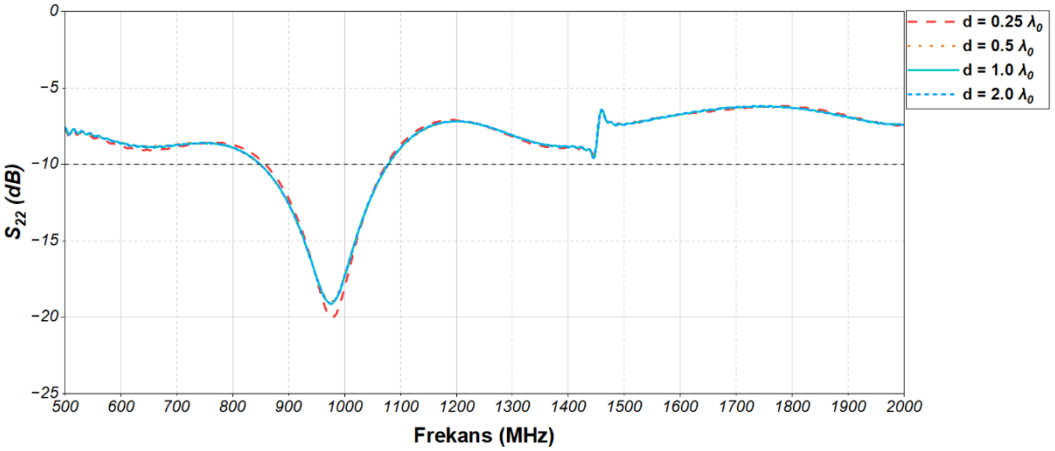
Şekil 3.10: Tasarım 1 için $d = 1.0\ \lambda_0$ ayrım mesafesinde simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$.

3.5 Tasarım 2: Dıştan Koaksiyel Beslemeli Antenin Analizi

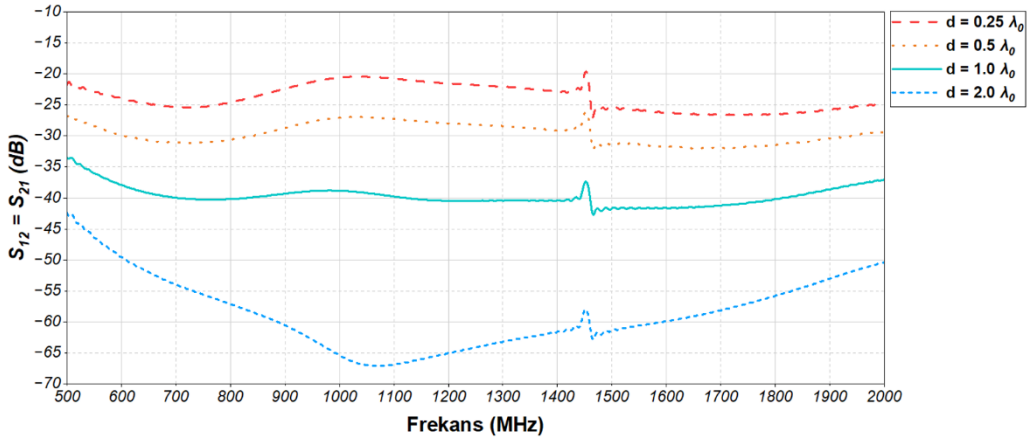
Tasarım 2'de antenler, Tasarım 1'den farklı olarak dışarıdan bağımsız koaksiyel kablolar ile beslenmiş ve ikinci antenin beslenmesi için herhangi bir koaksiyel kablo birinci antenin içerisinden geçirilmemiştir. Oluşturulan anten modeli elektromanyetik simülasyon ortamında analiz edilmiş ve antenler arasındaki ayrım mesafesi (d) parametresi için ($0.25\lambda_0$, $0.5\lambda_0$, $1.0\lambda_0$, $2.0\lambda_0$) değerleri incelenmiştir. Farklı ayrım mesafeleri için elde edilen S_{11}, S_{22} ve $S_{12} = S_{21}$ sonuçları Şekil 3.11'da verilmiştir. Şekil 3.11(a) ve Şekil 3.11(b) incelendiğinde, S_{11} ve S_{22} eğrilerinin birbirleriyle neredeyse çakıştığı görülmektedir. Bu durum, her iki antenin benzer empedans karakteristiğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışma bandı boyunca geri dönüş kaybı değerlerinin genel olarak -10 dB seviyesine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.11(c)'de verilen izolasyon sonuçları incelendiğinde ise antenler arasındaki ayrım mesafesinin artırılmasıyla izolasyon performansının belirgin şekilde iyileştiği görülmektedir. Özellikle $d = 2.0\lambda_0$ durumunda en düşük kuplaj seviyeleri elde edilmiş ve çalışma bandının büyük bölümünde izolasyon değeri -50 dB'in altında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte $d = 1.0\lambda_0$ durumunda da izolasyonun genel olarak -35 dB'in altında olduğu görülmektedir. Bu değer, birçok uygulama için yeterli bir izolasyon seviyesi sağlarken daha kompakt bir anten yapısına da imkan vermektedir.



(a)



(b)



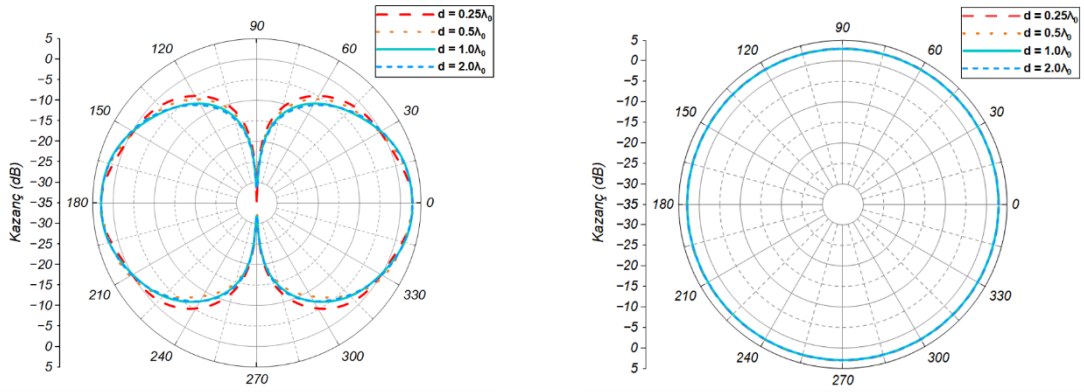
(c)

Şekil 3.11: Tasarım 2 için farklı ayrım mesafelerinde elde edilen simülasyon sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$.

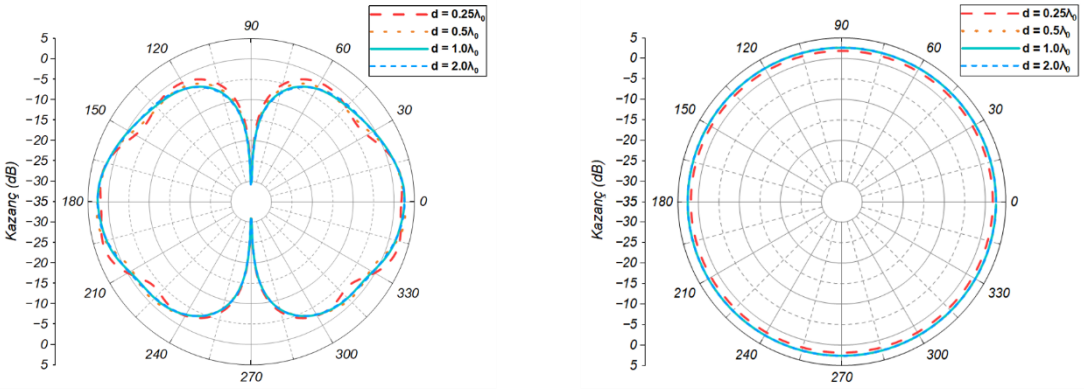
3.5.1 Işıma örüntüsü analizi

Tasarım 2 için elde edilen iki boyutlu ışıma örüntüleri Şekil 3.12'de verilmiştir. Sonuçlar, 750 MHz, 1000 MHz ve 1150 MHz frekanslarında, antenler arasındaki ayrım mesafesi (*d*) parametresinin ($0.25\lambda_0$, $0.5\lambda_0$, $1.0\lambda_0$, $2.0\lambda_0$) değerleri için elde edilmiştir. Her frekansta (phi=90) ve (phi=0) düzlemlerindeki ışıma karakteristikleri gösterilmiş olup anten yerleşimi Şekil 3.4'te verilen koordinat sistemine göre değerlendirilmiştir.

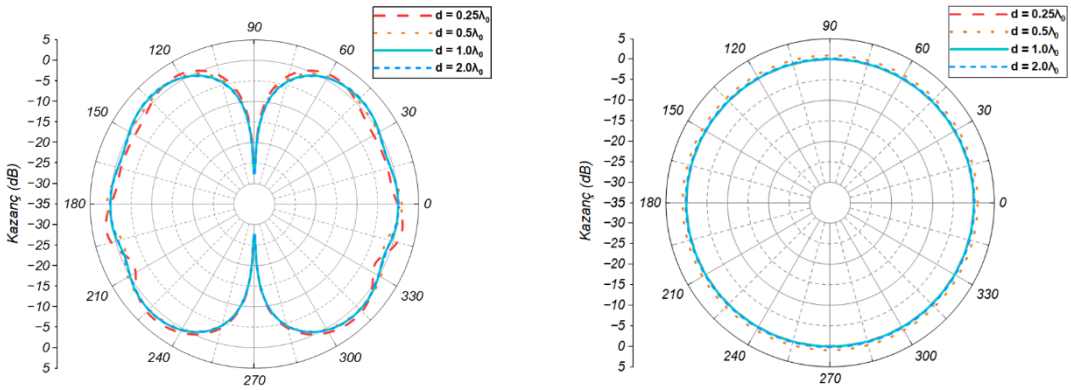
Şekil 3.12 incelendiğinde, farklı ayrım mesafeleri için elde edilen ışıma örüntülerinin büyük ölçüde çakıştığı görülmektedir. Bu sonuç, antenler arasındaki ayrım mesafesinin ışıma karakteristiği üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını ve Tasarım 1'de elde edilen bulguları desteklediğini göstermektedir. Ayrıca tüm frekanslarda (phi=90) düzleminde bikonik anten yapısından beklenen sekiz şekilli ışıma örüntüsünün elde edildiği, (phi=0) düzleminde ise eş yönlü ışıma karakteristiğinin korunduğu görünmektedir. Maksimum ışımanın genel olarak 0° doğrultusuna yakın açılarda gerçekleştiği ve tüm ayrım mesafelerinde benzer kazanç değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.12: Tasarım 2 için (phi=90) ve (phi=0) düzlemlerindeki ışıma örüntüleri: (a) 750 MHz, (b) 1000 MHz ve (c) 1150 MHz.

3.5.2 Ölçüm düzeneği ve ölçüm sonuçları

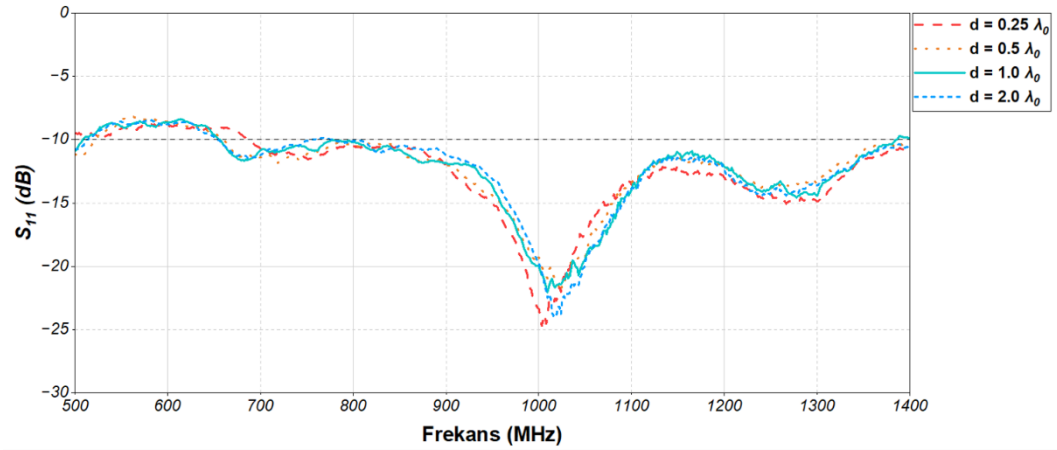
Üretilen anten prototipi, ölçümler sırasında yerden yaklaşık $2\lambda_0$ yükseklikte bulunan ahşap bir direğe sabitlenmiş ve çevresine yansımaların azaltılması amacıyla RF absorber malzemeler yerleştirilmiştir. Antenler arasındaki ayrım mesafesi (d) parametresi için ($0.25\lambda_0$, $0.5\lambda_0$, $1.0\lambda_0$, $2.0\lambda_0$) değerlerinde ayrı ayrı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde

Rohde & Schwarz FSH8 vektör ağ analizörü kullanılmıştır. Ölçüm öncesinde uzatma kablolarının uçlarında SMA kalibrasyonu yapılmış ve ardından S-parametre ölçümleri alınmıştır. Ölçüm düzeneğine ait görüntü Şekil 3.13'de verilmiştir.

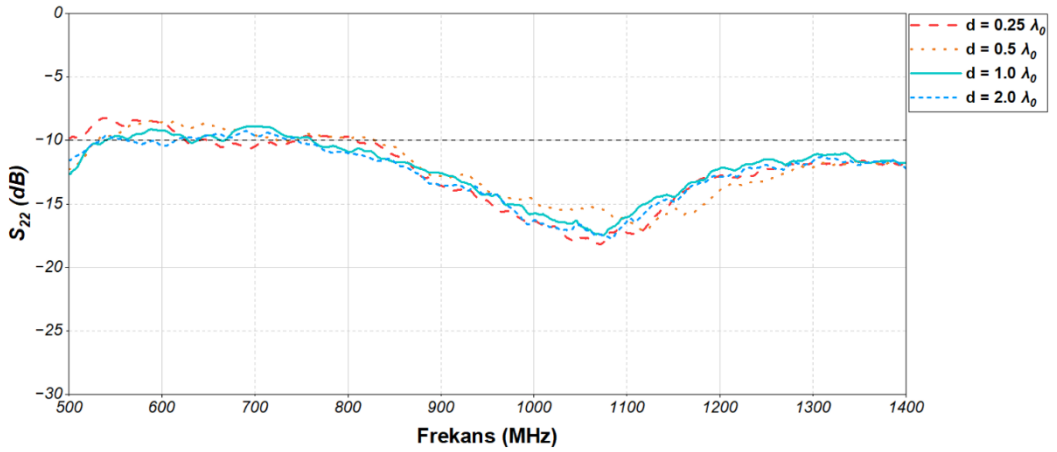


Şekil 3.13: Tasarım 2 için gerçekleştirilen ölçüm düzeneği

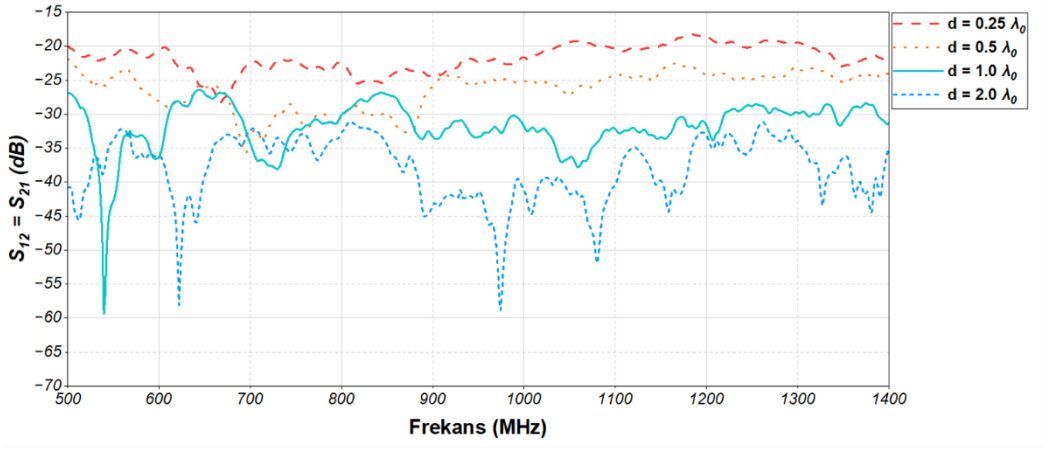
Şekil 3.14'te verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde, (S_{11}) ve (S_{22}) parametrelerinin çalışma bandı boyunca genel olarak -10 dB seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Ölçüm sonuçları, her iki antenin hedeflenen çalışma bandında yeterli empedans uyumu sağladığını göstermektedir. İzolasyonu temsil eden (S_{12}) sonuçları incelendiğinde ise simülasyonlarda elde edilen eğilimin ölçümlerle doğrulandığı görülmektedir. Antenler arasındaki ayrım mesafesinin artırılmasıyla izolasyon performansı iyileşmiş, özellikle $d = 1.0\lambda_0$ ve $d = 2.0\lambda_0$ durumlarında çalışma bandı boyunca yüksek izolasyon seviyeleri elde edilmiştir.



(a)



(b)



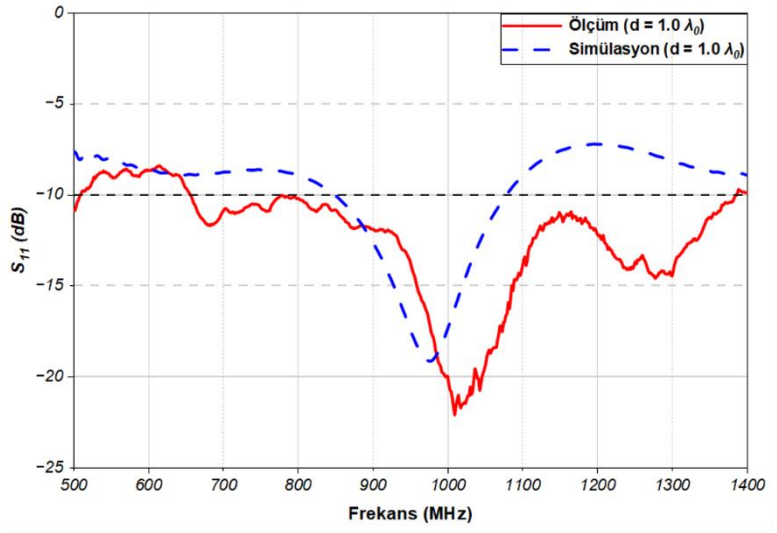
(c)

Şekil 3.14: Tasarım 2'e ait ölçüm sonuçları: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$

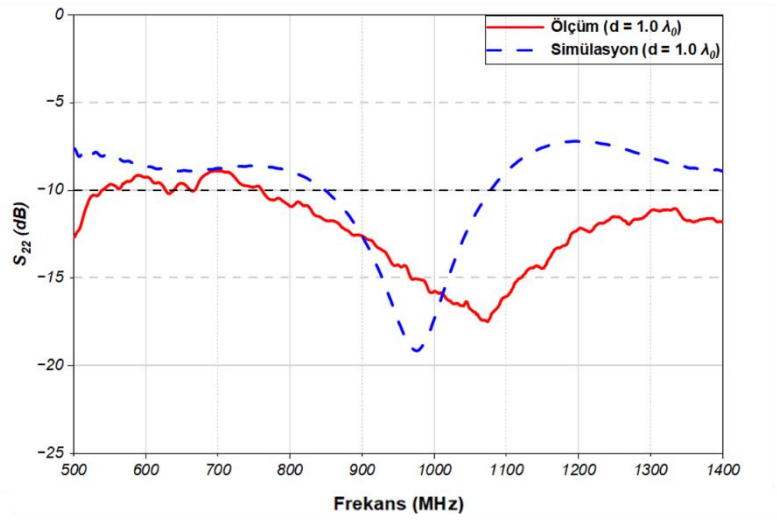
3.5.3 Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 3.11'da verilen simülasyon sonuçları ile Şekil 3.14'te verilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, (S_{11}) ve (S_{22}) parametrelerinde geri dönüş kaybı seviyeleri açısından bazı farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Bununla birlikte her iki durumda da antenler çalışma bandı boyunca kabul edilebilir empedans uyumu sağlamaktadır.

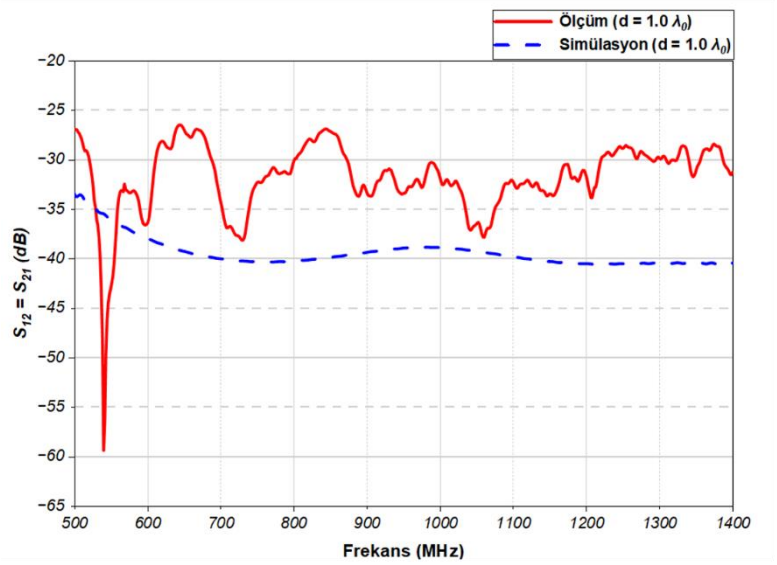
İzolasyonu temsil eden (S_{12}) sonuçları değerlendirildiğinde ise simülasyon ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Her iki durumda da antenler arasındaki ayrım mesafesinin artırılmasıyla izolasyon performansının iyileştiği gözlenmiştir. Özellikle $d = 1.0\lambda_0$ ve $d = 2.0\lambda_0$ durumlarında yüksek izolasyon seviyeleri elde edilmiş olup, $d = 2.0\lambda_0$ mesafesinde en düşük kuplaj değerleri görülmüştür. Bununla birlikte, $d = 1.0\lambda_0$ mesafesinde de çalışma bandı boyunca yaklaşık -30 dB ve altında izolasyon sağlanmış, simülasyon ve ölçüm sonuçları arasında iyi bir uyum elde edilmiş ve daha kompakt bir anten yapısı korunmuştur. Bu nedenle izolasyon performansı ve fiziksel boyut kriterleri birlikte değerlendirildiğinde, Tasarım 2 için $d = 1.0\lambda_0$ ayrım mesafesinin yeterli ve uygun bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır. Belirlenen $d = 1.0\lambda_0$ ayrım mesafesi için elde edilen S_{11}, S_{22} ve $S_{12} = S_{21}$ simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.15'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.15: Tasarım 2 için $d = 1.0\ \lambda_0$ ayrım mesafesinde simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması: (a) S_{11}, (b) S_{22} ve (c) $S_{12} = S_{21}$

3.6 Genel Performans Değerlendirmesi ve Sonuç

Bu bölümde öncelikle referans olarak kullanılan tekil bikonik anten tasarımı optimize edilmiş ve 750–1150 MHz frekans aralığında geri dönüş kaybı değerinin −10 dB'nin altında kalması sağlanmıştır. Optimizasyon sonrasında antenin empedans uyumu, ışıma örüntüsü ve kazanç karakteristikleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda antenler dikey doğrultuda konumlandırılarak çift antenli yapı oluşturulmuştur. Bu kapsamda iki farklı besleme yaklaşımı değerlendirilmiştir. İlk tasarımda ikinci anten, birinci antenin içerisinden geçirilen koaksiyel kablo ile beslenirken, ikinci tasarımda her iki anten dışarıdan bağımsız koaksiyel kablolar ile beslenmiştir.

Elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, ikinci tasarımın geri dönüş kaybı ve izolasyon performansı bakımından daha kararlı sonuçlar sunduğu görülmüştür. Özellikle S_{11} ve S_{22} parametrelerinin birbirine oldukça yakın değerler göstermesi, her iki anten elemanının benzer çalışma karakteristiğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Birinci tasarımda ise ikinci antenin beslenmesi için kullanılan koaksiyel kablonun anten yapısı içerisinde bulunması, anten akım dağılımını etkileyerek geri dönüş kaybı ve izolasyon performansında belirli seviyede bozulmalara neden olmuştur.

İzolasyon sonuçları incelendiğinde, her iki tasarımın da literatürde yeterli kabul edilen −20 dB izolasyon seviyesini sağladığı görülmektedir (Islam et al., 2023). Bununla birlikte, ikinci tasarımda antenler arasındaki ayrım mesafesi arttıkça izolasyon performansının daha düzenli şekilde iyileştiği ve özellikle $d = 1.0\lambda_0$ ile $d = 2.0\lambda_0$ değerlerinde yüksek izolasyon seviyelerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Birinci tasarımda da ayrım mesafesinin artırılmasıyla izolasyon performansı iyileşmiş, ancak elde edilen izolasyon seviyeleri ikinci tasarımın gerisinde kalmıştır.

Bununla birlikte, birinci tasarımın önemli bir mekanik avantajı bulunmaktadır. Her iki antenin besleme hatlarının yapının alt kısmından çıkarılabilmesi, özellikle nihai ürün, koruyucu radom ve montaj uygulamaları dikkate alındığında daha kompakt ve pratik bir çözüm sunmaktadır. İkinci tasarımda ise besleme hatlarının antenlerin dış kısmından yönlendirilmesi mekanik yerleşim açısından ek tasarım kısıtları oluşturabilmektedir. Bu nedenle elektromanyetik performans açısından ikinci tasarım daha avantajlı görünürken, mekanik entegrasyon ve üretilebilirlik açısından birinci tasarım da önemli avantajlar sunmaktadır.

4. DİSKON ANTEN TASARIM VE OPTİMİZASYONU

Bir önceki bölümde ele alınan çift bikonik anten tasarımına alternatif olarak, bu bölümde daha kompakt fiziksel boyut avantajı sunan diskon anten yapısı incelenmiştir. Diskon anten geometrisi, geniş bantlı çalışma karakteristiğini daha küçük hacimde sağlayabilme potansiyeli nedeniyle tercih edilmiştir. Bu kapsamda, ölçüm sonuçlarına göre 0.87–2.64 GHz ve 3.42–10 GHz frekans aralıklarında VSWR değeri 2.5'in altında kalan bir diskon anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde başlangıç noktası olarak referans bir diskon anten geometrisi oluşturulmuş, ardından anten performansını geliştirmek amacıyla farklı geometrik modifikasyonlar uygulanmıştır. Gerçekleştirilen parametrik çalışmalar ve optimizasyon işlemleri sonucunda nihai anten geometrisi elde edilmiştir. Anten tasarımı ve optimizasyonu zaman bölgesi tam dalga elektromanyetik simülasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nihai anten geometrisinin geri dönüş kaybı, VSWR, verim, kazanç ve ışıma örüntüsü karakteristikleri incelenmiş, ardından prototip üretimi ve ölçümleri yapılarak tasarım deneysel olarak doğrulanmıştır.

4.1 Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Diskon antenler, geniş bant çalışma karakteristikleri, eş yönlü ışıma özellikleri ve nispeten basit yapıları nedeniyle geniş bant haberleşme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Literatürde diskon antenlerin bant genişliği, empedans uyumu, fiziksel boyut küçültme ve ışıma performansını iyileştirmeye yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Klasik diskon anten yapısının geliştirilmesine yönelik çalışmalarda farklı hibrit ve çok katmanlı yaklaşımlar önerilmiştir. Januszkiewicz and Hausman (2004) tarafından spiral ve diskon yapılarının birleştirildiği hibrit bir geniş bant anten tasarımı önerilmiş; ölçüm sonuçlarında antenin 650–3000 MHz frekans aralığında VSWR değerinin 2'nin altında kaldığı ve anten boyutunun yaklaşık %23 oranında azaltıldığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, Kim and Park (2004) farklı boyutlardaki iki diskon yapının ters beslemeli olarak birleştirildiği çift diskon anten tasarımı önermiş ve antenin 282 MHz–8.93 GHz frekans aralığında VSWR değerinin 2.5'in altında kaldığını göstermiştir. Kim et al. (2005) ise asimetrik bikonikal anten ile ters yerleştirilmiş diskon yapısını birleştirerek bant genişliğini daha da artırmış, 180 MHz–18 GHz frekans aralığında geniş bant performans elde etmiştir. Shahid et al. (2016) tarafından önerilen ters çift diskon anten yapısında ise eğrisel metal levhalar kullanılarak 120 MHz–18 GHz frekans aralığında VSWR değerinin 2'nin altında kaldığı rapor edilmiştir.

Diskon anten performansını iyileştirmeye yönelik bir diğer yaklaşım, geometrik yapı optimizasyonlarıdır. Zhao and Wang (2014), kompakt yapı elde etmek amacıyla küçük ters konik yapı ve özel profillendirilmiş iskelet koni elemanları içeren bir iskelet diskon anten tasarımı önermiştir. Ölçüm sonuçlarında 400 MHz–16.4 GHz frekans aralığında kararlı performans elde edilmiştir. Fazeli and Smith (2019) tarafından üretim kolaylığı ve yeniden yapılandırılabilirlik amacıyla çokgen diskon anten önerilmiş, klasik disk ve konik yüzeyler düz panel yapılarla değiştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında 0.8–13.32 GHz frekans aralığında sürekli geniş bant performans elde edilmiştir. Asthan and Munir (2023) ise geleneksel katı konik yapı yerine kuadratik eğriliğe sahip tel elemanlardan oluşan iskelet koni yapısı kullanarak 0.68–4.96 GHz frekans aralığında %151.7 kesirli bant genişliği sağlamıştır.

Bazı çalışmalarda ise belirli performans kriterlerini iyileştirmeye yönelik özel yapısal modifikasyonlar gerçekleştirilmiştir. A. Chen et al. (2011), alçak profilli geniş bant VHF/UHF anten tasarımı amacıyla klasik diskon yapıyı düzleştirerek arka boşluk, kısa devre bağlantıları ve çift üst plaka yapıları eklemiştir. Li et al. (2024) ise yüksek frekanslardaki ışıma örüntüsü bozulmalarını azaltmak amacıyla ters koni, kısa devre probları ve manşon yapıları içeren modifiye diskon anten tasarımı önermiştir. Oh et al. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise dielektrik destek elemanlarının S-parametre ve kazanç üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

Yannopoulou et al. (2013), 2G ve 3G haberleşme bantlarını kapsayan radyal diskon anten tasarımı gerçekleştirmiştir. Kumar and Merugu (2024) ise çok frekanslı haberleşme ve izleme uygulamalarına yönelik iletim ve alım amaçlı iki ayrı UGB diskon anten geliştirmiştir. Literatürde yer alan bu çalışmalar incelendiğinde, diskon anten yapılarında bant genişliği artırımı, boyut küçültme, üretim kolaylığı ve ışıma performansının iyileştirilmesine yönelik çeşitli yaklaşımların benimsendiği görülmektedir. Bu çalışmada ise önceki tasarımlardan farklı olarak kompakt yapı avantajını koruyarak geniş bant performans sağlayan bir diskon anten tasarımı geliştirilmiş ve geometrik parametre değişimlerinin anten performansına etkileri analiz edilmiştir. Literatürde önerilen diskon anten tasarımlarına ilişkin temel performans karşılaştırmaları Tablo 4.1'de sunulmuştur**.**

Tablo 4.1: Literatürde önerilen diskon anten tasarımlarının karşılaştırılması.

Kaynak	Anten Tipi	Frekans Aralığı (MHz)	VSWR	Boyut (Çap × Yükseklik) [mm]
Januszkiewicz and Hausman (2004)	Hibrit spiral-diskon	650 - 3000	< 2	500 x 110
Kim and Park (2004)	Çift diskon	282 - 8930	< 2.5	345 x 255
Kim et al. (2005)	Daralan Tel Yapılı Çift Diskon	180 - 18000	< 2.5	370 x 400
Shahid et al. (2016)	Levha Yapılı Çift Diskon	120 - 18000	< 2	368 x 377
Zhao and Wang (2014)	İskelet Yapılı Çift Diskon	400 - 16400	< 2.5	160 x ---
Fazeli and Smith (2019)	Poligonal diskon	800 – 13320	< 2	108 x ---
Asthan and Munir (2023)	Kuadratik Tel Şekilli Diskon Anten	680 – 4960	< 2	112 x 97
A. Chen et al. (2011)	Alçak Profilli Diskon Anten	200 - 447	< 2.5	700 x 130
Li et al. (2024)	Modifiye Kompakt Diskon Anten	220 - 2500	< 2	310 x 132
Oh et al. (2016)	Dielektrik Destekli Diskon Anten	1500 - 5000	< 2	51.9 x 49.8
Yannopoulou et al. (2013)	Tel tipi diskon anten	800 - 3000	< 2	176 × 94
Kumar and Merugu (2024)	Radyal Boru Elemanlı Diskon Anten	55 – 570 / 30 - 540	< 3	960 x 1324

4.2 Diskon Anten Tasarımı

Literatürde yer alan diskon anten tasarımları incelendikten sonra, optimizasyon çalışmalarına temel oluşturacak referans bir diskon anten geometrisi oluşturulmuştur. Referans antenin başlangıç boyutları, Nail'in (1953) diskon anten tasarımına yönelik temel geometrik bağıntıları ortaya koyduğu çalışmaya dayandırılmıştır. İlk geometrik parametreler teorik tasarım bağıntıları kullanılarak hesaplanmış, ardından elde edilen model elektromanyetik simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Bu referans yapı, sonraki bölümlerde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının başlangıç noktası olarak kullanılmıştır.

4.2.1 Referans diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri

Diskon anten geometrisinin başlangıç boyutlarının belirlenmesinde Nail'in (1953) tarafından önerilen tasarım yaklaşımından yararlanılmıştır. Söz konusu çalışmada koninin eğik uzunluğu L, koninin minimum ve maksimum çapları C_{min} ve C_{max}, disk çapı D, disk-

koni aralığı S ve koni açıklık açısı ϕ_c ile ifade edilmiştir. Çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, disk çapı ile maksimum koni çapı ve disk-koni aralığı ile minimum koni çapı arasında belirli ilişkilerin bulunduğunu göstermiştir. Bu ilişkiler Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de verilmiştir (Nail, 1953).

$$S = 0.3C_{min} \tag{4.1}$$

$$D = 0.7C_{max} \tag{4.2}$$

Nail'in (1953) çalışmasında kullanılan parametreler ile bu çalışmada kullanılan parametrelerin karşılıkları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Nail'in (1953) tarafından kullanılan parametreler ile bu çalışmada kullanılan parametrelerin karşılaştırılması

Nail (1953)	Bu çalışma	Açıklama
L	L_c	Koninin eğik uzunluğu
C_{min}	D_{c1}	Koninin üst çapı
C_{max}	D_{c2}	Koninin alt çapı
D	$2L_d$	Disk çapı
S	S	Disk-koni aralığı
ϕ_c	ϕ_c	Toplam koni açıklık açısı

Referans anten geometrisinin oluşturulmasında tasarım frekansı 1 GHz olarak seçilmiştir. Bu frekansta serbest uzay dalga boyu 300 mm olup çeyrek dalga boyu değeri 75 mm'ye karşılık gelmektedir. Nail'in yaklaşımında koninin eğik uzunluğunun en düşük çalışma frekansındaki yaklaşık çeyrek dalga boyu ile ilişkili olduğu belirtilmektedir (Nail, 1953). Bu nedenle ilk tasarımda koninin eğik uzunluğu (L_c = 75mm) olarak seçilmiştir.

Koni açıklık açısının anten performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen ön parametrik çalışmalar sonucunda (ϕ_c = 57°) değerinin daha uygun empedans uyumu sağladığı görülmüştür. Bu nedenle referans diskon anten geometrisinin oluşturulmasında toplam koni açıklık açısı 57° olarak belirlenmiştir. Ayrıca üretim kolaylığı ve mekanik dayanım göz önünde bulundurularak koninin üst çapı (D_{c1} = 10mm) olarak seçilmiştir. Bu değerler kullanılarak diğer geometrik parametreler aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$L_c = 75\text{mm}$$

$$D_{c1} = 10\text{mm}$$

$$S = 0.3D_{c1} = 3\text{mm} \tag{4.3}$$

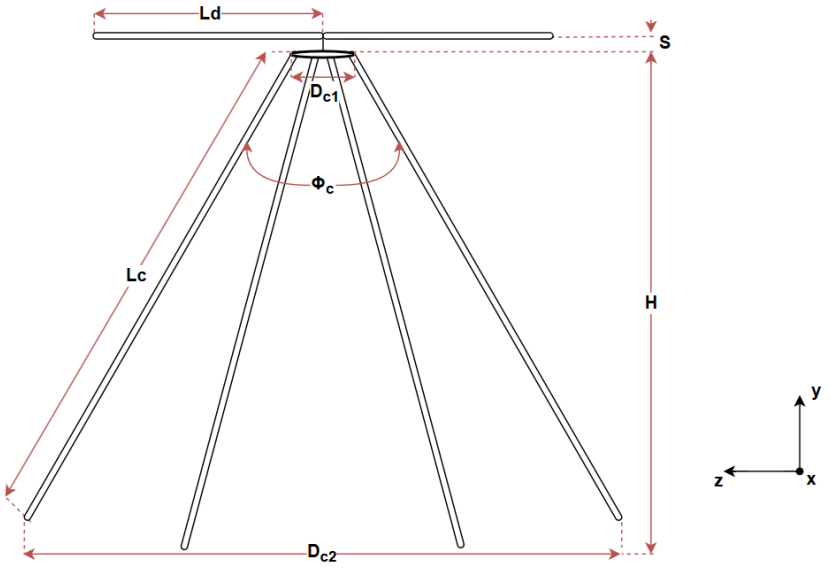
$$D_{c2} = D_{c1} + 2L\,sin\frac{\phi_c}{2} = 81.6\text{mm} \tag{4.4}$$

$$L_d = \frac{0.7 \times 81.6}{2} = 28.5\text{mm} \tag{4.5}$$

$$H = 75 \times cos\frac{\phi_c}{2} = 65.9\text{mm} \tag{4.6}$$

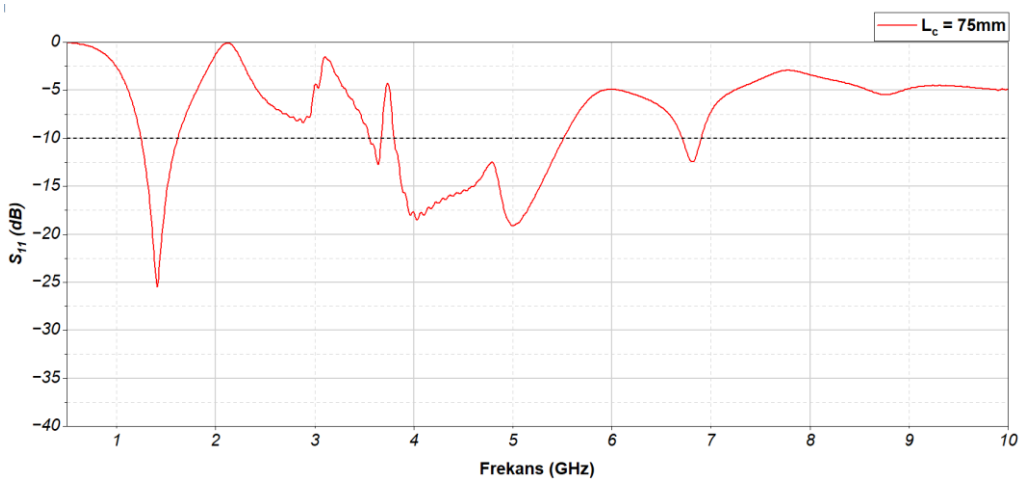
olarak elde edilmiştir.

Hesaplanan parametreler kullanılarak oluşturulan referans diskon anten geometrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Referans diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri

Referans geometriye ait elektromanyetik analizler gerçekleştirilmeden önce anten, 20 mm uzunluğunda RG402 koaksiyel kablo ile beslenmiştir. Koaksiyel besleme yapısı da modele dahil edilerek gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.



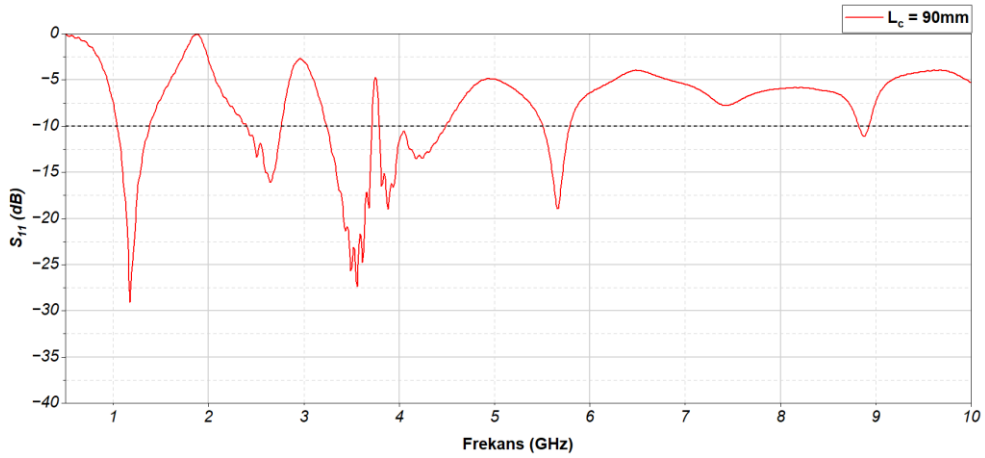
Şekil 4.2: L_c = 75mm için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları

Şekil 4.2 incelendiğinde, antenin ilk rezonans frekansının hedeflenen 1 GHz frekansının üzerinde oluştuğu görülmektedir. Antenin alt frekans performansını iyileştirmek ve çalışma bandını daha düşük frekanslara kaydırmak amacıyla koninin eğik uzunluğu artırılmıştır. Bu kapsamda L_c değeri 90 mm olarak yeniden belirlenmiş ve geometrik parametreler tekrar hesaplanmıştır. Elde edilen yeni parametre değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: L_c =90mm için hesaplanan referans anten parametreleri

Parametre	Değer
L_c	90mm
D_{c1}	10mm
D_{c2}	95.9mm
L_d	33.55mm
S	3mm
$\boldsymbol{\phi_c}$	57°
H	79.1mm

Güncellenen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde, ilk rezonans frekansının yaklaşık 1 GHz'e kaydığı ve S_{11} değerinin bu frekanstan itibaren -10 dB seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle (L_c = 90mm) değeri referans diskon anten geometrisi için uygun kabul edilmiş ve sonraki optimizasyon çalışmalarında başlangıç tasarımı olarak kullanılmıştır.

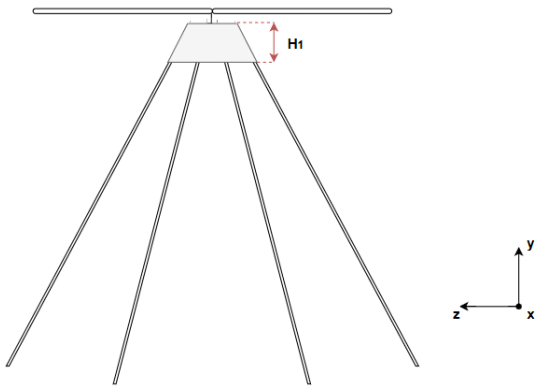


Şekil 4.3: L_c = 90mm için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları

4.2.2 İkinci versiyon diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri

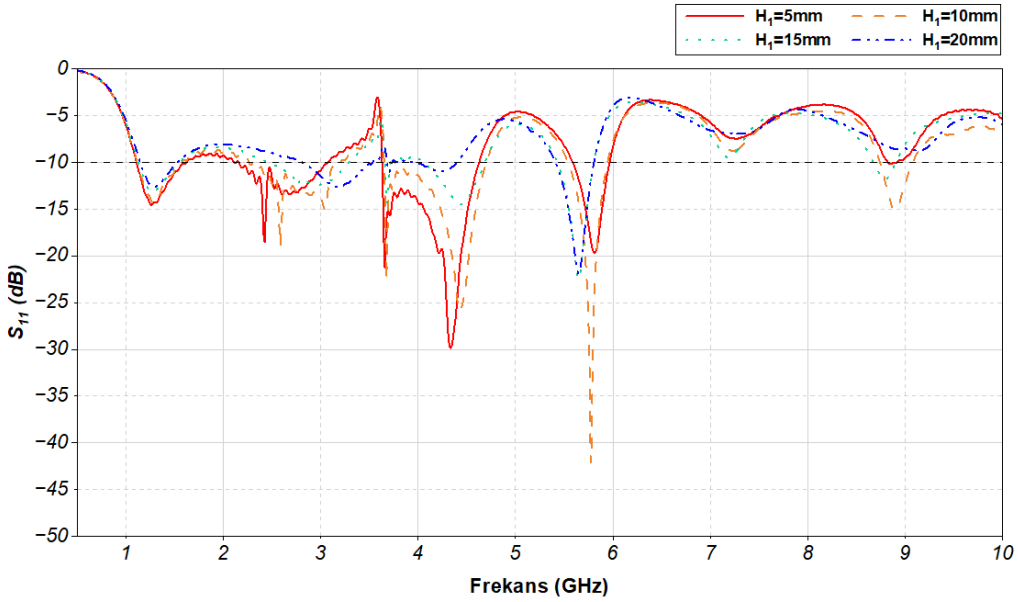
Bir önceki bölümde oluşturulan referans diskon anten geometrisinin bant genişliğini artırmak ve empedans uyumunu iyileştirmek amacıyla anten yapısı üzerinde yeni geometrik düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, literatürde yer alan benzer diskon anten çalışmalarında kullanılan geometrik yaklaşımlardan yararlanılarak referans anten geometrisine ilave bir metalik yüzey eklenmiştir.

Eklenen yapı, koninin üst kısmında yer almakta olup koninin minimum çapından başlayarak belirli bir H_1 mesafesi boyunca aşağı doğru uzatılmıştır. Bu geometrik modifikasyonun amacı yalnızca bant genişliğini artırmak değil, aynı zamanda konik kısmı oluşturan tel elemanlar arasındaki mekanik dayanımı artırmak ve bu değişikliğin antenin geri dönüş kaybı karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Modifiye edilen ikinci versiyon diskon anten geometrisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: İkinci versiyon diskon anten geometrisi ve H_1 parametresi

Eklenen metalik yapının anten performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla H_1 parametresi için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda H_1 değeri sırasıyla 5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm olarak değiştirilmiş ve her bir durum için geri dönüş kaybı karakteristikleri analiz edilmiştir. Tüm elektromanyetik simülasyonlar 0.5–10 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Farklı H_1 değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları

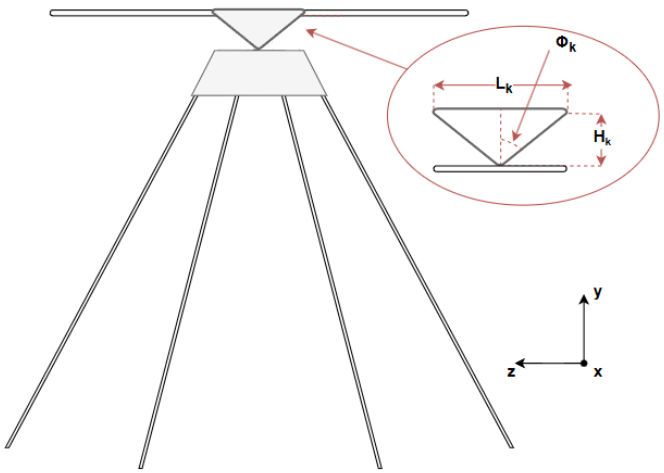
Şekil 4.5 incelendiğinde, H_1 parametresinin antenin empedans uyumu üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle 1–6 GHz frekans aralığında H_1 değerinin değiştirilmesiyle geri dönüş kaybı karakteristiklerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Farklı H_1 değerleri karşılaştırıldığında, H_1 = 5mm durumunun çalışma bandı boyunca daha dengeli bir empedans uyumu sağladığı ve özellikle düşük frekans bölgesinde daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle sonraki optimizasyon çalışmalarında H_1 değeri 5 mm olarak seçilmiştir.

4.2.3 Üçüncü versiyon diskon anten geometrisi ve tasarım parametreleri

Bir önceki bölümde geliştirilen ikinci versiyon diskon anten geometrisinin performansını daha da iyileştirmek amacıyla anten yapısına ilave bir ters konik eleman eklenmiştir. Literatürde yer alan bazı diskon anten çalışmalarında, ters konik yapıların özellikle yüksek frekans bölgesindeki empedans uyumunu iyileştirdiği ve çalışma bant genişliğini artırdığı gösterilmiştir (Kim and Park, 2004; Kim et al., 2005; Shahid et al., 2016; Zhao and Wang,

2014). Bu nedenle, literatürde başarılı sonuçlar veren benzer bir yaklaşım bu çalışmada da uygulanarak ikinci versiyon anten geometrisine ters konik bir yapı eklenmiştir.

Üçüncü versiyon anten geometrisinde ters konik eleman, antenin besleme bölgesinde disk ile ana koni arasına yerleştirilmiştir. İlk tasarım aşamasında ters koni açıklık açısı ϕ_c =43° ve ters koni yüksekliği H_k =10mm olarak seçilmiştir. Oluşturulan üçüncü versiyon anten geometrisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

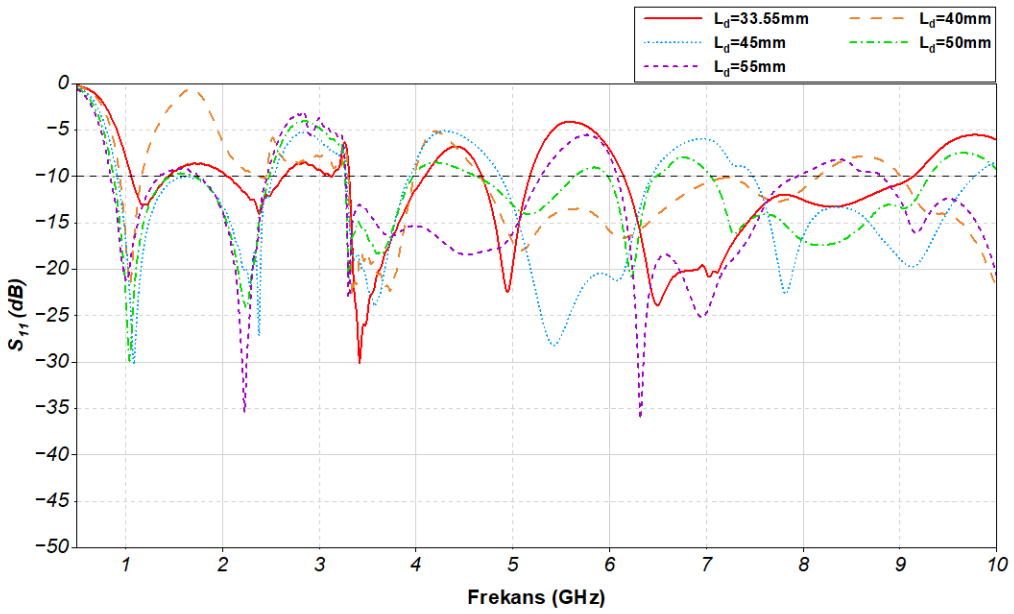


Şekil 4.6: Üçüncü versiyon diskon anten geometrisi

Ters konik elemanın eklenmesiyle birlikte anten geometrisindeki bazı parametrelerin yeniden düzenlenmesi gerekmiştir. Bu çalışmada ters koninin maksimum çapı, ana koninin minimum çapına eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece ters koni ile ana koni arasında geometrik süreklilik sağlanmıştır. Ancak ters koni yüksekliğinin H_k =10mm olarak seçilmesi sonucunda ana koninin minimum çapı D_{c1} ve buna bağlı olarak maksimum çapı D_{c2} değişmiştir. Bu durum disk çapının da yeniden optimize edilmesini gerekli kılmıştır.

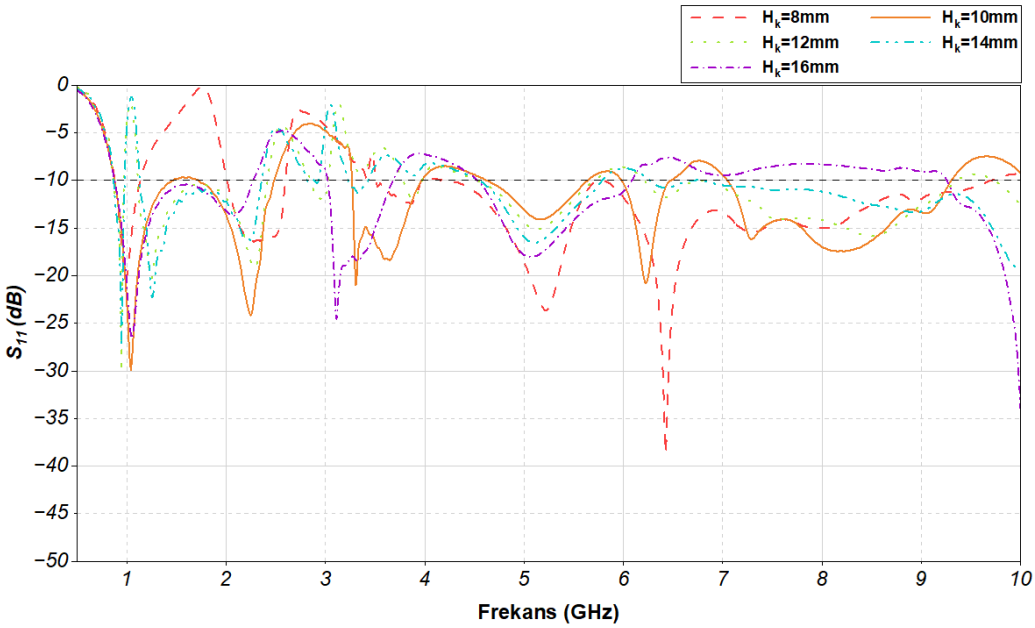
Referans anten tasarımında (L_d = 33.55mm) olarak belirlenen disk yarıçapının, ters konik elemanın eklenmesiyle birlikte yeterli olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni, ters konik yapının disk altında ek bir hacim oluşturması ve mevcut disk boyutlarının yeni geometri için optimum empedans uyumu sağlayamamasıdır. Bu nedenle disk yarıçapı L_d parametresi için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda L_d parametresi sırasıyla 33.55 mm, 40 mm, 45 mm, 50 mm ve 55 mm olarak değiştirilmiş, her bir durum için geri dönüş kaybı karakteristikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: Farklı L_d değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları

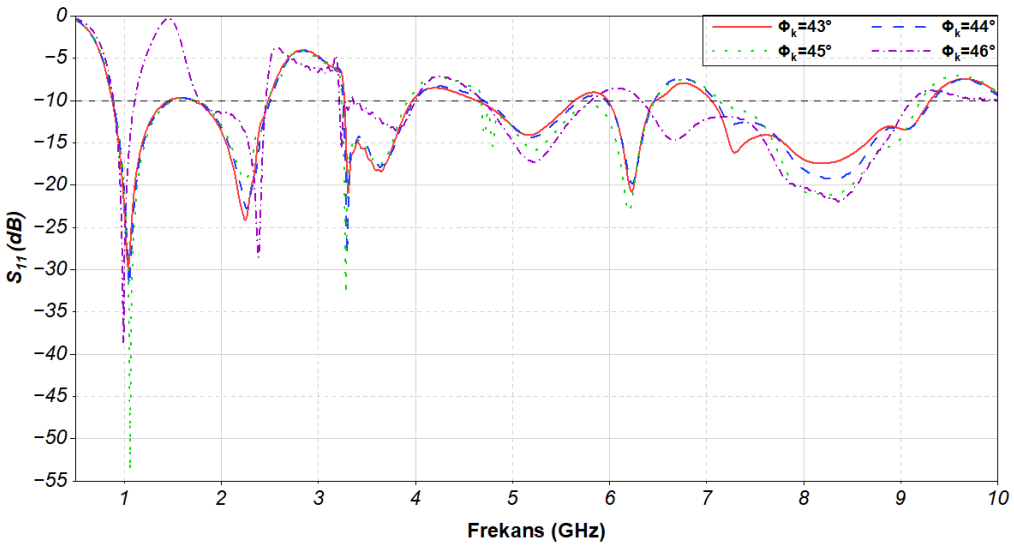
Şekil 4.7 incelendiğinde, disk yarıçapının antenin empedans uyumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle düşük ve orta frekans bölgelerinde rezonans frekanslarının konumu ve geri dönüş kaybı seviyeleri L_d parametresinin değişimiyle belirgin şekilde farklılaşmaktadır. Parametrik çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, (L_d = 50mm) değerinin çalışma bandı boyunca daha dengeli bir empedans uyumu sağladığı ve geri dönüş kaybı karakteristiklerinin genel olarak iyileştiği görülmüştür. Bu nedenle üçüncü versiyon diskon anten tasarımında disk yarıçapı (L_d = 50mm) olarak seçilmiş ve sonraki optimizasyon çalışmalarında bu değer kullanılmıştır. Disk yarıçapı L_d parametresinin belirlenmesinin ardından ters konik yapının yüksekliğinin anten performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla H_k parametresi için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda H_k değeri sırasıyla 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm ve 16 mm olarak değiştirilmiş, her bir durum için geri dönüş kaybı karakteristikleri analiz edilmiştir. Elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8: Farklı H_k değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları

Şekil 4.8'de sunulan sonuçlar, ters koni yüksekliğinin antenin frekans cevabı üzerinde etkili bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir. H_k değerindeki değişimle birlikte rezonans noktalarının yerlerinde ve geri dönüş kaybı seviyelerinde farklılıklar oluştuğu gözlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, H_k = 10mm değerinin çalışma bandı içerisinde daha uygun sonuçlar verdiği belirlenmiş ve sonraki tasarım çalışmalarında bu değer tercih edilmiştir.

H_k parametresinin belirlenmesinin ardından, üçüncü versiyon anten geometrisinde gerçekleştirilen son optimizasyon çalışması kapsamında ters konik yapının açıklık açısının anten performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ters koni açıklık açısı ϕ_k sırasıyla 43°, 44°, 45° ve 46° olarak değiştirilmiş ve her bir durum için geri dönüş kaybı karakteristikleri elde edilmiştir. Parametrik çalışma sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir.

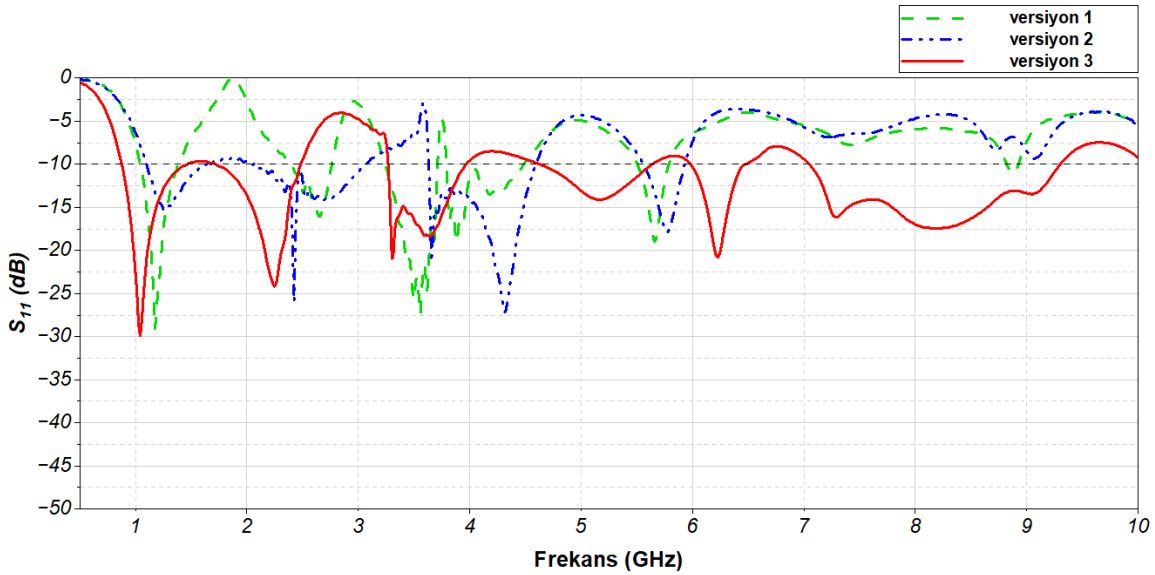


Şekil 4.9: Farklı ϕ_k değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı sonuçları

Şekil 4.9'da verilen sonuçlar incelendiğinde, ters koni açıklık açısının antenin geri dönüş kaybı karakteristikleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Farklı açıklık açıları arasında $\phi_k = 43°$ değerinin çalışma bandı boyunca en uygun performansı sağladığı belirlenmiştir. Bu nedenle üçüncü versiyon diskon anten tasarımında ters koni açıklık açısı $\phi_k = 43°$ olarak seçilmiş ve sonraki çalışmalarda bu değer kullanılmıştır.

4.3 Diskon Anten Tasarımlarının Karşılaştırılması ve Nihai Tasarımın Seçilmesi

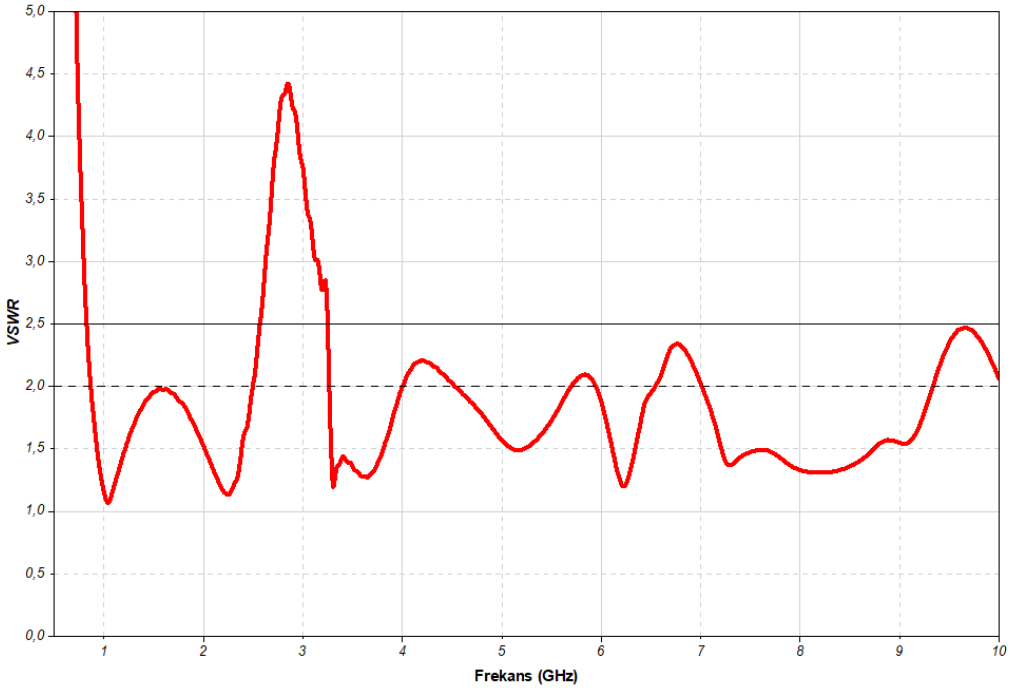
Şekil 4.10'da referans diskon anten (Versiyon 1), ikinci versiyon diskon anten (Versiyon 2) ve üçüncü versiyon diskon anten (Versiyon 3) tasarımlarına ait geri dönüş kaybı sonuçları birlikte verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, geometrik modifikasyonlar sonucunda anten performansının kademeli olarak iyileştiği görülmektedir. Özellikle üçüncü versiyon anten tasarımı, düşük frekans bölgesindeki empedans uyumunu korurken yüksek frekans bölgesinde daha geniş bir çalışma bandı sağlamıştır. Bu nedenle üçüncü versiyon anten geometrisi nihai tasarım olarak seçilmiştir.



Şekil 4.10: Üç farklı diskon anten tasarımına ait S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması

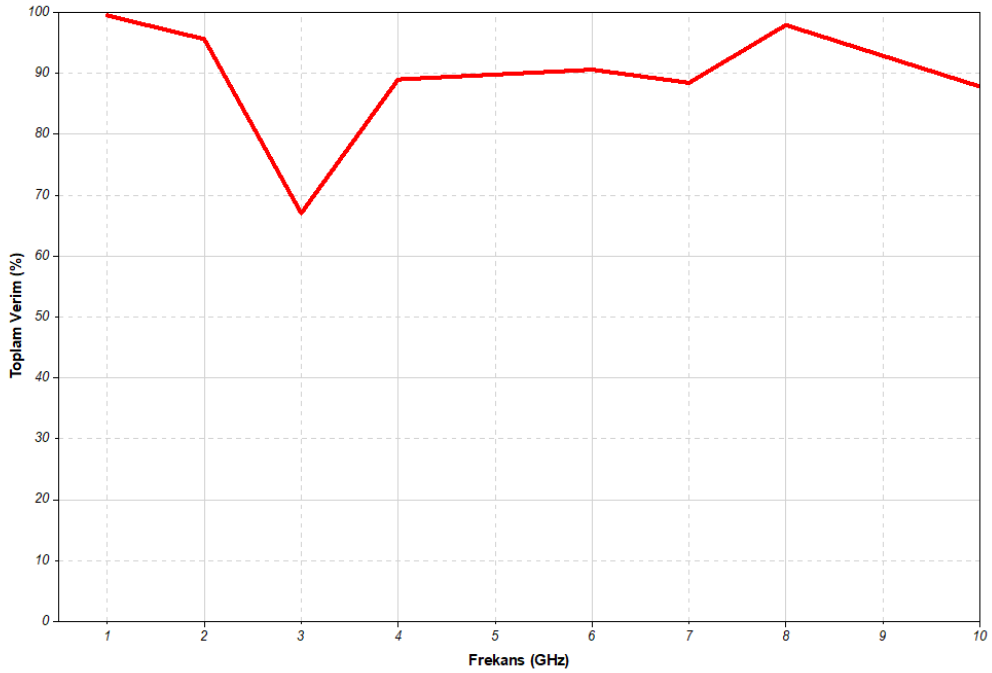
4.4 Nihai Diskon Anten Performans Analizi

Bir önceki bölümlerde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen üçüncü versiyon diskon anten tasarımı nihai anten geometrisi olarak seçilmiştir. Nihai tasarıma ait VSWR sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11: Nihai diskon anten tasarımına ait VSWR sonuçları

Şekil 4.11 incelendiğinde, VSWR değerinin 0.82–2.57 GHz ve 3.25–10 GHz frekans aralıklarında 2.5'in altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca frekans bandının önemli bir bölümünde VSWR değerinin 2 seviyesine yakın veya daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, gerçekleştirilen geometrik optimizasyonların antenin empedans uyumu üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu ve nihai anten geometrisinin geniş bir frekans aralığında kabul edilebilir bir VSWR performansı sergilediğini göstermektedir. Nihai diskon anten tasarımına ait toplam verim sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.



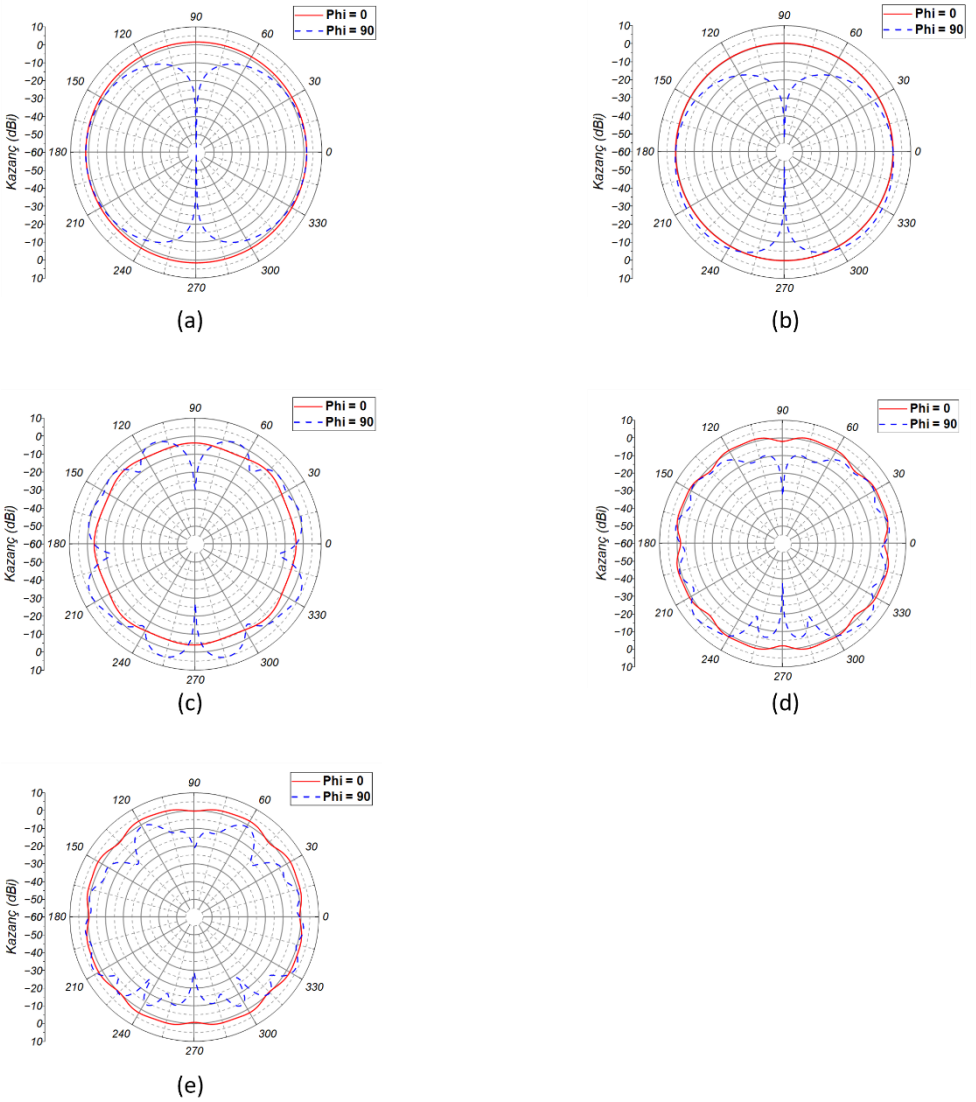
Şekil 4.12: Nihai diskon anten tasarımına ait toplam verim sonuçları

Şekil 4.12 incelendiğinde, antenin 1–2 GHz frekans aralığında yaklaşık %95'in üzerinde toplam verim sağladığı görülmektedir. Frekansın 3 GHz civarına ulaşmasıyla birlikte toplam verimde belirgin bir düşüş meydana gelmekte ve verim yaklaşık %67 seviyesine kadar gerilemektedir. Bu durumun aynı frekans bölgesinde gözlenen empedans uyumsuzluğu ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

3 GHz sonrasında ise toplam verimin yeniden yükseldiği ve 4–10 GHz frekans aralığında genel olarak %88'in üzerinde kaldığı görülmektedir. Özellikle 6–10 GHz frekans bölgesinde toplam verim yaklaşık %89–97 aralığında değişmekte olup antenin yüksek verimle

çalıştığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen diskon anten tasarımının geniş frekans aralığında yüksek verimlilik sağladığını ortaya koymaktadır.

Nihai diskon anten tasarımına ait iki boyutlu ışıma örüntüleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Işıma örüntüleri, Şekil 4.1'de verilen koordinat sistemine göre phi=0 ve phi=90 düzlemleri için elde edilmiştir. Şekil 4.13(a), (b), (c), (d) ve (e) sırasıyla 1 GHz, 2 GHz, 6 GHz, 8 GHz ve 10 GHz frekanslarındaki ışıma örüntülerini göstermektedir.

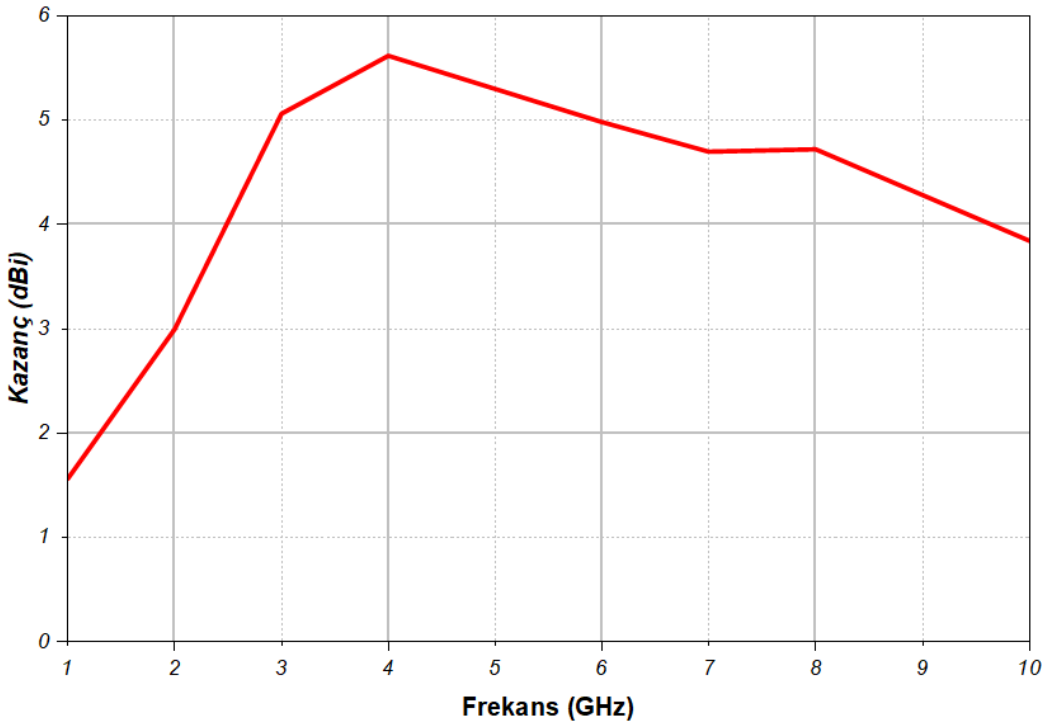


Şekil 4.13: Nihai diskon anten tasarımına ait iki boyutlu ışıma örüntüleri; (a) 1 GHz, (b) 2 GHz, (c) 6 GHz, (d) 8 GHz ve (e) 10 GHz

Şekil 4.13 incelendiğinde, antenin düşük frekanslarda diskon antenlerden beklenen eş yönlü ışıma karakteristiğini koruduğu görülmektedir. Özellikle 1 GHz ve 2 GHz frekanslarında

phi=0 düzlemindeki örüntülerin dairesel forma oldukça yakın olduğu ve kazanç dağılımının açısal olarak dengeli olduğu gözlemlenmektedir.

Frekansın artmasıyla birlikte ışıma örüntülerinde dalgalanmalar ve yönlülükte artışlar meydana gelmektedir. Özellikle 6 GHz ve üzerindeki frekanslarda phi=90 düzleminde yan lobların oluştuğu ve örüntü şeklinin daha karmaşık bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Buna rağmen anten, çalışma frekans bandı boyunca genel olarak eş yönlü ışıma karakteristiğini korumakta ve geniş bantlı haberleşme uygulamaları için uygun bir ışıma davranışı sergilemektedir. Nihai diskon anten tasarımına ait phi=90 düzlemindeki maksimum kazanç değerleri Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14: Nihai diskon anten tasarımının phi=90 düzlemindeki maksimum kazanç değerleri

Şekil 4.14'e göre maksimum kazanç değeri çalışma frekansı boyunca yaklaşık 1.6 dBi ile 5.6 dBi arasında değişmektedir. En düşük kazanç değeri 1 GHz frekansında elde edilirken, en yüksek kazanç değeri yaklaşık 5.6 dBi ile 4 GHz frekansında gerçekleşmiştir. 4 GHz sonrasında kazançta kademeli bir azalma meydana gelmekle birlikte, frekans bandının geri kalanında yaklaşık 4 dBi ve üzerindeki seviyeler korunmuştur.

4.5 Nihai Diskon Antenin Üretimi ve Deneysel Doğrulaması

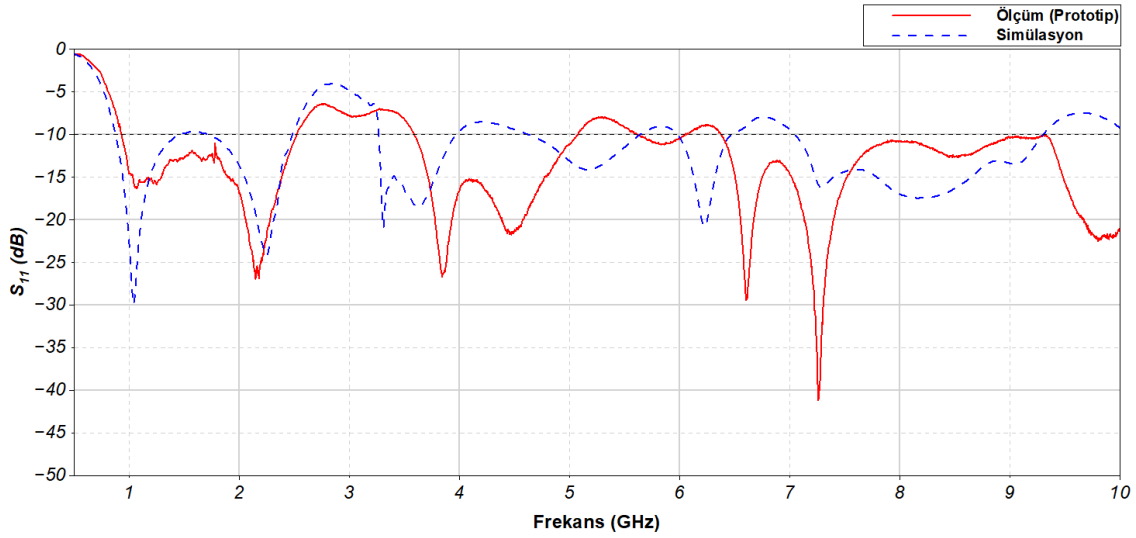
Optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen nihai diskon anten tasarımının deneysel olarak doğrulanabilmesi amacıyla anten prototipi üretilmiştir. Antenin disk ve konik elemanlarının üretiminde 0.2 mm kalınlığında pirinç levha kullanılmıştır. Yapıyı oluşturan tel elemanlar ise 1.2 mm çapında pirinç tellerden imal edilmiştir. Disk ve konik yapılara ait metal parçalar, tasarım boyutlarının hassas bir şekilde elde edilebilmesi amacıyla lazer kesim yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen parçalar daha sonra lehimleme işlemi kullanılarak birleştirilmiş ve anten geometrisi oluşturulmuştur. Antenin beslemesi, RG402 koaksiyel kablo ve SMA erkek konnektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anten geometrisinin mekanik olarak desteklenmesi ve ölçümler sırasında sabit konumda tutulabilmesi amacıyla PLA malzemesinden üç boyutlu yazıcı ile üretilen bir taşıyıcı yapı kullanılmıştır. Üretilen anten prototipine ve ölçüm düzeneğine ait görüntüler Şekil 4.15'te verilmiştir.



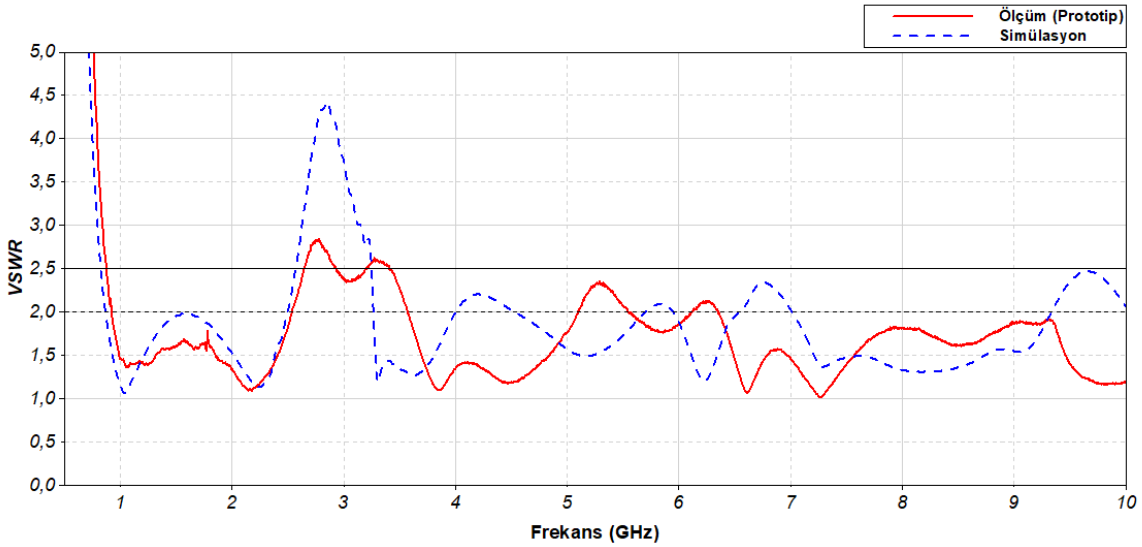
Şekil 4.15: Üretilen diskon anten prototipi ve geri dönüş kaybı ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği

Üretilen anten prototipinin geri dönüş kaybı ölçümleri, 30 kHz–18 GHz frekans aralığında çalışabilen Saluki S5105D serisi vektör ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesinde kullanılan koaksiyel kablo için kalibrasyon işlemi uygulanmış ve referans düzlemi ölçüm kablosunun ucuna taşınmıştır. Kalibrasyonun ardından anten doğrudan ölçüm kablosuna bağlanarak geri dönüş kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında çevresel yansımaların etkisini azaltmak amacıyla antenin etrafına RF absorber malzemeler yerleştirilmiştir.

Nihai diskon anten tasarımına ait simülasyon ve ölçüm S_{11} ve VSWR sonuçları sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16: Nihai diskon anten tasarımına ait simülasyon ve ölçüm S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.17: Nihai diskon anten tasarımına ait simülasyon ve ölçüm VSWR sonuçlarının karşılaştırılması

4.6 Nihai Diskon Antenin Simülasyonu ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilen simülasyon ve ölçüm sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, antenin genel frekans davranışının her iki durumda da benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ölçüm sonuçlarında bazı rezonans frekanslarının simülasyon sonuçlarına göre kısmen kaydığı ve geri dönüş kaybı seviyelerinde farklılıklar oluştuğu

gözlenmiştir. Bununla birlikte, antenin temel çalışma karakteristiği korunmuş ve simülasyonlarda öngörülen geniş bantlı davranış ölçümlerle doğrulanmıştır.

Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki farklılıkların; üretim toleransları, lehimleme işlemleri, besleme yapısındaki mekanik etkiler ve ölçüm ortamından kaynaklanan yansımalar gibi nedenlerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Özellikle diskon anten gibi geniş bantlı yapılarda küçük geometrik değişimler dahi rezonans frekanslarında kaymalara neden olabilmektedir.

Ölçüm sonuçlarına göre antenin VSWR değeri 0.87–2.64 GHz ve 3.42–10 GHz frekans aralıklarında 2.5'in altında kalmaktadır. Geliştirilen nihai diskon antenin temel performans özellikleri Tablo 4.4'te özetlenmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, önerilen diskon anten tasarımının geniş bir frekans aralığında kabul edilebilir empedans uyumu sağladığı ve gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının deneysel olarak doğrulandığı söylenebilir.

Tablo 4.4: Geliştirilen nihai diskon antenin temel performans özellikleri.

Kaynak	Anten Tipi	Frekans Aralığı (MHz)	VSWR	Boyut (Çap × Yükseklik) [mm]
Bu çalışma	Ters Konik Elemanlı Diskon Anten	0.87 - 2.64 / 3.42 - 10	< 2.5	105.6 x 89.1

5. DÜZLEMSEL UGB MONOPOL ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, önceki bölümlerde incelenen UGB diskon ve çift bikonik anten tasarımlarından farklı olarak, daha kompakt, düşük profilli ve baskı devre teknolojileriyle gerçekleştirilebilen düzlemsel (planar) monopol anten yapıları ele alınmaktadır. Diskon ve bikonik antenler geniş bant performansları açısından önemli avantajlar sunmakla birlikte, hacimli yapıları, mekanik üretim zorlukları ve görece karmaşık tasarım süreçleri nedeniyle taşınabilir ve entegre sistem uygulamalarında çeşitli sınırlamalara sahiptir. Buna karşılık düzlemsel anten yapıları; düşük maliyet, hafiflik, kompakt boyut ve kolay üretilebilirlik gibi özellikleri sayesinde modern kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kablosuz haberleşme teknolojilerindeki hızlı gelişim ve taşınabilir sistemlere yönelik artan gereksinimler doğrultusunda, küçük boyutlu, geniş bant performansı sunabilen ve sistem entegrasyonuna uygun anten tasarımlarına olan ilgi giderek artmaktadır. Bu kapsamda, bu bölümde FR-4 taban malzemesi (ε_r = 4.3) kullanılarak 57 mm × 57 mm × 1.6 mm boyutlarında, 2.15 – 11.1 GHz frekans aralığında çalışabilen düzlemsel ultra geniş bant monopol anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Önerilen anten yapısında bant genişliğinin artırılması amacıyla farklı geometrik optimizasyon teknikleri uygulanmış, ayrıca çeşitli besleme yapıları kullanılarak besleme yöntemlerinin anten performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tasarlanan antenlerin empedans uyumu, ışıma karakteristikleri, kazanç ve verim performansları elektromanyetik simülasyonlar aracılığıyla analiz edilmiş; elde edilen sonuçlar üretilen prototip antenlerin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak tasarımın doğruluğu değerlendirilmiştir.

5.1 Literatürde Yapılmış Çalışmalar

UGB haberleşme sistemleri için düzlemsel monopol antenler üzerine literatürde çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda bant genişliğinin artırılması, empedans uyumunun iyileştirilmesi ve anten boyutlarının küçültülmesi amacıyla farklı radyatör geometrileri, besleme yapıları ve toprak düzlemi modifikasyonları önerilmiştir. Bu kapsamda üçgen, dikdörtgen, dairesel, eliptik ve bu geometrilerin türevleri kullanılarak çok

sayıda anten tasarımı önerilmiştir. Tasarım iyileştirmeleri yalnızca radyatör geometrisinin değiştirilmesiyle sınırlı kalmayıp, toprak düzlemine yarık (slot) eklenmesi, besleme yapısının optimize edilmesi ve farklı akım yolları oluşturulması gibi yöntemlerle empedans uyumu ve bant genişliği geliştirilmiştir.

Kasi et al. (2011), ultra geniş bant uygulamaları için kompakt boyutlu mikroşerit beslemeli düzlemsel bir anten tasarımı önermiştir. Çalışmada, dikdörtgen yarık içeren radyatör yapısı ile toprak düzleminde gerçekleştirilen modifikasyon ile birlikte kullanılarak antenin geniş bant performansı iyileştirilmiştir. Huang and Hsia (2005) ise eliptik radyatör geometrisine sahip düzlemsel bir monopol anten tasarlamış, elips yarıçapları ile toprak düzlemindeki yarık boyutlarını parametrik olarak optimize ederek bant genişliğini iyileştirmiştir.

CPW besleme tekniği kullanılan çalışmalarda da benzer optimizasyon yaklaşımları görülmektedir. Al-Husseini et al. (2011), ultra geniş bant uygulamaları için yumurta şekilli radyatöre sahip CPW beslemeli düzlemsel bir monopol anten önermiştir. Çalışmada, toprak düzlemine yumurta şekilli bir slot entegre edilmiş ve bu slotun boyutu ile merkez konumu parametrik olarak değiştirilerek antenin empedans bant genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Benzer şekilde, Liu and Kao (2005) CPW beslemeli üçgen yapılı düzlemsel monopol anten tasarlamış ve toprak düzleminde kullanılan dikdörtgen yarıklar sayesinde elektromanyetik kuplajı artırarak bant genişliğini geliştirmiştir. Park and Jung (2022) tarafından önerilen başka bir CPWG beslemeli tasarımda ise iç mekân konum belirleme uygulamaları hedeflenmiş, via yapıları kullanılarak istenmeyen akım dağılımları azaltılmış ve ışıma verimi artırılmıştır.

Farklı radyatör geometrileri kullanılarak bant genişliğini artırmaya yönelik çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Uwiringiyimana et al. (2022), yüksek gerilim ekipmanlarında kısmi deşarj tespiti amacıyla yarım dairesel radyatör ve dikdörtgen yarıklı toprak düzleminden oluşan geniş bantlı bir anten tasarımı gerçekleştirmiştir. Tripathi et al. (2014) ultra geniş bant performansı elde etmek amacıyla başlangıçta altıgen geometrili düzlemsel monopol anten yapısı kullanmış, ardından Koch fraktal geometrisini hem radyatör kenarlarına hem de toprak düzlemine entegre ederek ek rezonans modları oluşturmuştur. Bu yaklaşım sayesinde 3–12.8 GHz frekans aralığında yaklaşık %122 bant genişliği elde edilmiştir. Liu et al. (2011) ise dairesel halka yapısına sahip kompakt bir anten tasarlamış, besleme hattını radyatör merkezinden kaydırarak asimetrik akım dağılımı oluşturmuş ve bu sayede çoklu rezonans

modları uyarılarak bant genişliği artırılmıştır. Rathore et al. (2015) tarafından önerilen çalışmada ise dairesel radyatör üzerine eklenen merkezi ve çevresel dikdörtgen yarıklar kullanılarak farklı akım yolları oluşturulmuş ve ultra geniş bant performansı sağlanmıştır.

Esnek ve yeni nesil uygulamalara yönelik çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Kirtania et al. (2021), IoT uygulamaları için PET alt tabaka üzerine inkjet baskı yöntemiyle üretilmiş CPW beslemeli esnek bir ultra geniş bant düzlemsel monopol anten önermiştir. Dairesel radyatör yapısı ve besleme hattında gerçekleştirilen kesit optimizasyonu ile 3–10.7 GHz ve 15–18 GHz frekans bantlarında çalışma sağlanmıştır. Bunun yanında Yang et al. (2010) çift besleme tekniği uygulayarak kademeli geçişli mikroşerit besleme hattına ve modifiye edilmiş toprak düzlemine sahip bir anten tasarlamış ve empedans uyumunu iyileştirmiştir.
Literatürde incelenen çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, düzlemsel monopol UGB anten tasarımlarında bant genişliğini artırmak amacıyla slot yapıları, fraktal geometriler, toprak düzlemi modifikasyonları ve farklı radyatör geometrilerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, literatürde önerilen anten tasarımlarının çalışma frekans aralıkları, boyutları, kullanılan alt tabaka malzemeleri, besleme yöntemleri ve performans parametreleri açısından karşılaştırmalı özeti Tablo 5.1'de sunulmuştur. Bununla birlikte, çalışmaların büyük çoğunluğunda tek bir besleme yöntemi tercih edilmiş olup, farklı besleme tekniklerinin aynı anten yapısı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada farklı besleme yöntemlerinin düzlemsel monopol anten performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 5.1: Literatürde önerilen düzlemsel UGB monopol anten tasarımlarının karşılaştırılması.

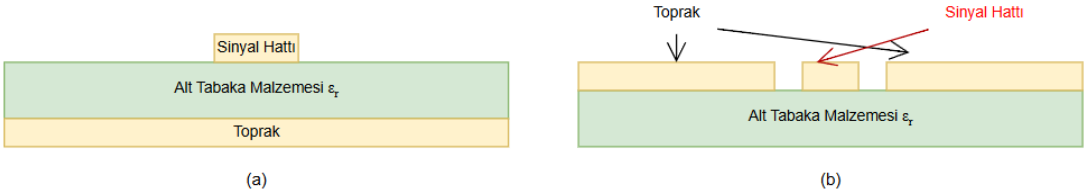
Kaynak	Frekans Aralığı (GHz)	Boyut (en × boy) [mm]	Besleme Türü	Max Kazanç (dbi)	Alt Tabaka Malzemesi	ε_r
Kasi et al., 2011)	3.8 - 12	29 x 28	Mikroşerit	4.5	FR-4	3.38
Huang and Hsia, 2005)	3 - 11	35 x 20	Mikroşerit	5.55	FR-4	4.4
Al-Husseini et al., 2011)	2.2 x12	40 x 30	CPW	5	FR-4	4.4
Liu and Kao, 2005)	3.05 – 12.9	31 x 24	CPW	4.7	FR-4	4.4
Park and Jung, 2022)	3.1 - 10.8	12.5 x 12.5	CPWG	4.5	FR-4	4.4
Uwiringiyimana et al., 2022)	1.2 -4.5	100 x 100	Mikroşerit	5.2	FR-4	4.4
Tripathi et al., 2014)	3 – 12.8	31 -28	Mikroşerit	6	FR-4	4.4
Liu et al., 2011)	3.7 - 18	28 x 26	Mikroşerit	7.2	FR-4	4.6
Rathore et al., 2015	2.5 – 8.2 / 10 - 15	47 x 47	Mikroşerit	3	Rogers R03003	3
Kirtania et al., 2021)	3.04 – 10.7 / 15.18 - 18	47 x 25	CPW	5.7	PET	3.2
Yang et al., 2010)	2.82 - 12	38 x 24	Mikroşerit	5	FR-4	2.65

5.2 Düzlemsel UGB Antenlerde Besleme Yöntemleri

Düzlemsel monopol antenlerde ultra geniş bantlı frekans aralığında uygun empedans uyumunun sağlanabilmesi amacıyla farklı besleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında koaksiyel besleme, mikroşerit besleme, eş düzlemsel dalga kılavuzu (Coplanar Waveguide, CPW), taban düzlemli eş düzlemsel dalga kılavuzu (Coplanar Waveguide with Ground, CPWG) ve çeşitli hibrit besleme yapıları yer almaktadır. Besleme yöntemi seçimi; antenin empedans bant genişliği, ışıma karakteristikleri, üretilebilirliği ve devre entegrasyonu üzerinde doğrudan etkili olduğundan düzlemsel UGB anten tasarımında kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, düzlemsel anten yapılarında yaygın olarak tercih edilen mikroşerit besleme ve eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme yöntemleri ele alınmıştır. Her iki besleme yapısı da düşük profilli olmaları, baskı devre kartı (PCB) teknolojileri ile kolay üretilebilmeleri ve geniş bant performans açısından avantaj sağlamaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir.

Mikroşerit besleme yapısında, radyatör elemanı ve besleme hattı alt tabakanın üst yüzeyinde yer alırken, toprak düzlemi alt yüzeyde bulunmaktadır. Bu iki iletken yapı arasında dielektrik alt tabaka yer almakta olup elektromanyetik enerji bu yapı üzerinden iletilmektedir. Buna karşılık CPW besleme yapısında, besleme hattı ile toprak düzlemleri aynı yüzey üzerinde konumlandırılmaktadır. Bu yapı, via gereksinimini azaltması, üretim kolaylığı sağlaması ve geniş bant empedans uyumu açısından avantaj sunması nedeniyle özellikle ultra geniş bant anten tasarımlarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Lim et al., 2010). Şekil 5.1'de mikroşerit ve CPW besleme yapılarının şematik gösterimleri sunulmaktadır.



Şekil 5.1: (a) mikroşerit besleme hattı, (b) eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme yapısı

5.3 Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu (CPW) Beslemeli Düzlemsel UGB Monopol Anten Tasarımı

Bir önceki bölümde açıklanan CPW besleme yapısının ultra geniş bant anten tasarımlarındaki avantajları doğrultusunda, bu bölümde 2.15–11.1 GHz frekans aralığında çalışacak CPW beslemeli düzlemsel monopol anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde zaman bölgesi tam dalga elektromanyetik simülasyon yöntemlerinden yararlanılarak anten geometrisi optimize edilmiş, ardından tasarlanan yapının prototipi üretilerek deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak tasarım performansı değerlendirilmiştir.

5.3.1 Anten geometrisi ve parametrik çalışmalar

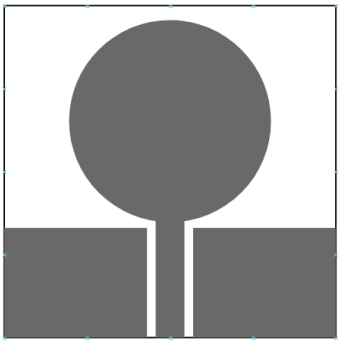
Anten tasarımında, ultra geniş bant performans elde edebilmek amacıyla başlangıç geometrisi olarak dairesel formda bir radyatör yapısı seçilmiştir. Dairesel radyatör geometrisi, simetrik akım dağılımı sağlayabilmesi ve geniş bant uygulamalarında uygun empedans davranışı göstermesi nedeniyle tercih edilmiştir. Başlangıç boyutlandırması hedeflenen minimum çalışma frekansına göre gerçekleştirilmiştir. Monopol antenlerde temel rezonans davranışı yaklaşık çeyrek dalga boyu $\lambda/4$ prensibi ile açıklanabilmektedir

(Liang, 2006). Bu nedenle, dairesel radyatör çapı alt çalışma frekansı 2 GHz kabul edilerek bu yaklaşım doğrultusunda başlangıç tasarım parametresi olarak belirlenmiştir.

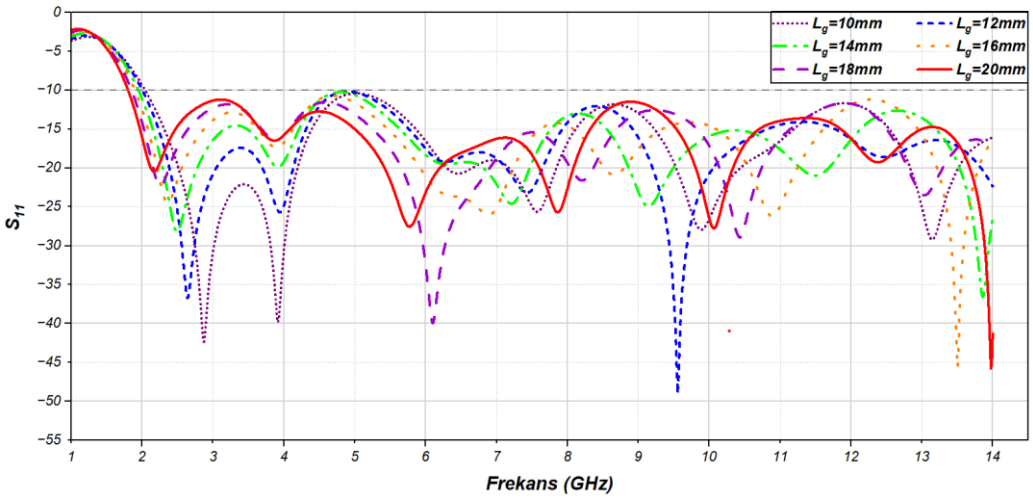
Tasarımın başlangıç geometrisi, Şekil 5.2'de gösterildiği üzere dairesel radyatör, CPW besleme hattı ve toprak düzleminden oluşturulmuştur. Anten performansını iyileştirmek amacıyla parametrik optimizasyon çalışmaları zaman bölgesi tam dalga elektromanyetik simülasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir geometrik parametrenin anten performansı üzerindeki etkisini bağımsız olarak inceleyebilmek amacıyla parametrik analizlerde yalnızca ilgili parametre değiştirilmiş, diğer tüm geometrik boyutlar sabit tutulmuştur.

İlk optimizasyon aşamasında, toprak düzlemi uzunluğunu ifade eden L_g parametresinin anten performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı L_g değerleri için elde edilen geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri Şekil 5.3'de sunulmaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde, L_g parametresindeki değişimin özellikle düşük frekans bölgesindeki empedans uyumu üzerinde belirgin etkisi olduğu görülmüştür. Parametrik analiz sonucunda, en uygun geniş bant performansının L_g = 20 mm değerinde elde edildiği belirlenmiştir.

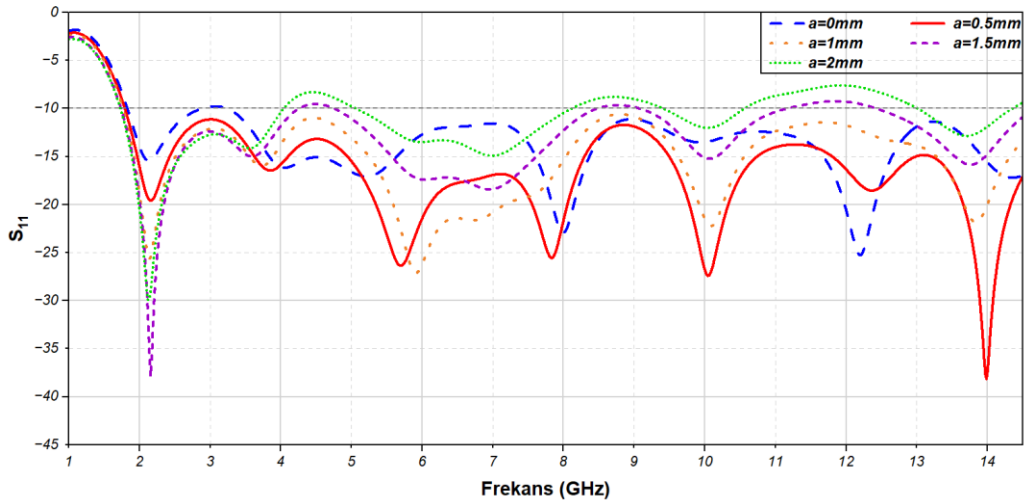
Bir sonraki aşamada, radyatör ile toprak düzlemi arasındaki mesafeyi ifade eden a parametresinin anten performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Farklı a değerleri için gerçekleştirilen geri dönüş kaybı analizleri Şekil 5.4'de verilmiştir. Sonuçlar, bu parametrenin antenin empedans eşleşmesini doğrudan etkilediğini göstermiş olup optimum değerin a = 0.5 mm olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, anten geometrisini oluşturan diğer parametreler için de hedeflenen ultra geniş bant performansını sağlayacak şekilde parametrik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2: Dairesel radyatör yapısına sahip eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) beslemeli düzlemsel monopol anten

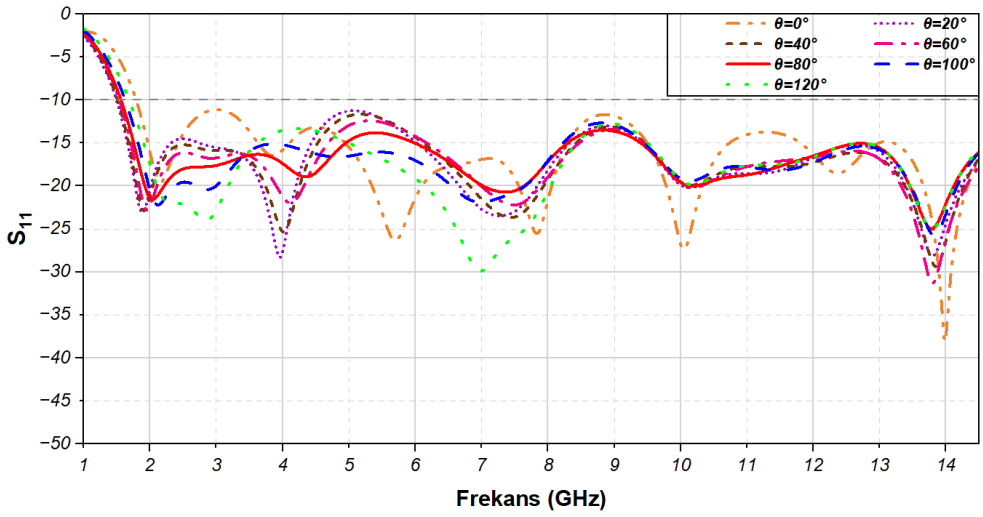


Şekil 5.3: L_g parametresinin farklı değerleri için geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri



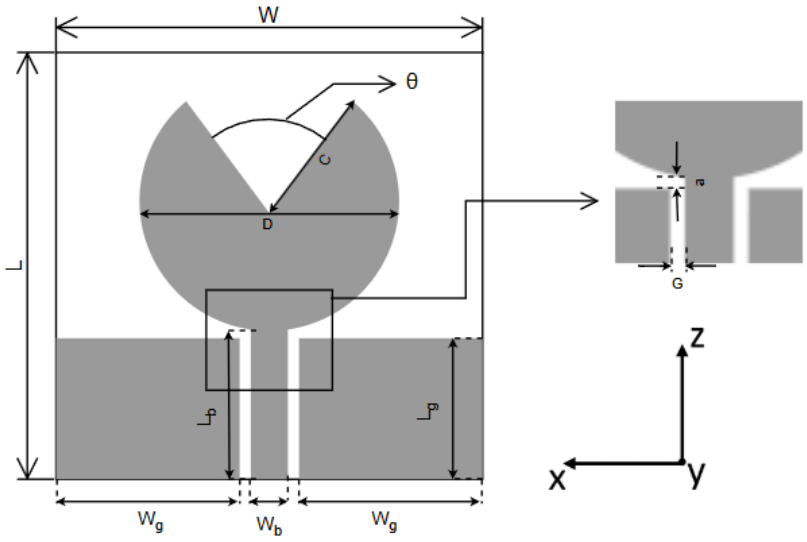
Şekil 5.4: Farklı *a* parametresi değerleri için geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri

Ardından, antenin geri dönüş kaybı performansını iyileştirmek amacıyla dairesel radyatörün üst kısmında sektörel bir kesit oluşturulmuş ve bu kesit açısının (θ) anten performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla parametrik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı kesit açıları için elde edilen geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri Şekil 5.5'te sunulmaktadır.



Şekil 5.5: Kesit açısı parametresinin farklı değerleri için geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri

Analiz sonuçları, kesit açısının artırılmasıyla antenin empedans uyumunun iyileştiğini göstermiş ve en uygun geri dönüş kaybı performansının 80° kesit açısında elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu optimizasyon sonucunda elde edilen nihai anten geometrisi Şekil 5.6'da, antene ait geometrik parametre değerleri ise Tablo 5.2'de sunulmaktadır.



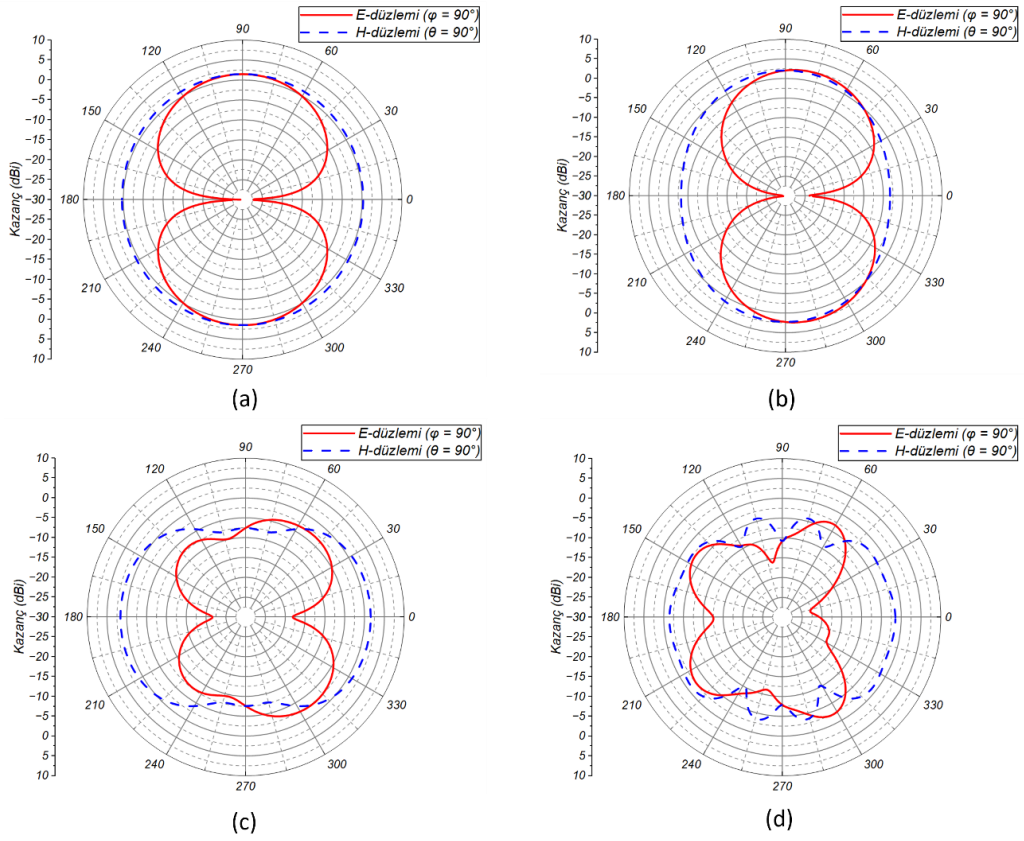
Şekil 5.6: Eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) beslemeli nihai düzlemsel monopol anten geometrisi

Tablo 5.2: Optimize edilmiş anten geometrisine ait parametre değerleri

Parametre	Değer (birim)
L	57 mm
W	57 mm
D	37 mm
C	18.5 mm
L_b	20.5 mm
W_b	5 mm
a	0.5mm
G	0.59mm
L_g	20mm
W_g	25.41 mm
θ	80°

5.3.2 Kazanç ve ışıma örüntüsü analizi

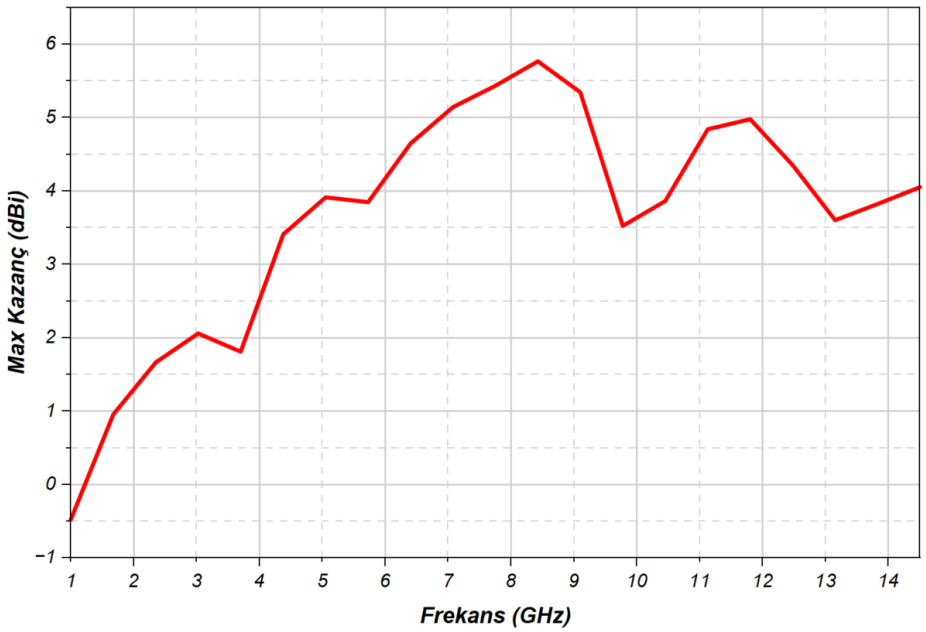
Optimize edilen anten geometrisinin ışıma performansını değerlendirmek amacıyla, 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz ve 12 GHz frekanslarında E ve H düzlemlerine ait ışıma örüntüleri incelenmiştir. Analizlerde kullanılan anten yerleşimi ve koordinat sistemi Şekil 5.6'da gösterilmekte olup, ilgili sonuçlar Şekil 5.7'de sunulmaktadır.



Şekil 5.7: Antenin farklı frekanslardaki E ve H düzlemlerine ait ışıma örüntüleri: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz, (d) 12 GHz

Şekil 5.7'de verilen sonuçlar incelendiğinde, düşük frekanslarda antenin H düzleminde eş yönlü ışıma karakteristiği sergilediği görülmektedir. E düzleminde ise monopol antenlerden beklenen sekiz benzeri ışıma davranışı elde edilmiştir. Frekansın artmasıyla birlikte anten üzerinde oluşan daha yüksek mertebeden rezonans modlarının etkisiyle ışıma deseninde bozulmalar meydana gelmektedir. Özellikle 12 GHz frekansında bu etkinin daha belirgin hale geldiği ve antenin daha yönlü bir ışıma davranışı göstermeye başladığı görülmektedir. Bununla birlikte, çalışma bandının düşük ve orta frekans bölgelerinde antenin beklenen monopol karakteristiğini koruduğu görülmektedir.

Antenin çalışma frekans bandı boyunca maksimum kazanç değişimini değerlendirmek amacıyla frekansa bağlı maksimum kazanç eğrisi elde edilmiş olup, ilgili sonuçlar Şekil 5.8'de sunulmaktadır.



Şekil 5.8: Antenin çalışma bandı boyunca maksimum kazanç değişimi

5.3.3 Grup gecikmesi analizi

Önerilen anten yapısının zaman bölgesindeki performansını değerlendirebilmek amacıyla grup gecikmesi analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, aynı anten yapısından iki adet kullanılarak karşılıklı yerleştirilmiş ve grup gecikmesi karakteristiği simülasyon sonucunda elde edilen (S_{21}) iletim parametresi üzerinden hesaplanmıştır. Analiz de antenler arası

mesafenin belirlenmesi için uzak alan koşulu dikkate alınmıştır. Uzak alan mesafesi aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanmıştır:

$$R_{ff} \geq \frac{2D^2}{\lambda_{min}} \tag{5.1}$$

Burada R_{ff} uzak alan mesafesini, D antenin en büyük fiziksel boyutunu ve λ_{min} en yüksek analiz frekansına karşılık gelen minimum dalga boyunu ifade etmektedir. Bu çalışmada en yüksek analiz frekansı f_{max} = 12 GHz olarak alındığından, minimum dalga boyu:

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \tag{5.2}$$

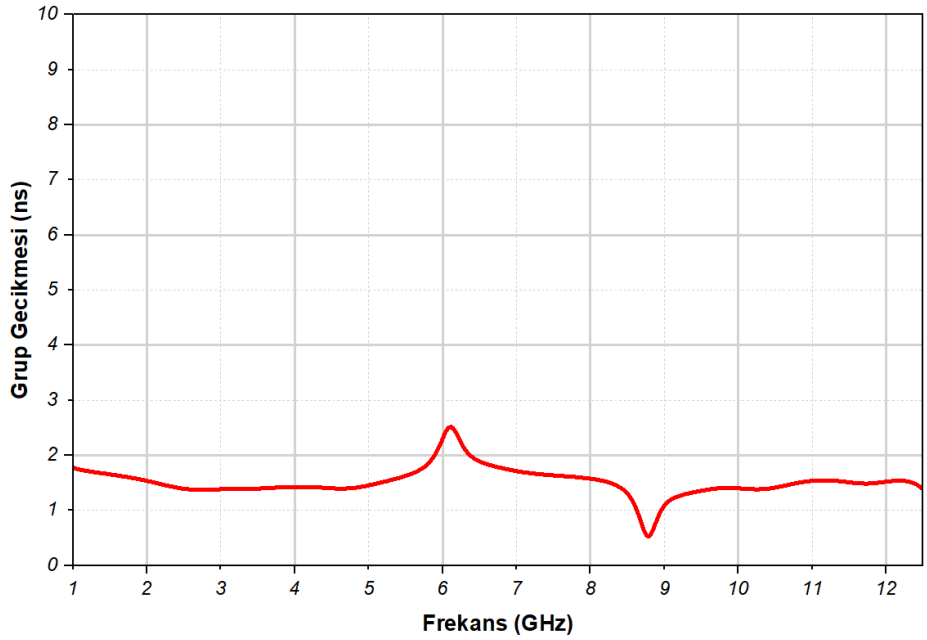
Bağıntısı kullanarak hesaplanmıştır. Denklem (5.2) kullanarak λ_{min} = 25 mm olarak elde edilmiştir.

Antenin en büyük fiziksel boyutu D = 57 mm olduğundan, denklem (5.1) kullanılarak uzak alan mesafesi $R_{ff} \geq 260$ mm olarak belirlenmiştir. Bu değerin üzerinde kalmak amacıyla grup gecikmesi analizinde antenler arası mesafe 300 mm olarak seçilmiştir. Bu mesafe için serbest uzaydaki teorik yayılım gecikmesi aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır:

$$\tau_0 = \frac{R}{c} \tag{5.3}$$

Burada τ_0 yayılım gecikmesini, R antenler arasındaki mesafeyi ve c ışık hızını ifade etmektedir. Antenler arası mesafenin 300 mm diğer bir ifadeyle (0.3 m) olarak seçilmesi durumunda denklem (5.3) kullanılarak teorik yayılım gecikmesi $\tau_0 = 1$ ns olarak elde edilmektedir. Bu değer, antenler arasındaki serbest uzay yayılımından kaynaklanan teorik gecikmeyi göstermekte olup grup gecikmesi sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmaktadır.

Önerilen anten yapısına ait grup gecikmesi karakteristiği Şekil 5.9'da sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde grup gecikmesinin çalışma bandının büyük bölümünde yaklaşık 1.3–1.8 ns aralığında değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte yaklaşık 6 GHz civarında sınırlı bir artış, 8.8 GHz civarında ise kısa süreli bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9: Önerilen anten yapısına ait frekansa bağlı grup gecikmesi karakteristiği

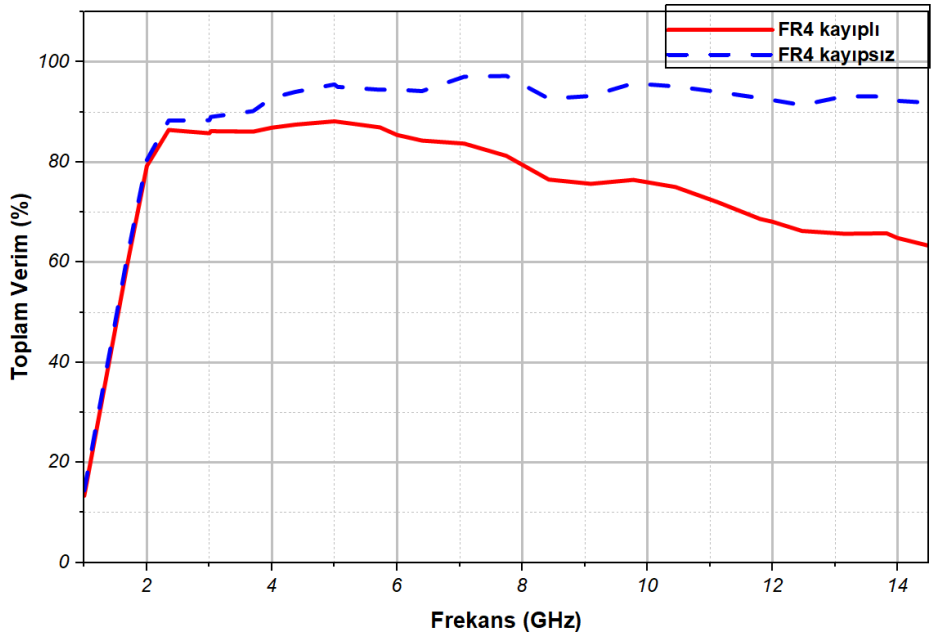
Grup gecikmesi karakteristiğinin çalışma bandı boyunca genel olarak kararlı bir değişim gösterdiği görülmektedir. Teorik yayılım gecikmesine göre gözlenen farkın, antenlerin frekansa bağlı faz karakteristiği ve sistemin oluşturduğu ek gecikmelerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen anten yapısının çalışma bandı boyunca kararlı bir zaman alanı performansı sergilediğini göstermektedir.

5.3.4 Işıma verimi analizi

Optimize edilen anten geometrisinin verim performansını değerlendirmek amacıyla çalışma frekans bandı boyunca toplam ışıma verimi incelenmiştir. Ayrıca, kullanılan FR-4 alt tabaka malzemesinin kayıplı ve ideal kayıpsız durumları ayrı ayrı değerlendirilerek dielektrik kayıpların anten verimi üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen toplam verim sonuçları Şekil 5.10'da sunulmaktadır.

Şekil 5.10 incelendiğinde, kayıpsız FR-4 durumunda antenin toplam veriminin çalışma bandı boyunca yaklaşık %88–97 aralığında değiştiği görülmektedir. Kayıplı FR-4 kullanılması durumunda ise toplam verim özellikle yüksek frekanslarda belirgin şekilde azalarak yaklaşık %65–88 aralığında gerçekleşmiştir. Düşük frekanslarda her iki durum arasında sınırlı bir fark gözlemlenirken, frekansın artmasıyla birlikte dielektrik kayıpların etkisinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir.

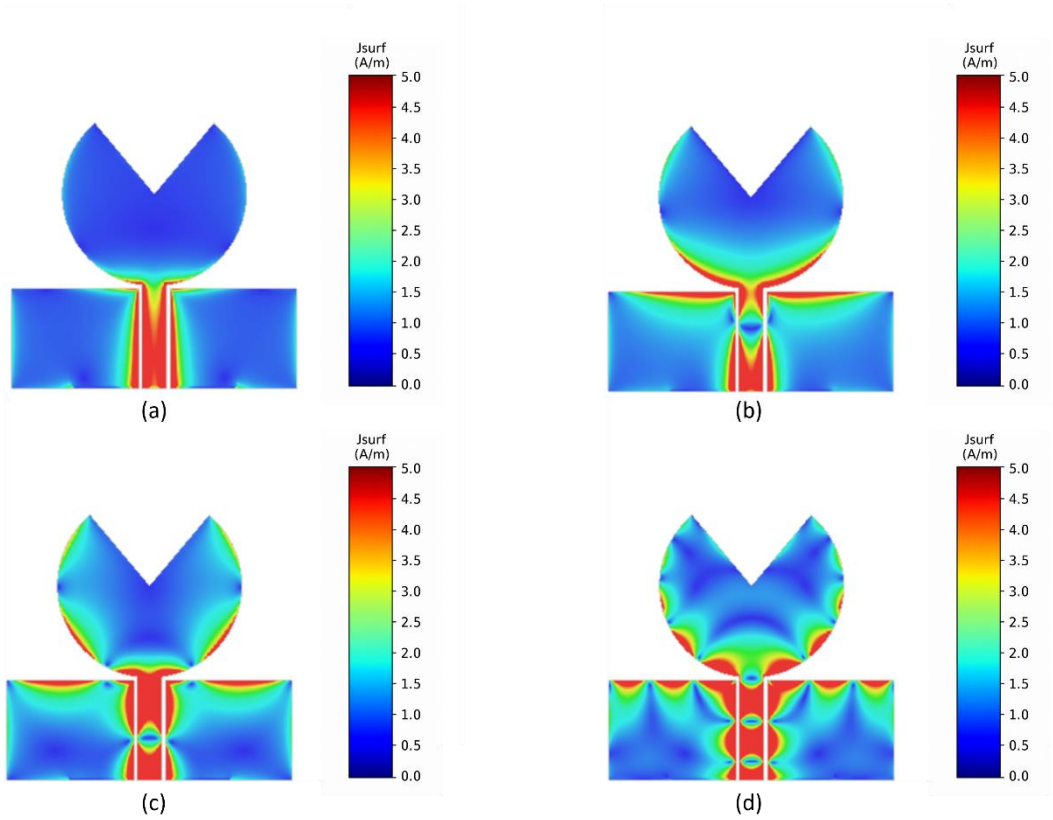
Bu sonuçlar, FR-4 malzemesinin düşük maliyet ve kolay erişilebilirlik açısından avantajlı olmasına karşın, dielektrik kayıpları nedeniyle anten verimini sınırlayabildiğini göstermektedir. Daha düşük kayıplı alt tabaka malzemeleri kullanılması durumunda anten verim performansının iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada maliyet, üretim kolaylığı ve tasarım gereksinimleri göz önünde bulundurularak FR-4 alt tabaka malzemesi tercih edilmiştir.



Şekil 5.10: FR-4 alt tabakasının kayıplı ve kayıpsız durumları için toplam ışıma veriminin frekansa bağlı değişimi

5.3.5 Yüzey akım dağılımı analizi

Önceki bölümde incelenen ışıma örüntülerinde frekansın artmasıyla birlikte antenin ışıma davranışında değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimin anten üzerindeki akım davranışı ile ilişkisini değerlendirmek amacıyla, optimize edilmiş anten geometrisine ait yüzey akım yoğunluğu dağılımları 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz ve 12 GHz frekanslarında incelenmiştir. Farklı frekanslardaki sonuçların doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm analizlerde yüzey akım yoğunluğu skalası aynı aralıkta sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.11'da sunulmaktadır.



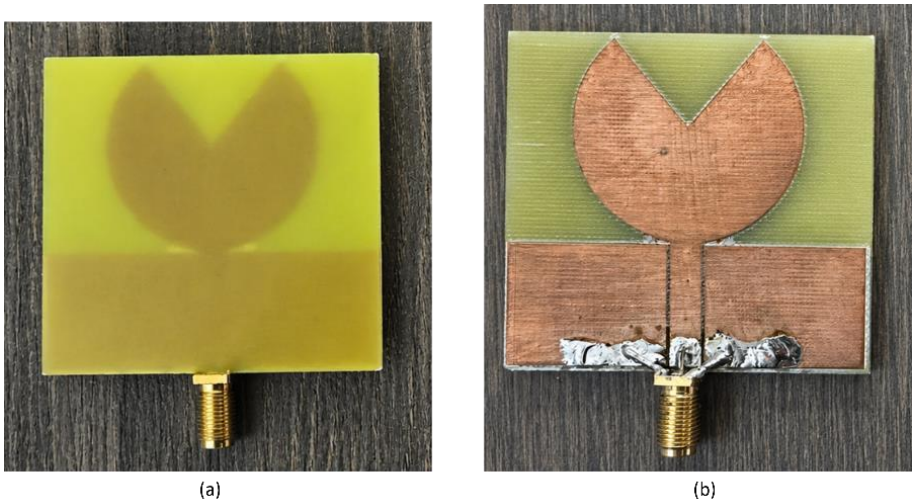
Şekil 5.11: Optimize edilmiş CPW beslemeli düzlemsel monopol antenin farklı frekanslardaki yüzey akım dağılımları: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz, (d) 12 GHz

Şekil 5.11 incelendiğinde, 2 GHz frekansında yüzey akım yoğunluğunun ağırlıklı olarak CPW besleme hattı ile radyatörün besleme noktasına yakın alt bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda antenin temel akım yolunun büyük ölçüde besleme bölgesi çevresinde oluştuğunu göstermektedir. 4 GHz ve 6 GHz frekanslarında ise yüzey akım yoğunluğunun radyatör boyunca daha geniş alanlara yayıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, frekans arttıkça anten yapısının farklı bölgelerinin akım taşıma davranışına katkı sağladığını göstermektedir. Özellikle radyatör üzerinde oluşturulan sektörel kesit geometrisinin akım dağılımını değiştirerek antenin geniş bant performansına katkı sağladığı değerlendirilmektedir. 12 GHz frekansında ise yüzey akım yoğunluğu dağılımının daha lokal bölgelerde yoğunlaştığı ve dağılım yapısının daha karmaşık hale geldiği görülmektedir. Bu durum, yüksek frekanslarda anten üzerindeki akım davranışının düşük frekanslara kıyasla belirgin şekilde farklılaştığını göstermektedir.

5.3.6 Prototip üretimi ve deneysel ölçümler

Önerilen CPW beslemeli düzlemsel monopol antenin simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Anten, FR-4 alt tabaka kullanılarak LPKF

baskı devre prototipleme sistemi ile üretilmiştir. Üretim sonrasında antenin besleme noktasına PCB tipi SMA dişi konnektör monte edilmiş ve lehimleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen prototip antenin ön ve arka yüzey görünümleri Şekil 5.12'de sunulmaktadır.



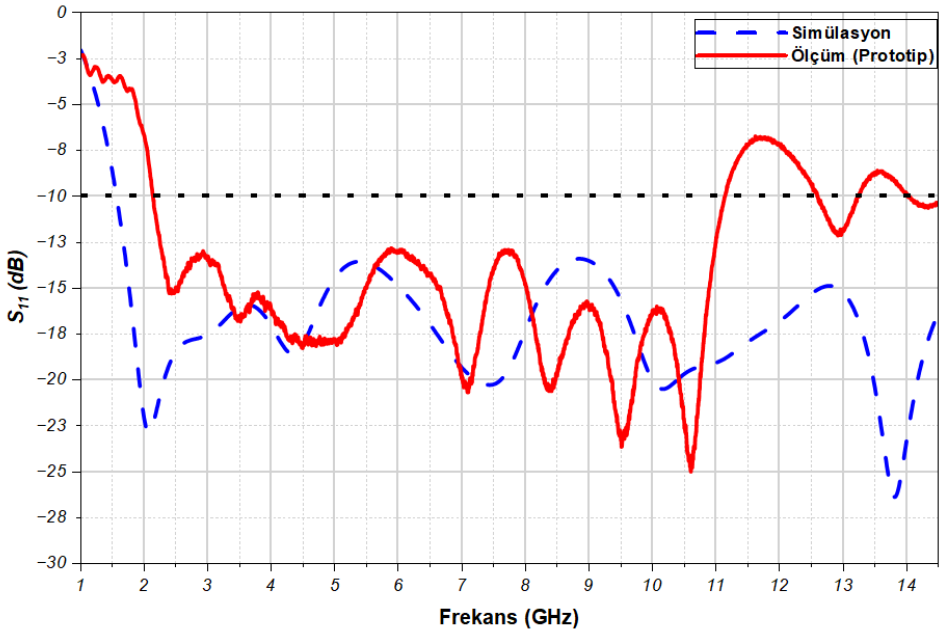
Şekil 5.12: Üretilen CPW beslemeli düzlemsel monopol anten prototipinin fiziksel görünümleri: (a) arka yüzey, (b) ön yüzey

Deneysel ölçümler, Saluki S5105D serisi 30 kHz–18 GHz vektör ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinde, antenin absorber üzerinde serbest uzay koşullarına daha yakın bir ortamda ölçülebilmesi amacıyla analizöre yaklaşık 60 cm uzunluğunda SMA uzatma kablosu bağlanmıştır. Ölçüm doğruluğunu sağlamak amacıyla, kullanılan SMA kalibrasyon kiti ile kalibrasyon işlemi bu uzatma kablosunun uç noktasında gerçekleştirilmiştir. Ardından prototip anten uygun SMA dönüştürücü aracılığıyla ölçüm sistemine bağlanarak geri dönüş kaybı ölçümleri alınmıştır. Ölçüm düzeneğine ait görsel Şekil 5.13'de sunulmaktadır.



Şekil 5.13: CPW beslemeli antene ait ölçüm düzeneği

Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.14'te sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ölçülen geri dönüş kaybının yaklaşık 2.15 GHz'den 11.1 GHz'e kadar −10 dB seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, üretilen prototip antenin ölçüm yapılabilen frekans aralığında ultra geniş bant çalışma karakteristiğini sağladığını göstermektedir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasında bazı farklılıklar gözlemlenmekle birlikte, bu farklılıkların üretim toleransları, SMA konnektör ve lehimleme etkileri, ölçüm bağlantı elemanları ve FR-4 malzemenin pratikteki dielektrik özelliklerindeki değişimlerden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 5.14: CPW beslemeli anten yapısına ait simülasyon ve ölçüm geri dönüş kaybı karakteristiklerinin karşılaştırılması

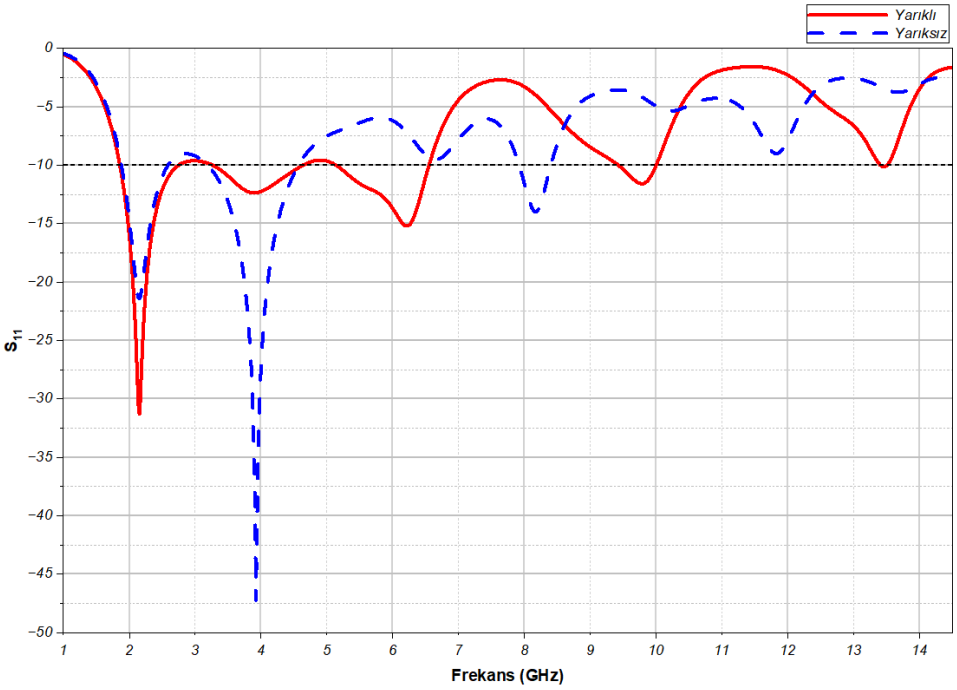
5.4 Mikroşerit Hat Beslemeli Düzlemsel UGB Monopol Anten Tasarımı

Bu bölümde, bir önceki bölümde CPW besleme yapısı ile tasarlanan düzlemsel monopol anten geometrisi referans alınarak mikroşerit beslemeli anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda antenin geometrik formu, temel boyutları ve tasarım parametreleri mümkün olduğunca sabit tutularak yalnızca besleme yöntemi değiştirilmiştir. Böylece aynı anten yapısında besleme tekniğindeki değişimin anten karakteristikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, CPW ve mikroşerit besleme yöntemleri arasındaki farklılıkların ortaya konulması ve hangi besleme yapısının daha uygun olduğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Tasarım sürecinde anten yapısı zaman bölgesi tam dalga elektromanyetik simülasyon yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Elde edilen nihai tasarımın prototipi üretilmiş, deneysel ölçümler gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları simülasyon verileri ile karşılaştırılarak mikroşerit beslemeli anten yapısı analiz edilmiştir.

5.4.1 Anten geometrisi

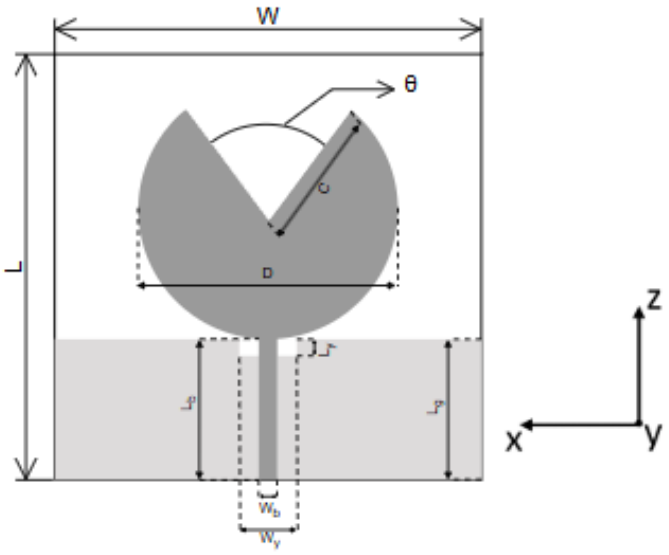
Mikroşerit beslemeli anten yapısında, önceki tasarımda kullanılan radyatör formu korunmuş ve besleme yapısı mikroşerit hat olarak yeniden düzenlenmiştir. Bu düzenlemede toprak düzlemi alt katmana taşınmış, besleme hattı ise üst katmanda radyatör ile aynı yüzeyde konumlandırılmıştır. Besleme hattı genişliği, kullanılan FR-4 alt tabakanın dielektrik katsayısı, kalınlığı ve hedeflenen 50 Ω karakteristik empedans değeri dikkate alınarak

belirlenmiştir. Başlangıç mikroşerit beslemeli yapıda elde edilen geri dönüş kaybı karakteristiğini iyileştirmek amacıyla, alt katmandaki toprak düzlemin üst orta kısmında ve besleme hattının arka bölgesine karşılık gelen konumda dikdörtgen bir yarık oluşturulmuştur. Bu yarığın boyutları optimize edilerek antenin empedans bant genişliği üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yarıklı ve yarıksız anten yapılarına ait geri dönüş kaybı sonuçları Şekil 5.15'te sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, dikdörtgen yarık eklenmesiyle antenin çalışma bandının genişlediği ve yaklaşık 1.95–6.5 GHz frekans aralığında geri dönüş kaybının −10 dB'nin altında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15: Yarıklı ve yarıksız mikroşerit beslemeli anten yapılarının geri dönüş kaybı sonuçları

Optimize edilmiş nihai mikroşerit beslemeli anten geometrisi Şekil 5.16'da, antene ait parametre değerleri ise Tablo 5.3'te sunulmaktadır.



Şekil 5.16: Nihai mikroşerit beslemeli düzlemsel monopol anten geometrisi

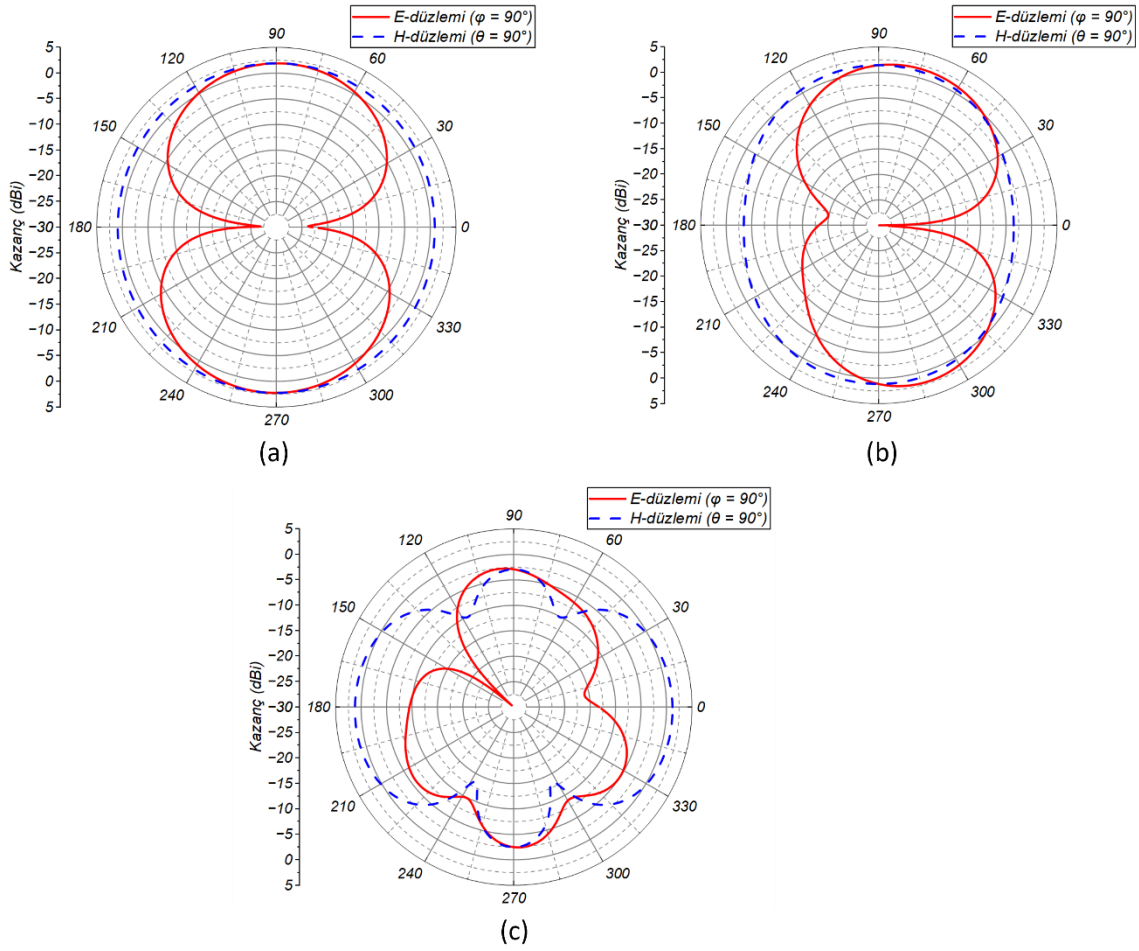
Tablo 5.3: Optimize edilmiş anten geometrisine ait parametre değerleri

Parametre	Değer (birim)
L	57 mm
W	57 mm
D	37 mm
C	18.5 mm
L_b	20 mm
W_b	3.1 mm
L_y	2 mm
W_y	8 mm
L_g	20mm
θ	80°

5.4.2 Kazanç ve ışıma örüntüsü analizi

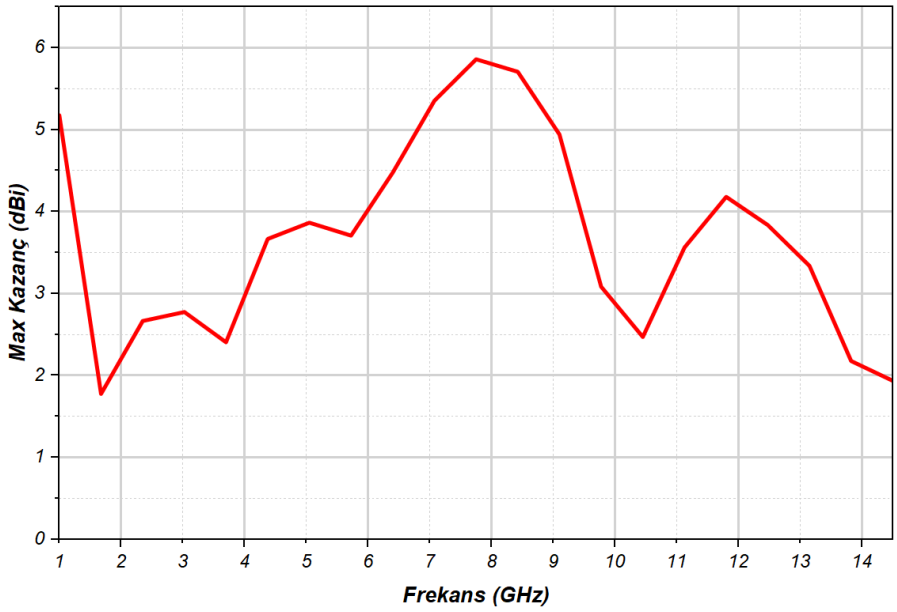
Mikroşerit beslemeli nihai anten geometrisinin ışıma karakteristiklerini değerlendirmek amacıyla 2 GHz, 4 GHz ve 6 GHz frekanslarında E ve H düzlemlerine ait ışıma örüntüleri incelenmiştir. Analizlerde kullanılan anten yerleşimi, Şekil 5.16'da verilen koordinat sistemine göre oluşturulmuştur. Elde edilen ışıma örüntüleri Şekil 5.17'de sunulmaktadır. Şekili incelendiğinde, 2 GHz frekansında antenin H düzleminde eş yönlü ışıma karakteristiğine yakın bir davranış sergilediği, E düzleminde ise monopol anten yapısına özgü sekiz benzeri ışıma davranışının elde edildiği görülmektedir. 4 GHz frekansında H düzlemindeki eş yönlü karakter büyük ölçüde korunmakla birlikte, E düzleminde belirli seviyede bozulmalar oluşmaya başlamıştır. 6 GHz frekansında ise özellikle E düzlemindeki örüntünün daha belirgin şekilde bozulduğu ve antenin ışıma davranışının düşük frekanslara

göre daha yönlü hale geldiği görülmektedir. Bu durum, frekans arttıkça anten üzerindeki akım dağılımının değişmesi ve mikroşerit besleme yapısının yüksek frekans bölgesindeki etkilerinin daha belirgin hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 5.17: Mikroşerit beslemeli nihai antenin farklı frekanslardaki E ve H düzlemlerine ait ışıma örüntüleri: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz

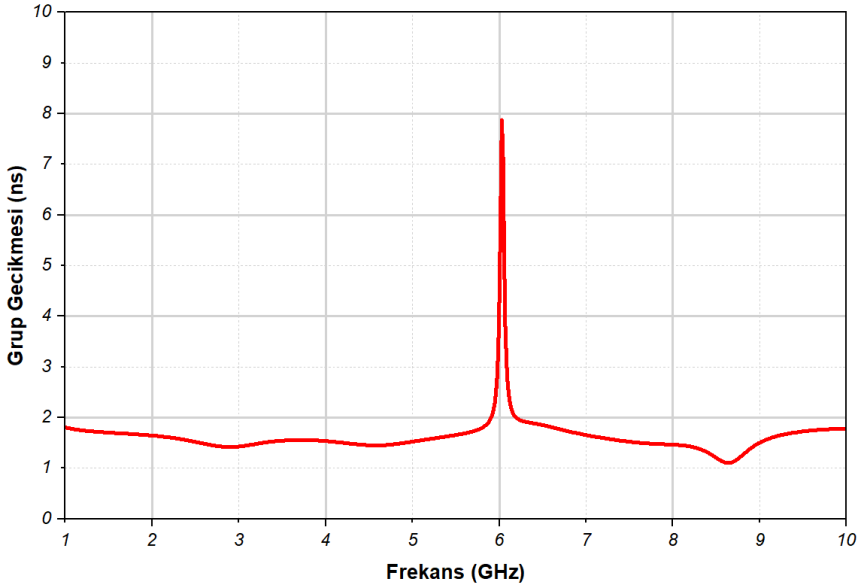
Antenin frekansa bağlı maksimum kazanç değişimi Şekil 5.18'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, maksimum kazancın frekansa bağlı olarak değiştiği ve yaklaşık 7–8 GHz civarında en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Çalışma bandı içinde kazanç değerlerinin genel olarak kabul edilebilir seviyelerde olduğu, ancak yüksek frekanslara doğru kazançta dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu değişim, ışıma örüntülerinde gözlenen bozulmalarla birlikte değerlendirildiğinde mikroşerit beslemeli yapının özellikle düşük ve orta frekanslarda daha kararlı bir ışıma davranışı sergilediğini göstermektedir.



Şekil 5.18: Mikroşerit beslemeli antenin frekansa bağlı maksimum kazanç değişimi

5.4.3 Grup gecikmesi analizi

Mikroşerit beslemeli anten yapısında grup gecikmesi, CPW beslemeli anten ile karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla aynı antenler arası mesafe kullanılarak elde edilmiştir. Bu kapsamda iki anten karşılıklı olarak 300 mm mesafede konumlandırılmış ve grup gecikmesi (S_{21}) parametresi üzerinden incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.19'de sunulmaktadır.

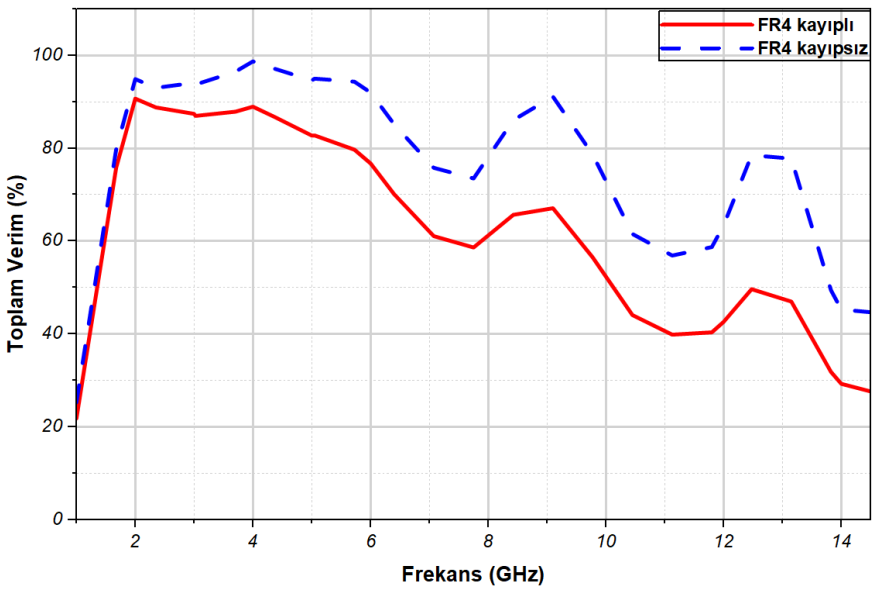


Şekil 5.19: Mikroşerit beslemeli anten yapısına ait frekansa bağlı grup gecikmesi karakteristiği

Şekil 5.19 incelendiğinde, grup gecikmesinin çalışma bandının büyük bölümünde yaklaşık 1.4–1.8 ns aralığında değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, 6 GHz civarında belirgin bir tepe oluştuğu ve grup gecikmesinin kısa süreli olarak yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, mikroşerit beslemeli anten yapısının üst frekans bölgesinde faz cevabının daha kararsız hale geldiğini göstermektedir. Özellikle 6 GHz civarındaki bu artış, antenin çalışma bandının üst sınırına yaklaşıldığında zaman bölgesi davranışında bozulmalar meydana geldiğini ortaya koymaktadır.

5.4.4 Işıma verimi analizi

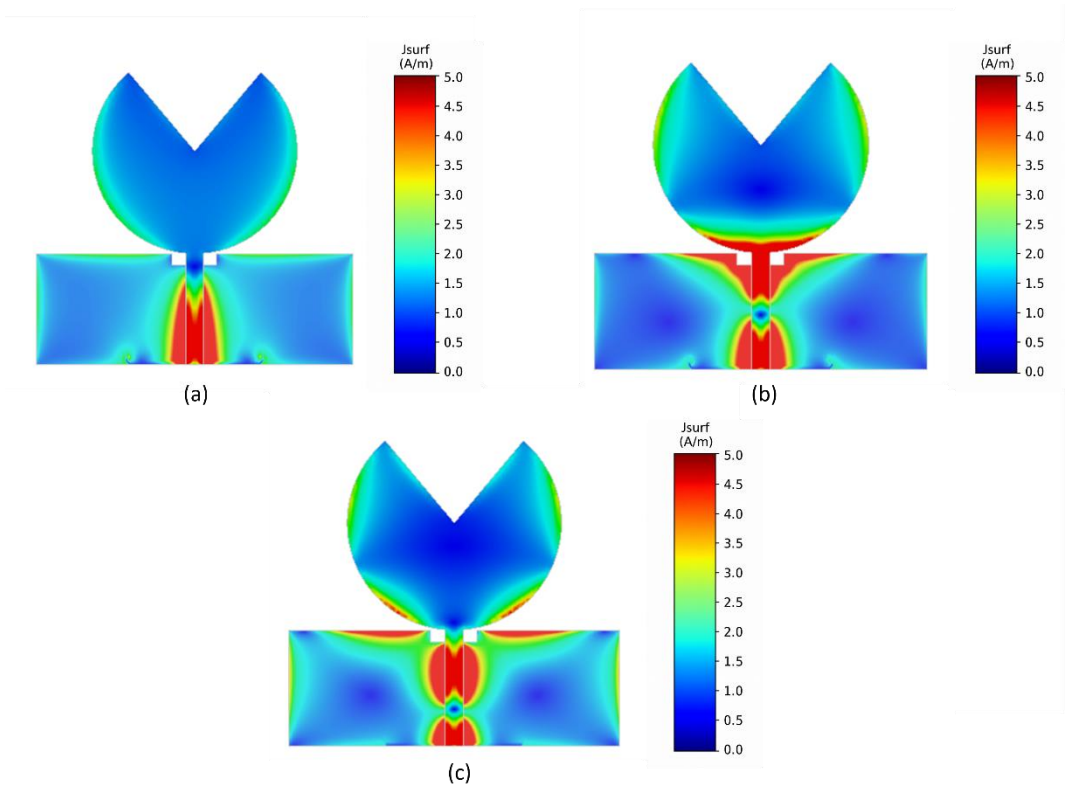
Mikroşerit beslemeli anten yapısının toplam verim karakteristiği, FR-4 alt tabakasının kayıplı ve kayıpsız durumları için Şekil 5.20'de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, kayıpsız FR-4 modeli için toplam verimin yaklaşık 2–6.5 GHz frekans aralığında %75–98 arasında değiştiği görülmektedir. Aynı frekans aralığında kayıplı FR-4 modeli için ise bu değer yaklaşık %60–90 aralığında kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar, dielektrik kayıpların anten davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle çalışma bandının üst frekanslarına doğru kayıplı FR-4 yapısında daha belirgin düşüşler gözlenirken, kayıpsız durumda daha kararlı bir karakteristik elde edilmektedir.



Şekil 5.20: Mikroşerit beslemeli anten yapısına ait frekansa bağlı toplam verim karakteristiği

5.4.5 Yüzey akım dağılımı analizi

Önerilen mikroşerit beslemeli anten yapısına ait yüzey akım dağılımları 2 GHz, 4 GHz ve 6 GHz frekansları için Şekil 5.21'de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, 2 GHz'de yüzey akımının ağırlıklı olarak besleme hattı ile radyatörün alt birleşim bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda antenin temel rezonans modunun baskın olduğunu göstermektedir. 4 GHz'de akım dağılımının radyatör yüzeyine ve toprak düzlemin kenar bölgelerine daha belirgin şekilde yayıldığı görülmekte olup, anten yapısının daha yüksek frekans modlarını uyarmaya başladığı anlaşılmaktadır. 6 GHz'de ise yüzey akım dağılımının daha karmaşık hale geldiği, hem radyatör hem de toprak düzlem üzerinde daha yaygın ve çok modlu bir dağılım sergilediği gözlemlenmektedir. Bu durum, frekans artışıyla birlikte antenin elektromanyetik davranışının değiştiğini ve üst frekans bölgesinde daha karmaşık rezonans modlarının oluştuğunu göstermektedir.

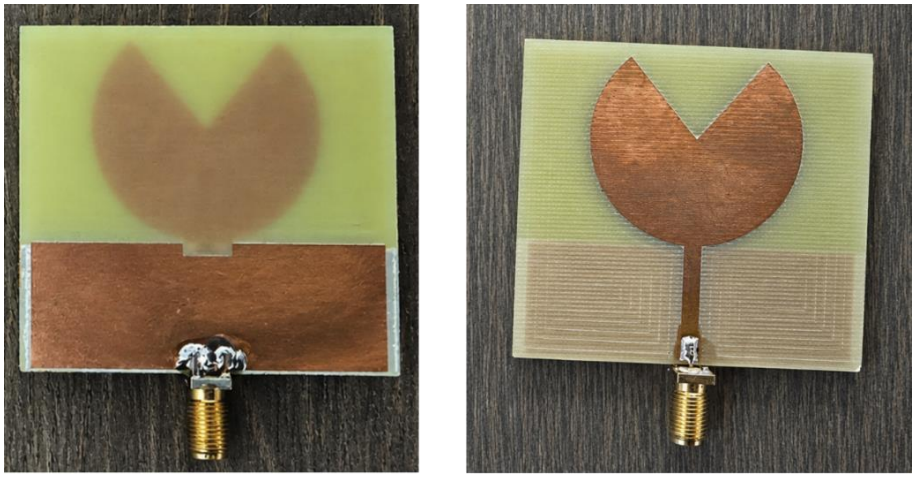


Şekil 5.21: Mikroşerit beslemeli düzlemsel monopol antenin farklı frekanslardaki yüzey akım dağılımları: (a) 2 GHz, (b) 4 GHz, (c) 6 GHz

5.4.6 Prototip üretimi ve deneysel ölçümler

Optimize edilen nihai mikroşerit beslemeli anten yapısının prototipi, FR-4 alt tabaka kullanılarak LPKF baskı devre üretim sistemi ile üretilmiştir. Antenin besleme bağlantısını sağlamak amacıyla SMA–PCB konnektörü antene lehimlenmiştir. Üretilen anten

prototipinin arka ve ön yüzey görünümleri sırasıyla Şekil 5.22(a) ve Şekil 5.22(b)'de sunulmaktadır.



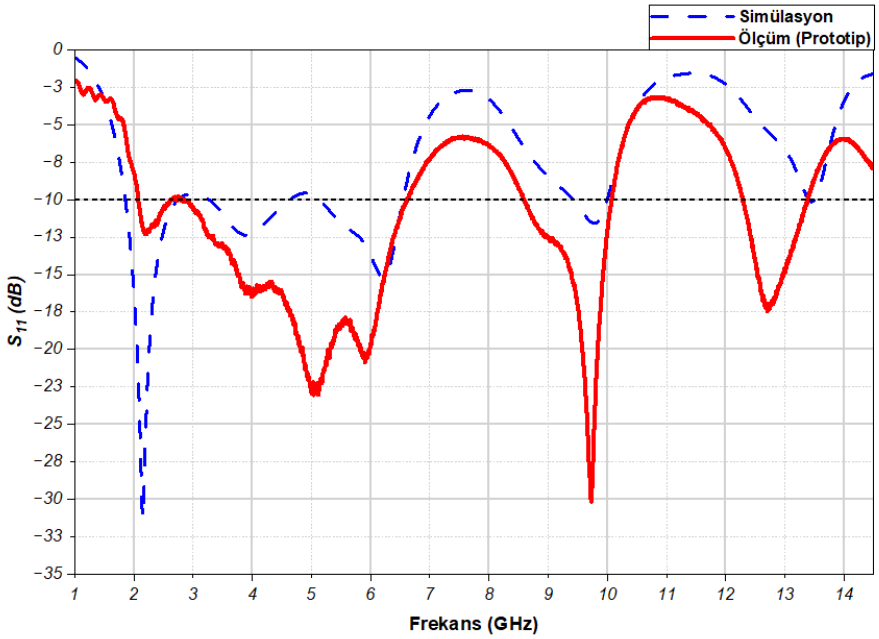
Şekil 5.22: Üretilen mikroşerit beslemeli düzlemsel monopol anten prototipinin fiziksel görünümleri: (a) arka yüzey, (b) ön yüzey

Deneysel geri dönüş kaybı ölçümleri, Saluki S5105D serisi 30 kHz–18 GHz vektör ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinde anten, ölçüm ortamındaki yansımaları azaltmak amacıyla absorber üzerine konumlandırılmış ve analizör ile anten arasındaki bağlantı uzatma kablosu kullanılarak sağlanmıştır. Ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla, kullanılan kablonun uç noktasında SMA kalibrasyon kiti ile kalibrasyon gerçekleştirilmiş ve ardından anten bağlantısı SMA erkek–erkek adaptör kullanılarak sağlanmıştır. Kurulan ölçüm düzeneği Şekil 5.23'te gösterilmektedir.



Şekil 5.23: Mikroşerit beslemeli antene ait ölçüm düzeneği

Simülasyon ve ölçüm sonuçlarına ait geri dönüş kaybı karakteristikleri Şekil 5.24'te karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, üretilen anten prototipinin yaklaşık 2–6.6 GHz frekans aralığında geri dönüş kaybının −10 dB'nin altında kaldığı görülmektedir. Ölçüm sonuçlarının simülasyon ile genel olarak benzer bir eğilim gösterdiği, ancak rezonans frekanslarında ve geri dönüş kaybı seviyelerinde belirli farklılıkların bulunduğu gözlemlenmektedir. Bu farklılıkların; üretim toleransları, lehimleme işlemi ile konnektör ve adaptör etkilerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Buna rağmen elde edilen ölçüm sonuçları, tasarlanan mikroşerit beslemeli anten yapısının hedeflenen çalışma bandını deneysel olarak doğruladığını göstermektedir



Şekil 5.24: Mikroşerit beslemeli anten yapısına ait simülasyon ve ölçüm geri dönüş kaybı karakteristiklerinin karşılaştırılması

5.5 Mikroşerit ve CPW Beslemeli Tasarımların Karşılaştırmalı Analizi

Bu bölümde, düzlemsel ultra geniş bant monopol anten yapısı iki farklı besleme yöntemi kullanılarak incelenmiş ve besleme tekniğinin anten karakteristikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlk olarak CPW beslemeli anten tasarımı gerçekleştirilmiş, ardından aynı radyatör geometrisi referans alınarak mikroşerit beslemeli anten yapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda geri dönüş kaybı, bant genişliği, ışıma örüntüsü, maksimum kazanç, grup gecikmesi, toplam verim ve yüzey akım dağılımı açısından detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her iki anten yapısının prototipi üretilerek simülasyon sonuçları deneysel ölçümler ile doğrulanmıştır.

CPW beslemeli anten yapısında yaklaşık 2.15–11.1 GHz frekans aralığında geri dönüş kaybının −10 dB'nin altında kaldığı görülmüş olup, bu yapı için yüzdesel bant genişliği yaklaşık %135 olarak hesaplanmıştır. Mikroşerit beslemeli anten yapısında ise geri dönüş kaybı yaklaşık 2–6.6 GHz frekans aralığında −10 dB'nin altında elde edilmiş ve yüzdesel bant genişliği yaklaşık %107 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, her iki besleme yöntemi ile geniş bantlı çalışma elde edilebildiğini göstermekle birlikte, CPW beslemeli yapının daha geniş bir frekans aralığında empedans uyumu sağladığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen ışıma örüntüleri incelendiğinde, CPW beslemeli antenin çalışma bandı boyunca daha kararlı bir ışıma karakteristiği sergilediği görülmüştür. Mikroşerit beslemeli yapıda ise özellikle üst frekans bölgesine yaklaşıldıkça ışıma örüntüsünde belirgin bozulmalar meydana gelmiş ve yaklaşık 6 GHz civarında yönlülük karakteristiğinde değişimler gözlemlenmiştir. Yüzey akım dağılımı analizlerinde, her iki anten yapısında da düşük frekanslarda akımın ağırlıklı olarak besleme hattı ile radyatör birleşim bölgesinde yoğunlaştığı, frekans arttıkça ise dağılımın daha karmaşık hale geldiği gözlemlenmiştir. Mikroşerit beslemeli yapıda üst frekans bölgesinde akım dağılımının daha düzensiz hale gelmesi, ışıma örüntüsünde ve grup gecikmesi karakteristiğinde gözlenen bozulmalar ile uyumlu bir davranış göstermektedir. Grup gecikmesi analizinde, CPW beslemeli antenin çalışma bandı boyunca daha kararlı bir değişim sergilediği görülürken, mikroşerit beslemeli yapıda yaklaşık 6 GHz civarında belirgin bir yükselme gözlemlenmiştir. Bu durum, mikroşerit beslemeli yapının üst frekans bölgesinde zaman bölgesi davranışının daha kararsız hale geldiğini göstermektedir. Toplam verim sonuçları incelendiğinde, her iki anten yapısında da FR-4 alt tabakanın kayıplı ve kayıpsız durumları değerlendirilmiş, kayıpsız durumda daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. Özellikle yüksek frekanslara doğru dielektrik kayıpların etkisinin daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Buna rağmen düşük maliyet, üretim kolaylığı ve yaygın bulunabilirlik gibi avantajları nedeniyle FR-4 alt tabaka bu çalışma kapsamında uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen CPW ve mikroşerit beslemeli düzlemsel UGB monopol antenlerin temel performans özellikleri Tablo 5.4'te karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, CPW beslemeli anten yapısının daha geniş bant aralığı, daha kararlı ışıma karakteristiği, daha dengeli grup gecikmesi davranışı ve üst frekans bölgesindeki daha stabil elektromanyetik yapısı nedeniyle mikroşerit beslemeli antene kıyasla ultra geniş bant uygulamaları açısından daha uygun bir çözüm sunduğu görülmüştür.

Tablo 5.4: Geliştirilen düzlemsel UGB monopol antenlerin temel performans özellikleri.

Tasarım	Frekans Aralığı (GHz)	Boyut (en × boy) [mm]	Besleme Türü	Max Kazanç (dbi)	Alt Tabaka Malzemesi	ε_r
CPW beslemeli anten	2.15 - 11.1	57 x 57	CPW	5.8	FR-4	4.3
Mikroşerit beslemeli anten	2 - 6.6	57 x 57	Mikroşerit	4.5	FR-4	4.3

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Elde Edilen Bulguların Özeti

Bu tez çalışmasında, UGB eş yönlü antenlerin tasarımı, karakterizasyonu ve performanslarının iyileştirilmesine yönelik üç farklı anten yapısı incelenmiştir. İlk olarak hibrit bikonik anten yapısı referans alınarak iki antenin dikey olarak konumlandırıldığı bir sistem oluşturulmuş ve antenler arası mesafenin izolasyon performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda farklı mesafe değerleri için yansıma katsayısı ve iletim katsayısı sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca üst antene ait besleme kablosunun alt anten içerisinden geçirilmesi ve her iki besleme kablosunun anten yapısı dışından yönlendirilmesi durumları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, besleme kablolarının anten dışından yönlendirildiği durumda izolasyon performansının daha iyi olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, dıştan kablo yönlendirme yaklaşımının uygulamada mekanik yerleşim ve taşıyıcı yapı açısından bazı zorluklar oluşturabileceği değerlendirilmiştir.

İkinci olarak, klasik diskon anten geometrisi esas alınarak referans bir anten modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu referans tasarım üzerinde farklı geometrik düzenlemeler uygulanarak iki yeni anten versiyonu geliştirilmiş ve toplam üç farklı diskon anten yapısının elektromanyetik performansları karşılaştırılmıştır. Yapılan parametrik analizler sonucunda en uygun performansı sağlayan nihai anten tasarımı belirlenmiştir. Nihai diskon anten tasarımında VSWR değerinin 0.87–2.64 GHz ve 3.42–10 GHz frekans aralıklarında 2.5'in altında kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, geliştirilen diskon anten yapısının geniş bantlı çalışma karakteristiği gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca nihai antenin prototipi üretilmiş ve simülasyon sonuçları deneysel ölçümler ile karşılaştırılarak tasarımın doğrulaması yapılmıştır.

Son olarak, düzlemsel UGB monopol anten tasarımı gerçekleştirilmiş ve mikroşerit besleme ile eş düzlemsel dalga kılavuzu (CPW) besleme yapılarının anten performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda CPW beslemeli yapının daha uygun empedans uyumu sağladığı görülmüş ve geliştirilen düzlemsel monopol antenin 2.15–11.1 GHz frekans aralığında yansıma katsayısının −10 dB'nin altında kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca antenin zaman alanındaki davranışını değerlendirmek amacıyla grup gecikmesi analizi gerçekleştirilmiş, bu analiz yalnızca simülasyon ortamında incelenmiştir.

Genel olarak elde edilen bulgular, besleme yapısı, geometrik düzenlemeler ve parametrik optimizasyon süreçlerinin UGB eş yönlü anten performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Bu tez kapsamında geliştirilen bikonik, diskon ve düzlemsel monopol anten yapıları; geniş bant empedans uyumu, izolasyon performansı ve uygulanabilir üretim özellikleri açısından değerlendirilmiş ve UGB eş yönlü anten tasarımlarına yönelik karşılaştırmalı bir yaklaşım sunulmuştur.

6.2 Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekte yapılabilecek araştırmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir.

İlk olarak, hibrit çift bikonik anten tasarımında koaksiyel besleme kablosunun oluşturduğu ortak mod akımları ve parazitik etkilerin anten performansı ile antenler arası izolasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda, ortak mod akımlarının bastırılmasına yönelik ferrit boncuklar, RF choke yapıları, akım balunları veya koaksiyel şok kılıfları (coaxial choke sleeve) gibi yöntemlerin uygulanmasıyla besleme hattından kaynaklanan istenmeyen etkilerin azaltılması ve izolasyon performansının daha da iyileştirilmesi araştırılabilir.

Diskon anten tasarımında gerçekleştirilen parametrik optimizasyonlar sonucunda geniş bant çalışma karakteristiği elde edilmesine rağmen, özellikle 2,57–3,25 GHz frekans aralığında gözlenen empedans uyumu bozulmalarının giderilmesine yönelik yeni geometrik yaklaşımlar geliştirilebilir. Ayrıca yüksek frekanslarda meydana gelen ışıma örüntüsü bozulmalarının azaltılmasına yönelik farklı radyatör geometrileri, besleme yapıları veya parasitik elemanlar kullanılarak anten performansının daha da geliştirilmesi mümkündür.

Düzlemsel UGB monopol anten tasarımında ise anten boyutlarının daha da küçültülmesine yönelik minyatürleştirme teknikleri uygulanabilir. Slot yapıları, meander hatlar, fraktal geometriler veya farklı alt tabaka malzemelerinin kullanılmasıyla antenin kompakt yapısı korunurken çalışma bant genişliği ve diğer elektromanyetik performans parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenebilir. Ayrıca farklı besleme teknikleri ve optimize edilmiş geometrik düzenlemeler kullanılarak mevcut tasarımın literatürde yer alan benzer UGB antenlerle performans açısından rekabet edebilecek seviyeye taşınması araştırılabilir.

Bunun yanı sıra, bu tez kapsamında geliştirilen anten tasarımlarının farklı alt tabaka malzemeleri, farklı üretim teknikleri ve çeşitli çalışma ortamlarında deneysel olarak incelenmesi, gerçek uygulama koşullarındaki performanslarının daha ayrıntılı değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca düzlemsel UGB monopol anten için bu tez kapsamında yalnızca simülasyon ortamında gerçekleştirilen grup gecikmesi analizinin deneysel ölçümlerle doğrulanması, antenin zaman alanındaki performansının daha kapsamlı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Özellikle yeni nesil kısa mesafeli haberleşme, hassas konum belirleme ve radar uygulamalarına yönelik gerçekleştirilecek çalışmalar, UGB anten teknolojilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunabilir.

7. KAYNAKLAR

Abdalqadir, L. and Sis, S.A. (2025). Geniş Bant İletişim Sistemleri için Çift Bikonik Anten Tasarımı ve Optimizasyonu, *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, 4(2), 161–169.

Abotalebi, S. (2023). *Ultra-Wideband UHF/VHF Electrically Small Antennas and Ultra-Wideband S-Band and C-Band Compact Form-Factor Antennas*, Master's Thesis, New Mexico State University, Graduate School, Las Cruces, New Mexico, 229.

Al-Husseini, M., Ramadan, A., Tawk, Y., El-Hajj, A., and Kabalan, K.Y. (2011). Design and Ground Plane Optimization of a CPW-Fed Ultra-Wideband Antenna, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 19(2), 243–250.

Allen, B., Dohler, M., Okon, E.E., Malik, W.Q., Brown, A.K., and Edwards, D.J. (Eds.) (2007). *Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 475.

Altuntaş, F. (2016). *Ultra Geniş Bant (UGB) Haberleşme Sistemleri için Mikroşerit Yama Anten Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 91.

Asthan, R.S. and Munir, A. (2023). Design and Realization of a Wideband Quadratic Wire-Shaped Discone Antenna, *2023 Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW)*, 132–135.

Aydın, E. (2019). *Microstrip Patch Antenna Design for Ultra-Wideband Communications*, Master's Thesis, Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Adana, 93.

Balanis, C.A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 1072.

Bobreshov, A.M., Zhabin, A.S., Seregina, E.A., and Uskov, G.K. (2020). Biconical Antenna With Inhomogeneous Dielectric Lens for UWB Applications, *Electronics Letters*, 56(17), 857–859.

Chen, A., Jiang, T., Chen, Z., Su, D., Wei, W., and Zhang, Y. (2011). A Wideband VHF/UHF Discone-Based Antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 450–453.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chen, K.-R., Sim, C.-Y.-D., and Row, J.-S. (2011). A compact monopole antenna for super wideband applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 488–491.

Cicchetti, R., Miozzi, E., and Testa, O. (2017). Wideband and UWB Antennas for Wireless Applications: A Comprehensive Review, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 2390808, 1–45.

Dey, S. and Karmakar, N.C. (2020). Design of novel super wide band antenna close to the fundamental dimension limit theory, *Scientific Reports*, 10, 16306.

Fazeli, M. and Smith, K.L. (2019). Design and Simulation of a Polygonal Discone Antenna for Simplified Fabrication and Reconfigurability, *IEEE AP-S 2019*, 1099–1100.

Federal Communications Commission (FCC). (2003). *2002 Biennial Regulatory Review—Review of the Commission's Broadcast Ownership Rules and Other Rules Adopted Pursuant to Section 202 of the Telecommunications Act of 1996: Report and Order and Notice of Proposed Rulemaking*, FCC 03-127, Washington, D.C., 258. https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-03-127A1.pdf (Erişim tarihi: 6 Temmuz 2026).

Galvan-Tejada, G.M., Peyrot-Solis, M.A., and Jardón-Aguilar, H. (2016). *Ultra Wideband Antennas: Design, Methodologies, and Performance*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 269.

Ghavami, M., Michael, L.B., and Kohno, R. (2007). *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 304.

Guo, L. (2009). *Study and Miniaturisation of Antennas for Ultra Wideband Communication Systems*, Ph.D. Thesis, University of London, School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary, United Kingdom, 180.

Huang, C.-Y. and Hsia, W.-C. (2005). Planar Elliptical Antenna for Ultra-Wideband Communications, *Electronics Letters*, 41(6), doi:10.1049/el:20057244.

International Telecommunication Union (ITU). (2012). *Isolation Between Antennas of IMT Base Stations in the Land Mobile Service*, Report ITU-R M.2244, Geneva, 61. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/r-rep-m.2244-2011-pdf-e.pdf (Erişim tarihi: 6 Temmuz 2026).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Islam, T., Alsaleem, F., Alsunaydih, F.N., and Alhassoon, K. (2023). Mutual Coupling Reduction in Compact MIMO Antenna Operating on 28 GHz by Using Novel Decoupling Structure, *Micromachines*, 14, 2065.

Januszkiewicz, L. and Hausman, S. (2004). Combined Spiral-Discone Broadband Antenna for Indoor Applications, *IEEE*, 422–426.

Jeong, H.-M., Park, S.-B., Kim, C.-W., Sodnomtseren, O., Bang, J.-H., and Ahn, B.-C. (2007). A Conical-Cylindrical Monopole Antenna, *Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, 7(3), 138–146.

Karamanoğlu, M. (2014). *Oldukça Geniş Bandlı Düzlemsel Monopol Antenlerin Tasarımları*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 91.

Kasi, B., Ping, L.C., and Chakrabarty, C.K. (2011). A Compact Microstrip Antenna for *Ultra Wideband* Applications, *European Journal of Scientific Research*, 67(1), 45–51.

Kim, J. and Park, S.-O. (2004). Novel Ultra-Wideband Discone Antenna, *Microwave and Optical Technology Letters*, 42(2), 113–115.

Kim, K.-H., Kim, J.-U., and Park, S.-O. (2005). An Ultrawide-Band Double Discone Antenna With the Tapered Cylindrical Wires, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(10), 3403–3406.

Kirtania, S.G., Younes, B.A., Hossain, A.R., Karacolak, T., and Sekhar, P.K. (2021). CPW-Fed Flexible Ultra-Wideband Antenna for IoT Applications, *Micromachines*, 12, 453.

Kraus, J.D. (1997). *Antennas, Second Edition*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 892.

Kumar, A. and Merugu, L. (2024). Ultra-Wideband Tx and Rx Discone Antenna for Multi-frequency Operation, *2024 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, doi:10.1109/MAPCON61407.2024.10923600.

Kumar, G., Mevada, P., Chakrabarty, S., and Mahajan, M.B. (2022). Ultrawide Band Cage Dipole Antenna for Ultra High Frequency Band Ground Penetrating Radar System, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32(6), e23139.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Li, G., Zhang, F., and Wang, B. (2024). Compact VHF/UHF Ultrawideband Discone Antenna with Consistent Pattern, *Sensors*, 24, 6147.

Li, Y., Li, W., Ye, Q., and Mittra, R. (2014). A survey of planar ultra-wideband antenna designs and their applications, *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT)*, 1, 1–16.

Liang, J. (2006). *Antenna Study and Design for Ultra Wideband Communication Applications*, Ph.D. Thesis, University of London, Department of Electronic Engineering, Queen Mary, United Kingdom, 180.

Licul, S. (2004). *Ultra-Wideband Antenna Characterization and Measurements*, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 164.

Lim, E.G., Wang, Z., Lei, C.-U., Wang, Y., and Man, K.L. (2010). *Ultra Wideband* Antennas – Past and Present, *IAENG International Journal of Computer Science*, 37(3), 304–314.

Liu, L., Cheung, S.W., Azim, R., and Islam, M.T. (2011). A Compact Circular-Ring Antenna for Ultra-Wideband Applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(10), 2283–2288.

Liu, W.-C. and Kao, P.-C. (2005). CPW-Fed Triangular Monopole Antenna for Ultra-Wideband Operation, *Microwave and Optical Technology Letters*, 47(6), 580–582.

Matin, M.A. (Ed.) (2021). *Wideband, Multiband, and Smart Antenna Systems*, Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 441.

Nail, J.J. (1953). Designing Discone Antennas, Electronics, August, 167–169.

Nikookar, H. and Prasad, R. (2009). *Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications*, Springer Science+Business Media B.V., 188.

Oh, S.-S., Kim, I.-R., Choi, D.-G., and Park, W.-K. (2016). Design and Parametric Study on Discone Antenna for Broadband RF Test Chamber, *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, 9(6), 534–538, doi:10.17661/jkiiect.2016.9.6.534.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Okorogu, V.N., Onoh, G.N., Nwalozie, G.C., and Onyishi, D.U. (2013). Antenna Isolation Technique for Interference Reduction in a Co-Site System, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(7), 2859–2869.

Oppermann, I., Hämäläinen, M., and Iinatti, J. (Eds.) (2004). *UWB Theory and Applications*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 223.

Park, S. and Jung, K.-Y. (2022). Novel Compact UWB Planar Monopole Antenna Using a Ribbon-Shaped Slot, *IEEE Access*, 10, 61951–61959.

Powell, J. (2004). *Antenna Design for Ultra Wideband Radio*, Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, 109.

Quintero Díaz de León, G. (2010). *Analysis and Design of Ultra-Wideband Antennas in the Spectral and Temporal Domains*, Ph.D. Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculty of Engineering Science and Technology, Lausanne, Switzerland, 127.

Rahim, T. and Xu, J. (2017). An extremely wideband radome-enclosed cylindrical dipole antenna for wireless communication, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(2), 1404–1411.

Ranga, Y. (2011). *Antennas for Ultra-Wideband Systems*, Ph.D. Thesis, Macquarie University, Department of Electronic Engineering, Faculty of Science, Sydney, Australia, 225.

Rathore, S., Paulus, R., Jaiswal, A.K., and Agrawal, A. (2015). Ultra-Wideband Antenna for WLAN, WiMAX and LTE Applications, *International Journal of Computer Applications*, 121(7), 27–30

Saha, C., Siddiqui, J.Y., and Antar, Y.M.M. (2019). *Multifunctional Ultrawideband Antennas: Trends, Techniques and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 240.

SaiRam, C., Vakula, D., and Chakravarthy, M. (2018). Design of Compact Broadband Omnidirectional Canonical Sleeve Antenna Covering UHF Band, *Advanced Electromagnetics*, 7(2), 53–59.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Sai Ram, C., Vakula, D., and Chakravarthy, M. (2019). Design of Broadband Compact Canonical Tetra Sleeve Cage Antenna Covering UHF Band, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 85, 81–89.

Shahid, I., Hussain, F., Burki, J., and Arif, M.S. (2016). An Ultrawideband Inverted Double Discone Antenna With 150:1 Impedance Bandwidth, *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(1), 181–184.

Stutzman, W.L. and Thiele, G.A. (1981). *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 598.

Tran, D., Aubry, P., Szilagyi, A., Lager, I.E., Yarovyi, O., and Ligthart, L.P. (2010). On the Design of a Super Wide Band Antenna, in *Ultra Wideband*, Lembrikov, B. (Ed.), InTech, Rijeka, 399–426.

Tripathi, S., Mohan, A., and Yadav, S. (2014). Hexagonal Fractal Ultra-Wideband Antenna Using Koch Geometry with Bandwidth Enhancement, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 8(15), 1445–1450.

Uwiringiyimana, J.P., Khayam, U., Suwarno, and Montanari, G.C. (2022). Design and Implementation of Ultra-Wide Band Antenna for Partial Discharge Detection in High Voltage Power Equipment, *IEEE Access*, 10, 10983–10994.

Verma, H., Teotia, R., Rai, R. and Gautam, R. *"Basic Properties and Design Principles of Ultra Wideband Antennas"*, 1–7, https://www.academia.edu/6711583/Basic_Properties_and_Design_Principles_of_Ultra_Wideband_Antennas (Erişim tarihi: 6 Temmuz 2026).

Volakis, J.L. (Ed.) (2007). *Antenna Engineering Handbook*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1755.

Wang, Y., Liang, Z., Li, Y., and Zheng, S. (2025). Ultrawideband Tree-Like Biconical Antenna With Radiation Null Mitigation for Stable Gain and Radiation Pattern, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 24(7), 1929–1933.

Wiesbeck, W., Adamiuk, G., and Sturm, C. (2009). Basic Properties and Design Principles of UWB Antennas, *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 372–385.

Yang, C., Guo, Q., and Huang, K. (2010). Miniature Omni-Directional Ultra-Wideband Antenna, *ICMMT 2010 Proceedings*, 969–971.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yannopoulou, N.I., Zimourtopoulos, P.E., and Sarris, E.T. (2013). All-Band 2G+3G Radial Disc-Cone Antennas: Design, Construction and Measurements, *Funktechnikplus Journal*, 1(1), 7–15.

Zhang, M. and Chu, H. (2022). Broadband Omnidirectional Stacked Biconical Antenna with Gain Enhancement Based on a Gradient Structure, *Proceedings of the 2022 Asia-Pacific Microwave Conference*, 318–320.

Zhao, Y. and Wang, W. (2014). Design of a Novel Broadband Skeletal Discone Antenna with a Compact Configuration, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 1725–1728.

Zhekov, S.S., Tatomirescu, A., Franek, O., and Pedersen, G.F. (2016). Design of a Quasi-Hemispherical UWB Antenna, *IEEE*, 270–273.

Zhekov, S.S., Tatomirescu, A., and Pedersen, G.F. (2017). Antenna for Ultrawideband Channel Sounding, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 692–695.

Zheng, C., Ge, Y., and Guo, A. (2023). *Ultra-Wideband Technology: Characteristcs, Applications and Challenges*, arXiv preprint arXiv:2307.13066, 11.

Zhou, F., Gao, Y.-G., Rao, A., Shi, D., Shen, Y.-M., Zhang, Y.-Y., and Meng, A.-L. (2014). Distance Boundary of Antenna Isolation Calculation in Engineering, *IEEE*, 1–4.