



**6 GHZ ALTINDA 5G BAZ İSTASYONLARI İÇİN ÇİFT KUTUPLU
ANTİSİMETRİK YARIK KUPLAJLI YAMA ANTEN TASARIMI**

Burak UZMAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burak UZMAN

02/08/2024

6 GHZ ALTINDA 5G BAZ İSTASYONLARI İÇİN ÇİFT KUTUPLU ANTİSİMETRİK YARIK KUPLAJLI YAMA ANTEN TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak UZMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında, 6 GHz altında 5G baz istasyonları için ekonomik, çift kutuplu ($\pm 45^\circ$ doğrusal), düşük profilli ve geniş bantlı (3.3 GHz – 4.2 GHz) açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama anten tasarımı sunulmuştur. Hedeflenen antenin temel teknik istekleri; geri dönüş kayıpları, $S_{11}, S_{22} < -15$ dB, portlar arası izolasyonları $S_{12} = S_{21} < -30$ dB, yarım güç hüzmeye genişlikleri, $HPBW = 65^\circ \pm 5^\circ$, ön - arka ışın oranı, $FBR > 20$ dB ve çapraz kutup ayrışımı, $XPD > 15$ dB olarak hedeflenmiştir. Anten tasarımının başlangıcında, farklı şekillerdeki yarık geometrileri benzetim ortamında tasarlanarak performansları incelenmiş ve en iyi performansa sahip H şekilli yarık geometrisi seçilmiştir. Farklı yarık geometrilerinin analizinden sonra, ilk H şekilli yarığın boyutlandırılması ve anten üzerinde konumlandırılması ardından da ikinci H şekilli yarığın boyutlandırılması, ilk H şekilli yarığa göre ve anten üzerinde konumlandırılması yapılmıştır. Hedeflenen temel teknik istekler referans alınarak doğru boyutlar seçilmiş ve konumlandırma yapılmıştır. Bu parametrik çalışmanın ardından ise, antenin toprak düzleminin boyutlarının, açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenin en büyük problemlerinden biri olan geriye doğru yansımaya olan etkileri benzetim ortamında incelenmiştir. Hedeflenen temel teknik istekler sağlandıktan sonra benzetim ortamında anten tasarımı tamamlanmış ve önerilen antenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, bu çalışmada önerilen açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenin, benzetimleri ve prototip anten üzerinde geri dönüş kaybı, portlar arası izolasyonu ve yarım güç hüzmeye genişliği gibi ölçümleri yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetimler ve ölçüm sonuçları uyumlu olup, önerilen anten elemanının hedeflenen teknik istekleri sağlayarak 5G baz istasyonları için uygun olduğu doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 93415
Anahtar Kelimeler : 5G, çift kutuplu, yarık kuplaj, geniş bant, yama anten
Sayfa Adedi : 71
Danışman : Prof. Dr. Mehmet ÇİYDEM

DESIGN OF A DUAL POLARIZED ANTISYMMETRIC SLOT COUPLED PATCH
ANTENNA FOR SUB – 6 GHZ 5G BASE STATIONS

(M. Sc. Thesis)

Burak UZMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2024

ABSTRACT

In this thesis, a cost-effective, dual-polarized ($\pm 45^\circ$ linear), low-profile, and wideband (3.3 GHz – 4.2 GHz) aperture coupled slot coupled patch antenna design for sub - 6 GHz 5G base stations is presented. The primary technical specifications targeted for the antenna design include return losses, $S_{11}, S_{22} < -15$ dB, port-to-port isolation $S_{12} = S_{21} < -30$ dB, half-power beamwidths, $HPBW = 65^\circ \pm 5^\circ$, front-to-back ratio, $FBR > 20$ dB, and cross-polarization discrimination, $XPD > 15$ dB. At the beginning of the antenna design, different slot geometries were simulated, and their performances were examined, resulting in the selection of the H-shaped slot geometry, which exhibited the best performance. Following the analysis of different slot geometries, the dimensions and placement of the first H-shaped slot on the antenna were determined. Subsequently, the dimensions and placement of the second H-shaped slot, relative to the first slot and on the antenna, were established. Accurate dimensions and positioning were chosen based on the targeted primary technical specifications. After this parametric study, the effects of the ground plane dimensions on the backward reflection, one of the main problems of the aperture-fed slot-coupled patch antenna, were investigated in the simulation environment. Once the targeted primary technical specifications were met, the antenna design was completed in the simulation environment, and the proposed antenna was fabricated. Finally, the proposed aperture coupled slot coupled patch antenna's performance, including return loss, port-to-port isolation, and half-power beamwidth, was measured on the prototype antenna and compared with the simulation results. The simulations and measurement results were consistent, confirming that the proposed antenna element meets the targeted technical specifications and is suitable for 5G base stations.

Science Code : 93415

Key Words : 5G, dual polarized, slot coupled, wideband, patch antenna

Page Number : 71

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet ÇİYDEM

TEŞEKKÜR

Öncelikle, sahibi olduğu Engitek Mühendislik firmasında yanında stajyerlikten Ar-Ge müdürlüğüne kadar olan yolculuğumda benden hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, bu tez çalışmasında kıymetli bilgilerini benimle paylaşan ve benim için her zaman “Baba” gibi olacak değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ÇİYDEM’e, bu tez çalışmamda tasarlamış olduğum antenin üretiminde büyük emekleri olan Engitek Mühendislik teknik personel müdürü Sayın Erdinç YURDAKUL’a, hayatım boyunca benden desteklerini, güvenlerini, maddi manevi yardımlarını hiçbir şekilde esirgemedikleri için kardeşim Barış’a, annem Zeynep’e, babam Mehmet Ali’ye ve bütün aileme, son olarak bu çalışma boyunca beni dimdik ayakta tutan, çalışma yoğunluğumdan dolayı kendisini ihmal etmeme rağmen bana katlanan ve her koşulda beni seven sevgili eşim İrem’e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... | x |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... | xi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xiv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. TEMEL ANTEN PARAMETRELERİ..... | 5 |
| 2.1. Işıma Örüntüsü | 7 |
| 2.1.1. Yarım güç hüzme genişliği | 9 |
| 2.1.2. Ön – arka ışım oranı..... | 9 |
| 2.1.3. Çapraz kutup ayrışımı..... | 10 |
| 2.1.4. Alan bölgeleri..... | 10 |
| 2.2. Işıma Güç Yoğunluğu | 12 |
| 2.3. Işıma Şiddeti | 12 |
| 2.4. Yönlülük..... | 13 |
| 2.5. Verim..... | 13 |
| 2.6. Kazanç..... | 13 |
| 2.7. Polarizasyon..... | 14 |
| 2.7.1. Polarizasyon kaybı | 15 |
| 2.7.2. Polarizasyon verimi..... | 16 |
| 2.8. Yansıma Katsayısı ve Duran Dalga Oranı | 16 |

| | Sayfa |
|---|--------------|
| 2.9. Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri) | 17 |
| 2.9.1. Geri dönüş kaybı | 19 |
| 2.9.2. Portlar arası izolasyon | 20 |
| 2.9.3. Araya girme kaybı..... | 20 |
| 3. MİKROŞERİT YAMA ANTEN | 23 |
| 3.1. Mikroşerit Yama Antenlerin Tarihçesi | 23 |
| 3.2. Mikroşerit Yama Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları..... | 24 |
| 3.3. Mikroşerit Yama Antenlerin Teknik Özellikleri/Çalışma Prensipleri..... | 25 |
| 3.4. Mikroşerit Yama Antenlerin Besleme Teknikleri | 27 |
| 3.4.1. Mikroşerit hat ile besleme | 27 |
| 3.4.2. Koaksiyel prob ile besleme | 28 |
| 3.4.3. L-prob ile besleme..... | 29 |
| 3.4.4. Yakınlık ile besleme..... | 30 |
| 3.4.5. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile besleme | 31 |
| 3.5. Mikroşerit Yama Anten Tasarımında Kullanılan Dielektrik Malzemeler | 33 |
| 4. MOBİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN EVRİMİ | 35 |
| 4.1. Birinci Nesil (1G) Haberleşme ve Baz İstasyonları | 35 |
| 4.2. İkinci Nesil (2G) Haberleşme ve Baz İstasyonları | 35 |
| 4.3. Üçüncü Nesil (3G) Haberleşme ve Baz İstasyonları..... | 36 |
| 4.4. Dördüncü Nesil (4G) Haberleşme ve Baz İstasyonları | 36 |
| 4.5. Beşinci Nesil (5G) Haberleşme ve Baz İstasyonları | 37 |
| 4.5.1. 5G baz istasyonu antenlerinde olması gereken ve hedeflenen teknik isterler..... | 39 |
| 5. ANTEN TASARIMI, BENZETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI | 41 |
| 5.1. Farklı Yarık Geometrilerinin Anten Performansına Etkileri | 41 |

| | Sayfa |
|---|--------------|
| 5.2. Anten ve Yarık Geometrisi Tasarımı | 42 |
| 5.3. Birinci Yarığın Anten Üzerinde Konumlandırılması | 44 |
| 5.4. Birinci Yarığın Boyutlandırılması | 45 |
| 5.4.1. Birinci yarık genişliği | 46 |
| 5.4.2. Birinci yarık uzunluğu | 46 |
| 5.4.3. Birinci yarık kulak genişliği | 47 |
| 5.4.4. Birinci yarık kulak uzunluğu | 48 |
| 5.4.5. Birinci koçan uzunluğu | 49 |
| 5.5. İkinci Yarığın Anten Üzerinde Konumlandırılması | 49 |
| 5.6. İkinci Yarığın Boyutlandırılması | 52 |
| 5.6.1. İkinci yarık genişliği | 52 |
| 5.6.2. İkinci yarık uzunluğu | 53 |
| 5.6.3. İkinci yarık kulak genişliği | 55 |
| 5.6.4. İkinci yarık kulak uzunluğu | 56 |
| 5.6.5. İkinci koçan uzunluğu | 57 |
| 5.7. Toprak Düzlem Boyutlarının Geriye Doğru Yansımaya Etkisi | 58 |
| 6. ÖNERİLEN ANTENİN ÜRETİMİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI | 61 |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER | 65 |
| KAYNAKLAR | 67 |
| ÖZGEÇMİŞ | 71 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 2.1. Maxwell denklemleri | 6 |
| Çizelge 2.2. Geri dönüş kaybının yansıma katsayısı ve duran dalga oranına dönüşümü ... | 20 |
| Çizelge 3.1. RF tasarımda kullanılan dielektrik malzemeler ve parametreleri | 33 |
| Çizelge 4.1. 4G öncesi Türkiye'deki operatörlerin frekans spektrumları | 37 |
| Çizelge 4.2. 4G sonrası Türkiye'deki operatörlerin frekans spektrumları | 37 |
| Çizelge 4.3. Türkiye ve küreselde 6 GHz altı 5G frekans bantları | 38 |
| Çizelge 4.4. Türkiye ve küreselde baz istasyonu antenleri için teknik isterler | 39 |
| Çizelge 5.1. Önerilen açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenin değer aralıkları | 44 |
| Çizelge 6.1. Önerilen çalışmanın benzer çalışmalar ile karşılaştırması | 64 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 2.1. Alıcı ve verici modundaki bir antenin iletim hattı Thevenin eşdeğeri | 5 |
| Şekil 2.2. Bir antenin ışınma örüntüsü..... | 7 |
| Şekil 2.3. Bir antenin alan bölgeleri..... | 10 |
| Şekil 2.4. Polarizasyon birim vektörleri ve açısı | 16 |
| Şekil 2.5. S-parametreleri | 18 |
| Şekil 3.1. Farklı yama anten geometrileri..... | 25 |
| Şekil 3.2. Dikdörtgen bir yama antenin üst ve yan görünümü..... | 26 |
| Şekil 3.3. Mikroşerit hat ile beslenen yama anten | 28 |
| Şekil 3.4. Koaksiyel prob ile beslenen yama anten | 28 |
| Şekil 3.5. L-prob ile beslenen askıda yama anten..... | 29 |
| Şekil 3.6. L-prob ile beslenen metal duvarlı askıda yama anten | 30 |
| Şekil 3.7. Yakınlık bağlantı ile beslenen yama anten | 30 |
| Şekil 3.8. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile beslenen yama anten..... | 31 |
| Şekil 3.9. Farklı yarık geometrileri, (a) ince dikdörtgen, (b) daha uzun ve ince dikdörtgen, (c) kalın dikdörtgen, (d) H şekilli, (e) papyon şekilli ve (f) kum saati şekilli | 32 |
| Şekil 4.1. Baz istasyonlarının gelişimi..... | 35 |
| Şekil 5.1. Farklı yarık geometrilerinin benzetim ortamında modellenmesi..... | 41 |
| Şekil 5.2. Farklı yarık geometrilerinin geri dönüş kaybı | 42 |
| Şekil 5.3. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama anten geometrik yapısının (a) üst görünümü, (b) yama ve yarıklar, (c) yan görünümü..... | 45 |
| Şekil 5.4. Birinci yarığın x - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi ... | 45 |
| Şekil 5.5. Birinci yarığın y - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi ... | 45 |

| Şekil | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 5.6. Birinci yarık genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi | 46 |
| Şekil 5.7. Birinci yarık uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi | 47 |
| Şekil 5.8. Birinci yarık kulak genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi | 47 |
| Şekil 5.9. Birinci yarık kulak uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi | 48 |
| Şekil 5.10. Birinci koçan uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi..... | 49 |
| Şekil 5.11. İkinci yarığın x - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi... | 50 |
| Şekil 5.12. İkinci yarığın x - ekseninde antene uzaklığının portlar arası izolasyona etkisi | 50 |
| Şekil 5.13. İkinci yarığın y - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi... | 51 |
| Şekil 5.14. İkinci yarığın y - ekseninde antene uzaklığının portlar arası izolasyona etkisi | 51 |
| Şekil 5.15. İkinci yarık genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi | 52 |
| Şekil 5.16. İkinci yarık genişliğinin portlar arası izolasyona etkisi | 53 |
| Şekil 5.17. İkinci yarık uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi | 54 |
| Şekil 5.18. İkinci yarık uzunluğunun portlar arası izolasyona etkisi | 54 |
| Şekil 5.19. İkinci yarık kulak genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi | 55 |
| Şekil 5.20. İkinci yarık kulak genişliğinin portlar arası izolasyona etkisi | 55 |
| Şekil 5.21. İkinci yarık kulak uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi | 56 |
| Şekil 5.22. İkinci yarık kulak uzunluğunun portlar arası izolasyona etkisi | 56 |
| Şekil 5.23. İkinci koçan uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi..... | 57 |
| Şekil 5.24. İkinci koçan uzunluğunun portlar arası izolasyona etkisi..... | 57 |
| Şekil 5.25. Farklı toprak düzlem boyutlarında birinci yarık üzerindeki akım yoğunluğu | 58 |
| Şekil 5.26. Farklı toprak düzlem boyutlarının portlar arası izolasyona etkisi | 59 |

| Şekil | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 5.27. Farklı toprak düzlem boyutlarının yarım güç hüzme genişliğine etkisi | 59 |
| Şekil 6.1. Prototip anten..... | 61 |
| Şekil 6.2. Önerilen antenin benzetim ve üretim S parametre sonuçları (a) geri dönüş kaybı, (b) portlar arası izolasyonu | 62 |
| Şekil 6.3. Üretimi yapılan antenin dikey ve yatay eksenlerde yankısız oda ölçümleri (a) dikey eksen, (b) yatay eksen..... | 62 |
| Şekil 6.4. Üretimi yapılan antenin kazanç ölçümü..... | 63 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

| | |
|----------------------|-----------|
| m³ | metre küp |
| dB | Desibel |
| Hz | Hertz |
| MHz | Megahertz |
| GHz | Gigahertz |
| m² | Metrekare |
| V | Volt |
| A | Ampere |

Kısaltmalar

Açıklamalar

| | |
|---------------|---|
| ABD | Amerika Birleşik Devletleri |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| FBR | Front to Back Ratio |
| GPS | Global Positioning System |
| GSM | Global System for Mobile Communication |
| HD | High Definition |
| HPBW | Half Power Beam Width |
| HSPA | High Speed Packet Access |
| IoT | Internet of Things |
| IS-136 | Interim Standard 136 |
| LTE | Long Term Evolution |
| MIMO | Multi Input Multi Output |
| MMIC | Monolithic Microwave Integrated Circuit |
| MMS | Multimedia Messaging Service |
| PCB | Printed Circuit Board |
| PLF | Polarization Loss Factor |

Kısaltmalar**RF****RFIC****SMS****UMTS****Wi-Fi****WiMAX****WLAN****XPD****Açıklamalar**

Radio Frequency

Radio Frequency Integrated Circuit

Short Message Service

Universal Mobile Telecommunication System

Wireless Fidelity

Worldwide Interoperability for Microwave Access

Wireless Local Area Network

Cross Polar Discrimination

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşmenin gelişimi, teknoloji tarihinin en önemli başarılarından biridir ve bu alandaki ilerlemeler büyük ölçüde anten mühendisliğinin evrimi sayesinde. Anten; belirli frekanslarda haberleşme için hem alıcı hem de verici olarak kullanılabilen yani elektromanyetik dalgaları gönderen ve alan cihazlara denir. Anten mühendisliğinin başlangıcı, 1873 yılında yayımladığı “Electricity and Magnetism” isimli eseri ile elektromanyetik dalgaların varlığını ve bu dalgaların boşlukta ışık hızıyla yayılma özelliğini keşfeden James Clerk Maxwell’e dayanmaktadır [1]. Maxwell’in çalışmaları, kablosuz haberleşme teknolojilerinin teorik temellerini atmış ve bu alanda yapılacak olan deneysel çalışmalar için öncü olmuştur.

Maxwell’in ortaya koyduğu teorilerin deneysel çalışmaları ilk olarak 1880’lerde Heinrich Hertz tarafından gerçekleştirilmiştir. Hertz, Maxwell’in denklemlerini kullanarak, açık hava koşullarında parazitik olmayan bir dipol anten kullanarak elektromanyetik dalgaların üretilebileceğini ve algılanabileceğini göstererek elektromanyetik dalgaların varlığını kanıtlamıştır. Hertz’in yapmış olduğu bu çalışmalar, anten mühendisliğinin evrimi ve gelecekteki kablosuz haberleşme çalışmaları için referans olmuştur [2].

20. yüzyılın başlarında, Guglielmo Marconi, anten tasarımındaki yenilikleri ile kablosuz haberleşmeye yeni bir boyut katmıştır. 1901 yılında gönderdiği radyo frekans (Radio Frequency – RF) sinyal ile Atlas okyanusunu aşan Marconi, kablosuz haberleşmeye uluslararası bir ün kazandırmıştır [3]. Marconi’nin yapmış olduğu çalışmalar kablosuz haberleşmenin ticari ve pratik uygulamalarını geliştirme açısından oldukça önemli bir yerdedir.

İkinci dünya savaşı sırasında geliştirilen radar teknolojisiyle anten mühendisliğindeki gelişmeler hız kazanmıştır [4]. Bu dönemde, radar sistemlerinde çok yönlü ve yüksek kazançlı antenler geliştirilmiştir. Radar sistemleri, mikrodalga frekanslarda anten tasarımlarını ortaya çıkarmış ve gelecekteki uydu, mobil telefonlar ve Wi-Fi gibi sistemlerin gelişimine referans olmuştur.

Anten mühendisliğinin gelişimi, dijital ve bilgi çağlarının başlangıçları ile yeni zorluklarla karşılaşmıştır. 1990'lar ve 2000'lerde cep telefonları, kablosuz internet gibi sistemler, antenlerin çok daha küçük, daha verimli, geniş veya çok bantlı olmasını gerektirdi. Bu dönemde, daha fazla anten kullanarak verimliliği artırma çalışmaları çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple Input Multiple Output – MIMO) gibi teknolojiler ile mümkün olmuştur. MIMO ile verimliliği artırma çalışmaları, mobil ve kablosuz haberleşme sistemlerindeki kapasiteyi büyük ölçüde artırmıştır [5].

Günümüzde, anten mühendisliği yeni nesil kablosuz iletişim teknolojileri, özellikle 5G ve ötesini destekleyecek şekilde sürekli gelişmektedir [6]. Antenler, daha yüksek verimlilik ve kazanç sunmanın yanı sıra, çevresel etkenleri daha iyi kavrayabilmek için artık akıllı ve adaptif özelliklere de sahiptir. Kablosuz haberleşmenin geçmişi, anten mühendisliğinin yalnızca teknik bir alan olmadığını, aynı zamanda sosyal ve ekonomik değişimlere yön veren önemli bir etken olduğunu göstermektedir.

Mikroşerit yama, tek kutup (monopole), çift kutup (dipole), huni (cone), döngü (loop), açıklık (aperture) ve Yagi-Uda gibi birçok anten çeşidi vardır. Kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişimi ile yüksek kanal kapasiteli, bağlantı güvenilirliği, kolay montajlı, küçük boyutlu ve polarizasyon çeşitliliğine sahip antenlerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Özellikle yüksek kanal kapasitesi, bağlantı güvenilirliği sağlanması için şehir merkezleri ve kırsal alanlarda tek polarizasyon yerine çift polarizasyona sahip antenlerin kullanılması önerilmiştir [7]. Çift polarizasyon, iletişim sistemlerinde kullanılan antenlerin düşük profilli ve yüksek kazançlı olmalarına da olanak sağlamaktadır. Kısacası; çift polarizasyon, tek polarizasyona göre daha fazla sayıda kanala ve gelişmiş kanal kapasitesine sahiptir. Çift polarizasyon özellikle 6 GHz altı ve milimetre dalga (mmwave) 5G baz istasyonları için çoklu MIMO sistemlerinde de tercih edilmektedir.

İletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, kablosuz iletişim sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmış ve bu alandaki araştırmacıları yeni ve etkili çözümler bulmaya yönlendirmiştir. Bu bağlamda, üretiminin kolay olması, düşük profile sahip olması, maliyetinin az olması, devrelere kolay entegre olması (Radio Frequency Integrated Circuit - RFIC, Monolithic Microwave Integrated Circuit - MMIC), yüksek kazançlı, geniş bantlı ve çift polarizasyon kullanımı gibi avantajlarından dolayı uydu/telemetri, kablosuz haberleşme sistemleri (baz istasyonu antenleri, bluetooth, Global Positioning System - GPS, Wireless Fidelity - Wi-Fi,

Wireless Local Area Network - WLAN) ve askeri/savunma sistemleri (radar, telsiz, silah sistemleri) alanlarında genel olarak mikroşerit yama antenler tercih edilmektedir [8].

Mikroşerit yama antenler, düşük profilli, montajının kolay ve maliyetinin az olmasından dolayı modern kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan düzlemsel bir anten çeşididir. 1950'lerde geliştirilip, 1970'lerde patenti alınan yama antenler genellikle yüksek dielektrik sabitine sahip ince bir yüzey (alttaş) üzerine metal bir yama yerleştirilerek ve bu yüzey altında bir toprak düzlemi olacak şekilde tasarlanır [9]. Mikroşerit yama antenlerin tasarımı; antenin çalışma frekansı, alttaşın dielektrik sabiti ve kalınlığı gibi parametrelere göre değişir [10-11].

Mikroşerit yama antenlerin, yama ile toprak düzlemi arasında oluşan elektrik alan ve akım dağılımları rezonansını belirler. Yama antenler genellikle mikroşerit hat veya koaksiyel prob ile beslenir. Son yıllarda, yama antenlerin performansını geliştirme üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar dar bantlı olan yama antenlerin geniş veya çok bantlı olması içindir [12-13]. Bu çalışmalar, farklı yama geometrilerini ve besleme tekniklerini içermektedir [14-15]. Bu besleme tekniklerine, yakınlık beslemeli, açıklık beslemeli yarık kuplajlı ve L prob beslemeler örnek verilebilir.

Bu çalışmada, 6 GHz altı 5G baz istasyonları için ekonomik, düşük profilli ve geniş bantlı anten tasarımı sunulmuştur. Açıklık bağlantılı yarık kuplajlı yama anten yöntemiyle 3.3 GHz - 4.2 GHz bandını kapsayan çift kutuplu ($\pm 45^\circ$ doğrusal) anten tasarlanmış ve üretilmiştir. Antenin temel teknik isterlerinde; geri dönüş kayıplarının $S_{11}, S_{22} < -15$ dB, portlar arası izolasyonun $S_{12} = S_{21} < -20$ dB, dikey ve yatay eksenlerde yarım güç hüzm genişliklerinin (Half Power Beam Width – HPBW) $65^\circ \pm 5^\circ$, ön-arka ışıma oranının (Front to Back Ratio – FBR) > 20 dB ve çapraz kutup ayrışımının (Cross Polar Discrimination – XPD) > 15 dB olmaları hedeflenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, anten performansı tanımlanırken kullanılan ve oldukça önemli olan ışıma örüntüsü, kazanç, S-parametreleri gibi bazı temel anten parametrelerine değinilmiş ve bu parametrelerin anten tasarımına olan etkileri incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, bu çalışmada tasarlanmış olan mikroşerit yama antenlerin tarihi, diğer anten çeşitlerine göre avantaj veya dezavantaj durumları, teknik özellikleri/çalışma prensibi ve performansını artıran farklı besleme teknikleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

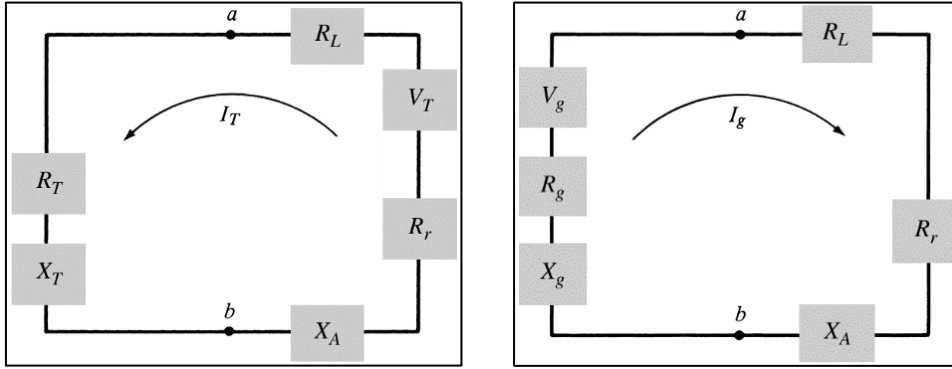
Dördüncü bölüm, birinci nesil analog sistemlerden başlayarak günümüzün gelişmiş 5G dijital haberleşme teknolojilerine kadar uzanan mobil haberleşme sistemlerinin evrimini ele almaktadır. Ayrıca, bu bölümde 5G teknolojisinde kullanılan baz istasyonlarının teknik gereksinimleri yer almaktadır.

Beşinci bölümde, açıklık bağlantılı yarık kuplajlı yama antenin geometrik konfigürasyonu, fiziksel boyutları verilmiş ve fiziksel boyutların anten performansına olan etkileri benzetim sonuçlarıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Son olarak altıncı bölümde açıklık bağlantılı yarık kuplajlı yama antenin üretimi yapılmış, ölçüm sonuçları incelenmiş ve benzetim ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. TEMEL ANTEN PARAMETRELERİ

Antenler genel olarak alıcı ve verici olmak üzere iki işlevle kullanılır. Alıcı antenler, çevredeki elektromanyetik dalgaları toplayarak, bu dalgaların iletim hattı içerisinde yayılmasını sağlayarak bir cihaza veya devreye iletirler. Bu sayede, radyo dalgaları, televizyon sinyalleri, kablosuz iletişim sinyalleri gibi çeşitli iletişim sinyalleri alınabilir ve kullanılabilir. Verici antenler ise, bir iletim hattından gelen sinyali alarak bu sinyalleri elektromanyetik dalgalar halinde boşluğa yayarak iletişim sağlarlar. Bu yayılan elektromanyetik dalgalar, uzaktaki alıcı antenler tarafından alınabilir ve iletişim kurulabilir.



Şekil 2.1. Alıcı ve verici modundaki bir antenin iletim hattı Thevenin eşdeğeri [9]

Antenlerin çalışma prensipleri, Maxwell denklemleri ve elektromanyetik alan teorisi temeline dayanır. Bu denklemler, antenlerin ışınma, kazanç, yönlülük, polarizasyon gibi parametrelerin anten performansını nasıl etkilediğini açıklar. Maxwell denklemleri Çizelge 2.1.'de ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1. Maxwell denklemleri

| Denklem Adı | Diferansiyel form | İntegral form |
|-----------------------------------|---|--|
| Faraday yasası | $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ | $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$ |
| Ampere yasası | $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ | $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{s}$ |
| Gauss yasası | $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ | $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho dV$ |
| Gauss yasası (Manyetizma için) | $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ | $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ |

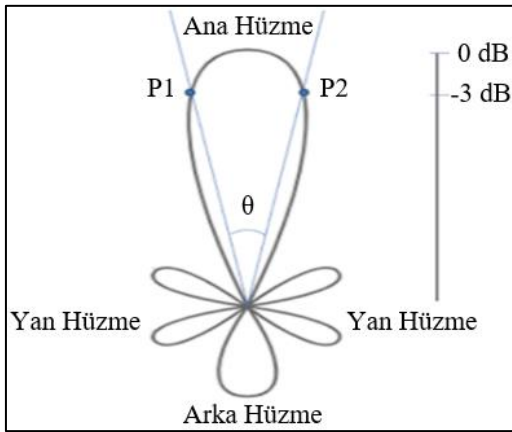
Çizelge 2.1.'de yer alan Maxwell denklemlerinde,

1. \vec{E} = Elektrik alan (V/m),
2. \vec{H} = Manyetik alan (A/m),
3. \vec{B} = Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m² veya T),
4. \vec{D} = Elektrik akı yoğunluğu (C/m²),
5. \vec{J} = Akım yoğunluğu (A/m²),
6. ρ = Hacimsel yük yoğunluğudur (C/m³).

Antenler, modern iletişim sistemlerinin temel unsurlarından biridir ve hemen hemen hayatımızın her alanında bulunurlar. Uydu/telemetri, kablosuz haberleşme sistemleri (baz istasyonu antenleri, bluetooth, WLAN, Wi-Fi, GPS) ve askeri/savunma sistemleri (radar, telsiz, silah sistemleri), televizyon yayını gibi birçok alan, antenlerin doğru bir şekilde tasarlanması ve çalıştırılmasıyla mümkündür. Antenlerin etkin ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için belirli parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanması ve dikkate alınması gerekir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanması ve dikkate alınması, anten tasarımının optimize edilmesini ve performansının artırılmasını sağlar. Dolayısıyla, iletişim sistemlerinde başarılı bir şekilde kullanılan antenler, bu temel parametrelerin dikkatlice incelenmesi ve uygulanmasıyla elde edilir.

2.1. Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü, bir antenin çevresine yaydığı elektromanyetik enerjinin yoğunluğunu ve dağılımını tanımlayan bir terimdir. Bu örüntü, antenin geometrisine, çalışma frekansına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebilir. Matematiksel bir ifade veya üç boyutlu gösterilebilen ışımaya örüntüsü, anten verimliliğini ve performansını değerlendirmek için önemlidir. İstenilen yönde güçlü bir ışımaya örüntüsü, sinyallerin hedeflenen alıcıya daha güçlü ve daha güvenilir bir şekilde iletilmesini sağlar. Örneğin, bir verici antenin, kablosuz bir ağdaki diğer cihazlarla etkileşim kurabilmesi için sinyalleri belirli bir yöne odaklaması gerekir. Bu, iletişim verimliliğini artırır ve iletişim kalitesini sağlar. Ayrıca, istenmeyen yönlerde güçlü bir ışımaya örüntüsü, gereksiz sinyal yayılmasına ve girişime neden olabilir. Örneğin, bir alıcı antenin, arka plan gürültüsünden kaynaklanan istenmeyen sinyalleri azaltması gerekir. Bu, alınan sinyallerin kalitesini artırır ve sistem performansını iyileştirir. İstenmeyen girişimlerin azaltılması ve iletişim verimliliğinin artırılması için, antenin ışımaya örüntüsünün dikkatlice tasarlanması ve optimize edilmesi gerekir. Bu genellikle antenin geometrisine, çalışma frekansına ve çevresel etkenlere bağlı olarak değişebilmektedir. İyi bir ışımaya örüntüsü tasarımı, iletişim sistemlerinin güvenilirliğini artırır ve daha iyi bir kullanıcı deneyimi sağlar.



Şekil 2.2. Bir antenin ışımaya örüntüsü

Şekil 2.2.'de yer alan bir antenin ışımaya örüntüsü 'ana hüzme', 'yan hüzme' ve 'arka hüzme' olmak üzere üç ana bileşen içermektedir.

Ana hüzme

Bir antenin çalışma frekansında maksimum gücü ilettiği veya aldığı yöndür. Antenin çevresine yaydığı elektromanyetik enerjinin en yoğun olduğu yön olan ana hüzme, genellikle antenin tasarımının ana hedefidir ve kullanım amacını belirler. Anten tasarımında ana hüzmenin önemi büyüktür çünkü bir iletişim sistemi genellikle belirli bir yönde iletişim kurmayı hedefler. Ana hüzme, antenin iletişim sistemine olan odaklanmasını sağlar ve istenen yönde sinyal iletimini veya alımını optimize eder. Ana hüzmenin genişliği ve yoğunluğu, antenin tasarımına ve kullanım amacına bağlı olarak değişir. Bazı antenlerin dar ve yoğun ana hüzmeleri vardır, bu da belirli bir yöne sıkı bir şekilde odaklandıkları anlamına gelirken, diğer antenlerin daha geniş ve daha yaygın ana hüzmeleri vardır, bu da daha geniş bir alanda iletişim kurabilecekleri anlamına gelir. Ana hüzmenin belirlenmesi, antenin çeşitli parametrelerinin optimize edilmesini gerektirir. Bu parametreler, antenin fiziksel boyutu, geometrisi, malzemesi, besleme noktası konumu ve elektromanyetik özellikleri gibi faktörleri içerir. Ana hüzmenin istenilen yönde doğru şekilde yönlendirilmesi, iletişim sisteminin performansını artırır, sinyal kalitesini iyileştirir ve girişimleri en aza indirir.

Yan hüzme

Bir antenin ana hüzmenin dışında yayılan ve istenmeyen yönlere doğru enerji yayılmasını temsil eden yan hüzmeler, iletişim sistemlerinde istenmeyen girişimlere veya sinyal bozulmalarına neden olabilir. Yan hüzmeler, antenin tasarımı ve geometrisiyle yakından ilişkilidir. Antenin boyutu, şekli, yönlendirme özellikleri ve besleme noktası gibi faktörler, yan hüzmelerin boyutu ve yoğunluğunu etkiler. Yan hüzmelerin azaltılması, iletişim sistemlerinin verimliliğini artırır, sinyal kalitesini iyileştirir ve sistem performansını optimize eder. Yan hüzmelerin azaltılması için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler, antenin tasarımı, yönlendirme özellikleri, eleman düzeni ve sinyal işleme teknikleri gibi çeşitli faktörlere dayanabilir. İyi bir anten tasarımı, istenmeyen yan hüzmelerin minimize edilmesini sağlar ve iletişim sistemlerinin güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, yan hüzmelerin kontrol edilmesi ve azaltılması, anten mühendisliğinde önemli bir araştırma ve geliştirme alanıdır.

Arka hüzme

Bir antenin ana hüzmesinin tam tersi yönünde yayılan enerjiyi ifade eden arka hüzmeler, iletişim sistemlerinde istenmeyen girişimlere neden olabilecek güçlü sinyal yayılmasıdır. Örneğin, bir antenin arka hüzmesi, arka plan gürültüsüne veya diğer kullanıcılardan gelen sinyallere karşı duyarlı olabilir. Bu nedenle, antenin arka hüzmelerinin kontrol altında tutulması ve istenmeyen yönlerde güçlü bir şekilde yayılan enerjinin bastırılması önemlidir. Arka hüzmelerin bastırılması, iletişim sistemlerinin performansını artırır ve girişimleri azaltır. Bunun için antenin düzgün bir şekilde konumlandırılması ve anten tasarımının optimize edilmesi gerekebilmektedir.

2.1.1. Yarım güç hüzme genişliği

HPBW, Şekil 2.2.'de gösterilen ışınma örüntüsündeki gücün yarıya düştüğü (P1-P2 arası) açı aralığını ifade etmektedir. Bu terim, bir antenin ana hüzmesinin genişliğini belirtmek için kullanılır. Yani, ana hüzmesinin ne kadar geniş olduğunu ölçer. Yarım güç hüzme genişliği, antenin ışınma yönlendirme kabiliyetini ve yönlülüğünü belirlemek için önemlidir. Düzgün bir yarım güç hüzme genişliği, antenin belirli bir yönde odaklandığını ve elektromanyetik gücün istenen hedefe yoğunlaştığını gösterir. Özellikle kablosuz iletişim sistemlerinde, antenin doğru şekilde hizalanması ve yarım güç hüzme genişliğinin optimize edilmesi, sinyal gücünün istenen hedeflere daha etkin bir şekilde ulaşmasını sağlar. Bu da iletişim kalitesini artırır ve sistem performansını iyileştirir.

2.1.2. Ön – arka ışınma oranı

FBR, antenin ana hüzme gücünün, arka hüzme gücüne oranını ifade eder. Eş. 2.1.'de ifade edilen ön-arka ışınma oranı dB cinsinden ifade edilmektedir.

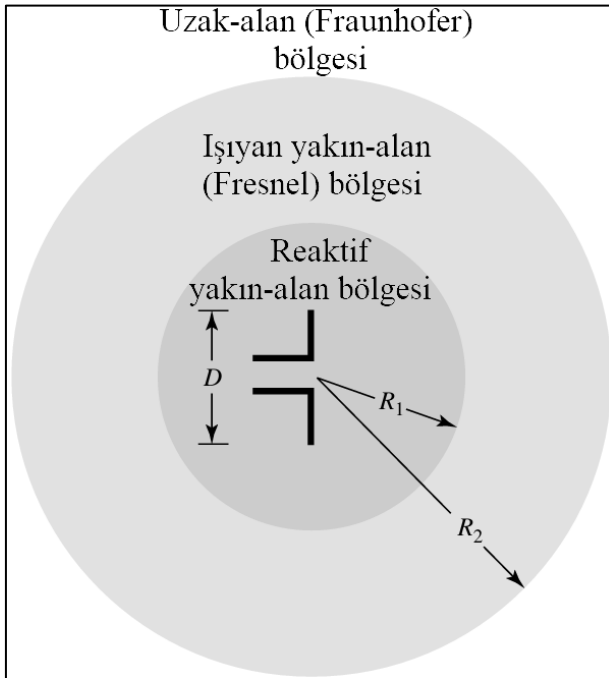
$$\text{FBR (dB)} = \text{Ana Hüzme Gücü (dB)} - \text{Arka Hüzme Gücü (dB)} \quad (2.1)$$

2.1.3. Çapraz kutup ayrışımı

Çapraz kutup ayrışımı, bir antenin dikey ve yatay düzlemde sinyal alım veya yayımında farklı performans göstermesi durumunu tanımlar. Yani, antenin bir düzlemde daha güçlü veya daha zayıf bir performans sergilemesi durumunu belirtir. Çapraz kutup ayrışımı, istenmeyen sinyal kayıplarına veya iletişim bozulmalarına neden olabildiği için, iletişim sistemi performansını olumsuz yönde etkiler. Çapraz kutup ayrışımı antenin geometrik tasarımının, konumlandırılmasının ve polarizasyonunun dikkate alınmasıyla en aza indirilebilir.

2.1.4. Alan bölgeleri

Alan bölgeleri, antenin çevresindeki elektromanyetik alanın davranışını belirleyen farklı bölgelerdir. Alan bölgeleri, antenin boyutu, geometrisi ve çalışma frekansı gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Şekil 2.3.'te bir anteni çevreleyen alan bölgeleri verilmektedir. Bu bölgeler üçe ayrılmaktadır.



Şekil 2.3. Bir antenin alan bölgeleri [9]

Reaktif yakın-alan bölgesi

Elektromanyetik alanın bu bölgede endüktif ve kapasitif bileşenlerinin ön planda olması yani, elektromanyetik dalgaların hala anten üzerinde yansıtıldığı veya depolandığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle reaktif yakın-alan bölgesi, elektromanyetik alanın yayılma davranışının değiştiği bir bölgedir. Birçok anten için bu bölgenin dış sınırı Eş. 2.2.'de ifade edilmiştir.

$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.2)$$

Burada λ dalga boyu, D ise antenin en büyük boyutudur.

Işıyan yakın-alan bölgesi

Antenin yakın alan bölgelerinden biri olan ışıyan yakın-alan bölgesinde, elektromanyetik dalgalar antenin radyasyon direncine bağlı olarak serbest uzayda yayılır. Anten performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan ışıyan yakın-alan bölgesi, iletişim sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için dikkate alınmalıdır. Çünkü, antenin elektromanyetik alanının radyatif bileşenleri, iletişim bağlantılarının kurulması veya sinyal alımının gerçekleştirilmesi için kullanılır. Işıyan yakın-alan bölge dış sınırı Eş. 2.3.'te verilmiştir.

$$R_2 = 2 D^2/\lambda \quad (2.3)$$

Uzak-alan bölgesi

Antenin alan bölgeleri arasında en uzak olan bölgedir. Bu bölge, elektromanyetik dalgaların serbest uzayda yayıldığı ve radyatif davranışın baskın olduğu alandır. İletişim sistemlerinde ve radar uygulamalarında yaygın olarak kullanılan uzak-alan bölgesi, antenlerin iletişim mesafelerini belirlemek, ışıma örüntülerini analiz etmek ve anten sistemlerinin performansını değerlendirmek için önemlidir.

2.2. Işıma Güç Yoğunluğu

Antenin ışıma güç yoğunluğu, anten tarafından yayılan elektromanyetik enerjinin birim alan başına düşen güç miktarını ifade eder. Poynting vektörü ile ifade edilen ışıma güç yoğunluğu Eş. 2.4.'te verilmiştir.

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.4)$$

Eş. 2.4.'te,

1. \vec{W} = Poynting vektörü (W/m^2),
2. \vec{E} = Elektik alan şiddeti (V/m),
3. \vec{H} = Manyetik alan şiddeti (A/m) olarak tanımlanmaktadır.

2.3. Işıma Şiddeti

Antenin ışıma şiddeti, anten tarafından belirli bir yönde yayılan elektromanyetik enerjinin yoğunluğunu yani, birim zamanda birim steradyan (sr) başına düşen güç miktarını ifade eder. Matematiksel olarak ışıma şiddeti Eş. 2.5.'te gösterilmiştir.

$$U(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{4\pi} \quad (2.5)$$

Eş. 2.5.'te,

1. $U(\theta, \phi)$ = Belirli bir yönde (θ, ϕ), anten tarafından yayılan ışıma şiddeti (W/sr),
2. $P(\theta, \phi)$ = Belirli bir yönde (θ, ϕ), anten tarafından yayılan toplam güç (W),
3. 4π = Tüm yönler için birim steradyan (sr) olarak tanımlanmaktadır.

Bir yönsüz kaynakta ışıma şiddeti (U_0), θ ve ϕ açılarından bağımsızdır. Toplam ışıyan güce (P_{rad}) bağlı olan yönsüz bir kaynağın ışıma şiddeti Eş. 2.6.'da gösterilmiştir.

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.6)$$

2.4. Yönlülük

Yönlülük, antenin belirli bir yönde daha fazla güç yaydığı veya belirli bir yönden daha fazla güç aldığı durumu ifade eder. Bu durum, antenin ışınım örüntüsünün belirli bir yönde daha yoğun olduğu anlamına gelir. Matematiksel olarak ise yönlülük, antenin belirli bir yöndeki ışınım şiddetinin ortalama ışınım şiddetine oranıdır. Eş. 2.6.'da U_0 kullanılarak yönlülük Eş. 2.7.'deki gibi yazılabilmektedir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (2.7)$$

2.5. Verim

Anten verimliliği, bir antenin giriş gücünün ne kadarının radyasyon yoluyla yayıldığını gösterir. Verimlilik, antenin elektromanyetik enerjisinin ne kadarının istenen yönde radyasyona dönüştürüldüğünü ve ne kadarının kayıplar nedeniyle harcandığını gösterir. Anten verimliliğinin matematiksel ifadesi Eş. 2.8.'de gösterilmiştir.

$$e_0 = e_r e_c e_d = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (2.8)$$

Eş. 2.8.'de;

1. e_0 = Toplam verim,
2. e_r = Yansıma verimi ($1 - |\Gamma|^2$),
3. e_c = İletkenlik verimi,
4. e_d = Dielektrik verimi,
5. e_{cd} = Işınım verimi,
6. Γ = Yansıma katsayısıdır.

2.6. Kazanç

Anten kazancı, bir antenin belirli bir yönde ışınım yapma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Genellikle dBi (decibel isotropic) birimiyle ifade edilen anten kazancı, bir antenin ışınması

eşit güçte bir izotropik anten (Tüm yönlere eşit güçte ışımaya yapan anten) ile karşılaştırılarak ifade edilir. Anten kazancı ışımaya örüntüsüyle ilişkilidir ve antenin ışımada en yoğun olduğu yönde maksimum kazançtan bahsedilir. Anten kazancı Eş. 2.9.'da verilmiştir.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

Eş. 2.9.'da ifade edilen giriş gücü (P_{in}) ışımaya gücü cinsinden yazılmak istenirse;

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (2.10)$$

Bu durumda anten kazancı,

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \right] \quad (2.11)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Anten kazancı ve yönlülüğü arasındaki bağlantı ise Eş. 2.11. kullanılarak Eş. 2.12.'de gösterilmiştir.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (2.12)$$

Antenler gücü aktif olarak yükseltmez, çünkü pasif bir elemandır. Buradaki kazanç, bir antenin yayılan gücünü belirli bir yönde yoğunlaştırma veya yönlendirme olarak ifade edilmesidir.

2.7. Polarizasyon

Anten polarizasyonu, elektrik alanın hangi yönde salınım yaptığını, yani elektrik alanın yönünü gösteren bir terimdir. Polarizasyonu doğrusal, dairesel ve eliptik olmak üzere üçe ayırmak mümkündür.

Doğrusal polarizasyon

Elektrik alan belirli bir düzlem boyunca (yatay veya dikey) salınır ve düz bir çizgi olarak gösterilir.

Dairesel Polarizasyon

Hem dikey hem yatay düzlemlerde dairesel bir şekilde dönerek salınan elektrik alanın bu iki düzlemde büyüklükleri aynıdır ve iki düzlem arasındaki zaman-faz farkı $\pi/2$ 'nin tek katlarıdır.

Eliptik polarizasyon

Elektrik alanın dikey ve yatay düzlemlerde farklı oranda salınmasıyla oluşur. Yani eliptik polarizasyon, iki düzlemdeki elektrik alanın zaman-faz farkının $\pi/2$ 'nin tek katı ve büyüklüklerin farklı olduğunda veya iki düzlemde elektrik alanın zaman-faz farkının $\pi/2$ 'nin tek katı olmadığı durumlarda oluşur.

2.7.1. Polarizasyon kaybı

Polarizasyon kaybı, alıcı bir antenin polarizasyonu ile bu antene gelen dalganın polarizasyonunun aynı olmadığı durumlarda oluşur.

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.13)$$

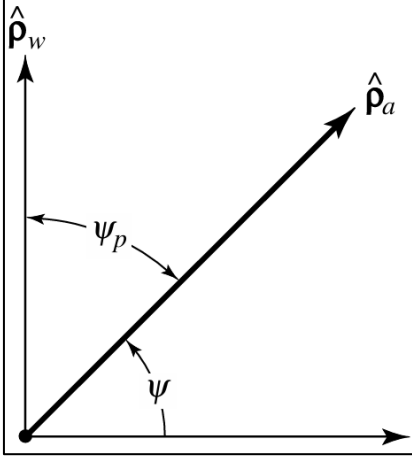
Eş. 2.13.'te ifade edilen gelen dalganın elektrik alanında, $\hat{\rho}_w$ gelen dalganın birim vektörüdür. Birim vektörü (kutuplanma vektörü) $\hat{\rho}_a$ olan alıcı antenin elektrik alanı Eş. 2.14.'teki gibi yazılmaktadır.

$$\vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.14)$$

Bu durumda kutuplanma kayıp çarpanı (Polarization Loss Factor - PLF) Eş. 2.15.'teki gibi ifade edilmektedir.

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a| = |\cos\psi_p|^2 \quad (2.15)$$

Şekil 2.4.'te gösterilen ψ_p , iki birim vektör arasındaki açıdır.



Şekil 2.4. Polarizasyon birim vektörleri ve açısı [9]

2.7.2. Polarizasyon verimi

Anten polarizasyon verimi, antenin belirli bir polarizasyon türü için ne kadar etkili çalıştığını belirtir. Yani polarizasyon verimi, antenin alıcı olarak, gelen dalgaları maksimum düzeyde alabilme, verici olarak ise gönderilen dalgaları maksimum düzeyde yayabilmesiyle ilgili bir ölçüttür. Bu ölçüt Eş. 2.16.'da verilmiştir.

$$p_e = \frac{|l_e \cdot \vec{E}^{inc}|^2}{|l_e|^2 |\vec{E}^{inc}|^2} \quad (2.16)$$

Eş. 2.16.'da,

1. l_e = Antenin etkin vektör uzunluğu,
2. \vec{E}^{inc} = Antene gelen elektrik alanıdır.

2.8. Yansıma Katsayısı ve Duran Dalga Oranı

Yansıma katsayısı, bir iletim hattının veya bir antenin giriş ya da çıkış portlarından yansıyan dalganın oranını ifade eder. Yansıma katsayısı Eş. 2.17.'de ifade edilmiştir.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.17)$$

Burada,

1. Z_{in} = Antenin giriş empedansı,
2. Z_0 = İletim hattının karakteristik empedansıdır.

Duran dalga oranı ise, anten kapılarındaki (port) yansıyan dalğanın iletilen dalgaya oranıdır. Duran dalga oranı, bir antenin verimliliğini ve eşleşme performansını ölçen bir parametredir. Eğer; antenin giriş empedansı ile iletim hattının karakteristik empedansı birbirine eşit değilse yansımalar ve duran dalgalar oluşur. Duran dalga oranı Eş. 2.18. ile hesaplanmaktadır.

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.18)$$

Duran dalga değerlerine göre bir antenin performansı genellikle aşağıdaki gibidir.

1. $SWR = 1$: Mükemmel eşleşme,
2. $SWR < 1.5$: Çok iyi eşleşme,
3. $SWR < 2$: Kabul edilebilir eşleşme fakat iyileştirilebilir,
4. $SWR > 2$: Kötü eşleşme, kayıplardan dolayı anten performansı düşüktür.

2.9. Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri)

Özellikle RF ve mikrodalga devrelerde kullanılan saçılma parametreleri (S-Parametreleri) bir devrenin portlarına uygulanan gerilim veya akım dalgasının, diğer portlardaki yansıyan ve iletilen dalgalarla ilişkisini tanımlar. N portlu bir sistemin, gelen ($[V^+]$) ve yansıyan ($[V^-]$) gerilim dalgalarına göre saçılma matrisi tanımlanması Eş. 2.19.'da ifade edilmiştir.

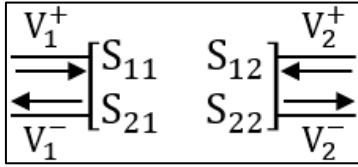
$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}$$

$$[V^-] = [S] [V^+] \quad (2.19)$$

İki portlu bir sistemin dört farklı S-parametresi bulunur. Bunlar; S_{11} , S_{21} , S_{12} ve S_{22} 'dir.

Burada,

1. S_{11} = Giriş portu voltaj yansıma katsayısı,
2. S_{21} = İleri voltaj kazancı,
3. S_{12} = Ters voltaj kazancı,
4. S_{22} = Çıkış portu voltaj yansıma katsayısıdır.



Şekil 2.5. S-parametreleri

İki portlu bir sistemin; gelen/yansıyan dalgaları ve saçılma parametreleri Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Giriş ve çıkış portlarının yansıma katsayıları Eş. 2.20. ve Eş. 2.21.'de gösterilmiştir.

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \Big|_{V_2^+ = 0} \quad (2.20)$$

$$S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \Big|_{V_1^+ = 0} \quad (2.21)$$

İki portlu sistemin ileri ve ters voltaj kazançları Eş. 2.22. ve Eş. 2.23.'te verilmiştir.

$$S_{21} = \frac{V_2^-}{V_1^+} \Big|_{V_2^+ = 0} \quad (2.22)$$

$$S_{12} = \left. \frac{V_1^-}{V_2^+} \right|_{V_1^+ = 0} \quad (2.23)$$

Bu durumda sistemin yansıma gerilim dalgaları Eş. 2.24. ve Eş. 2.25.'te ifade edilmiştir.

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+ \quad (2.24)$$

$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+ \quad (2.25)$$

2.9.1. Geri dönüş kaybı

Anten veya bir RF/mikrodalga devreye mikroşerit hat, koaksiyel kablo, konnektör gibi hatlar ile uygulanan elektromanyetik güç hatlardaki süreksizlikler (dielektrik, bakır kayıpları) sebebiyle uygulanan gücün bir kısmı kaynağa geri döner. Geri dönen gücün, uygulanan güce desibel (dB) cinsinden oranına geri dönüş kaybı (return loss) denir. Geri dönüş kaybı Eş. 2.26.'da gösterilmiştir.

$$RL \text{ (dB)} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (2.26)$$

Geri dönüş kaybı (RL), yansıma katsayısı (Γ) ve duran dalga oranı (SWR) arasındaki dönüşüm Çizelge 2.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Geri dönüş kaybının yansımaya katsayısı ve duran dalga oranına dönüşümü

| Geri Dönüş Kaybı (RL) | Yansımaya Katsayısı (Γ) | Duran Dalga Oranı (SWR) |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | ∞ |
| 1 | 0.891 | 17.391 |
| 2 | 0.794 | 8.724 |
| 3 | 0.708 | 5.848 |
| 4 | 0.631 | 4.419 |
| 5 | 0.562 | 3.570 |
| 6 | 0.501 | 3.010 |
| 7 | 0.447 | 2.615 |
| 8 | 0.398 | 2.323 |
| 9 | 0.355 | 2.100 |
| 10 | 0.316 | 1.925 |
| 12 | 0.251 | 1.671 |
| 15 | 0.178 | 1.433 |
| 24 | 0.063 | 1.135 |

2.9.2. Portlar arası izolasyon

Antenin portlar arasındaki etkileşimini yani bir porttan gelen sinyalin diğer portlara olan geçişinin ölçüsüdür. Özellikle MIMO sistemlerde, farklı portlardaki sinyallerin birbiriyle olan etkileşimlerini en aza indirmek anten performansı açısından oldukça önemlidir.

2.9.3. Araya girme kaybı

RF veya mikrodalga sistemlerde araya girme kaybı, bir devreye bir bileşen veya anten yerleştirildiğinde sinyal gücünde meydana gelen kaybı ifade eden bir parametredir. Araya girme kaybı, özellikle pasif bileşenlerin (filtreler, RF kablolar, bağlayıcılar veya antenler) iletim hattına eklenmesi durumunda, girişteki ve çıkıştaki güçlerin arasındaki farkı belirler. Bu kayıp, gücün bir kısmının bileşen içinde ısıya veya başka bir enerji biçimine dönüşmesi sonucu oluşur ve bu durum, bileşenin iç dirençleri, yansımaya kayıpları ve diğer iç kayıplardan kaynaklanabilir. Genellikle dB cinsinden ölçülen araya girme kaybının formülü Eş. 2.27.'de verilmiştir.

$$\text{Araya girme kaybı (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2.27)$$

Araya girme kaybı, bir sistemin performansını ve verimliliğini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yüksek araya girme kaybı, gücün büyük bir kısmının kaybolmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle zayıf sinyal koşullarının olduğu ortamlarda veya uzun mesafeli haberleşme sistemlerinde önemli problemlere sebep olur.

3. MİKROŞERİT YAMA ANTEN

Bu bölümde, kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan mikroşerit yama antenlerin tarihi, diğer anten çeşitlerine göre avantaj veya dezavantaj durumları, teknik özellikleri/çalışma prensibi ve performansını artıran farklı besleme teknikleri detaylı bir şekilde incelenecektir.

3.1. Mikroşerit Yama Antenlerin Tarihçesi

Basit tasarımlı ve baskılı devre sistemlerine uyumlu olması sebebiyle haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan mikroşerit yama antenlerin adında yer alan mikroşerit terimi ilk olarak iletim hatları ile ilişkilendirilmiş ve bu konudaki ilk mikroşerit hat çalışması 1952 yılında Grieg ve Englemann tarafından sunulmuştur [16].

Mikroşerit anten kavramı 1953 yılında Deschamps ve Sichak tarafından önerilmiştir [17]. Gutton ve Boissinot ise 1955 yılında mikroşerit antenin patentini almışlardır [18]. İlk başlarda kontrol edilebilir dielektrik sabitli baskılı devre kartlarının bulunmamasından dolayı mikroşerit hatlar ve antenler laboratuvarlarda özel amaçlı olarak kullanılan cihazlardı.

Düşük kayıplı dielektrik malzemelerin kullanılabilir hale gelmesinden sonra mikroşerit antenler, 1974 yılında Munson [19], 1975 yılında Howell [20] tarafından geliştirilmiş ve pratik hale getirilmiştir.

Kasım 1979'da gerçekleşen PCB Anten Teknolojisi Çalıştayı'ndan sonra mikroşerit yama antenlerin gelişimi hızlanmaya başlamıştır. Mikroşerit yama antenler ile ilgili ilk derleme makalesi 1977'de James ve Wilson tarafından [21], ilk kitap 1980 yılında Bahl ve Bhartia tarafından yazılmıştır [22]. İlk el kitabı ise 1989 yılında James ve Hall tarafından paylaşılmıştır [23].

3.2. Mikroşerit Yama Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları

Mikroşerit yama antenler; telefon, bilgisayar ve telsiz gibi kablosuz haberleşme sistemlerinde sıkça kullanılan anten çeşitleri arasındadır. Bu antenler, belirli uygulamalar için birçok avantajın yanında bazı dezavantajlara da sahiptirler. Mikroşerit yama antenlerin avantajları ve dezavantajları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Avantajlar:

1. Mikroşerit yama antenler, düşük profilli, küçük boyutlu ve hafif bir yapıya sahiptirler. Bu durum, onları cep telefonları, uydu alıcıları ve farklı taşınabilir cihazlar gibi alan ve ağırlık kısıtlamaları olan sistemlerde kullanışlı kılar.
2. Yama antenler, PCB teknolojisi kullanılarak kolay üretilebilir ve seri üretimi yapılabilir. Böylelikle RF ve mikrodalga devrelere kolay bir şekilde uyum sağlamaları mümkündür.
3. Üretiminin basitliği ve kullanılan dielektrik malzemelerin ucuz olması, yama antenlerin maliyetini düşürmektedir.
4. Geleneksel yama antenlerden farklı olarak, yama antenin performansını artırmak için anten geometrisinde değişiklikler veya farklı besleme teknikleri ile iyi bir bant genişliği, kazanç ve verimlilik sağlanabilmektedir.
5. Yama antenlere çift polarizasyon kolayca uygulanabilir. Böylelikle, yama antenler MIMO gibi çeşitli haberleşme sistemlerinde kullanımına olanak tanır.

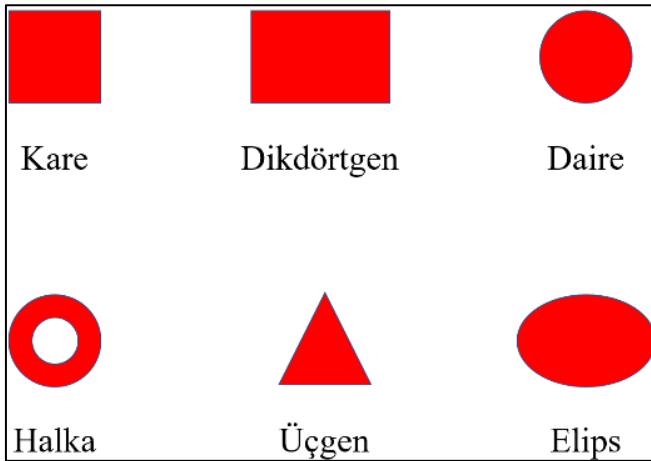
Dezavantajlar:

1. Geleneksel mikroşerit yama antenler genellikle dar bant genişliğine sahiptirler. Bu da yama antenlerin geniş frekans bandına sahip uygulamalar için yeterli olmadığını gösterir.
2. Yama antenler, bakır ve kullanılan alttaş çeşidine göre dielektrik kayıplara sahiptirler. Bu kayıplar, yama antenin verimliliğini ve kazancını azaltır.
3. Kullanılan alttaşın dielektrik sabiti sıcaklığa göre değişiklik gösterir. Bu değişiklik, yama antenin çalışma frekansını ve verimlilik, kazanç gibi diğer performans parametrelerinin değişmesine sebep olur.
4. Yama antenlerin yüksek güçlü sistemlerde kullanımı uygun değildir. Yüksek güç aşırı ısınmaya yol açabilir. Bu ısınmanın sonucunda, alttaşta bozulmalar veya anten performansında düşüşler olabilir.

5. Bir sistemde birden fazla yama anten kullanıldığında, antenler arasında karşılıklı etkileşim (mutual coupling) sorunları olabilir. Bu sorun, antenlerin performansını olumsuz olarak etkileyebilir ve sistemin performansını düşürebilir.

3.3. Mikroşerit Yama Antenlerin Teknik Özellikleri/Çalışma Prensibi

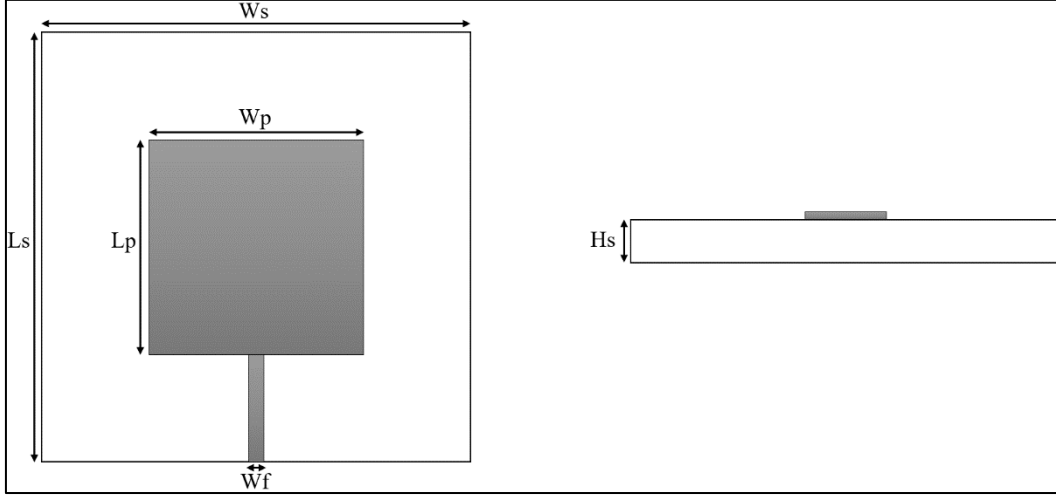
Bir mikroşerit yama anten genel olarak ince metalik iki yüzey (toprak ve yama düzlemleri) ve bu yüzeylerin arasında yer alan bir alttaştan oluşur. Yama antenlerin çalışma prensibi şu şekildedir. Yama yüzeyi, antenin beslemesi ile enerjilendirildikten sonra alttaş içinden toprak yüzeye elektromanyetik dalgalar gönderir. Böylelikle, yama yüzeyi köşelerinden ışımaya yapmaya başlar. Tercih edilen alttaşın kalınlığı ve dielektrik sabiti yama antenin ışımada oldukça önemlidir. Genellikle alttaş kalınlığı (H_s) $0.003\lambda_0 \leq H_s \leq 0.05\lambda_0$, dielektrik sabiti (ϵ_R) $2.2 \leq \epsilon_R \leq 12$ arasında seçilir.



Şekil 3.1. Farklı yama anten geometrileri

Yama anten yüzeyleri Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi farklı geometrilere sahip olabilir. Literatürde en çok kullanılan geometriler ise genelde kare, dikdörtgen ve dairedir. Çünkü, bu tür düzenli geometriler, anten performansını basit matematiksel metotlar ile kolayca tahmin edilmesini sağlar.

Dikdörtgen bir yama anten boyutları Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Dikdörtgen bir yama antenin üst ve yan görünümü

Burada,

1. W_s = Alttaş genişliği,
2. L_s = Alttaş uzunluğu,
3. H_s = Alttaş kalınlığı,
4. W_p = Yama antenin genişliği,
5. L_p = Yama antenin uzunluğu,
6. W_f = Mikroşerit hattın genişliğidir.

Yama antenin genişliği ve uzunluğu Eş. 3.1. ve 3.2.'de belirtilmiştir.

$$W_p = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}} \quad (3.1)$$

$$L_p = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824H_s \left(\frac{(\epsilon_{eff}+0,3)\left(\frac{W_p}{H_s}+0,264\right)}{(\epsilon_{eff}-0,258)\left(\frac{W_p}{H_s}+0,8\right)} \right) \quad (3.2)$$

Eş. 3.1. ve Eş. 3.2.'de yer alan,

1. $c =$ Işık hızı (3×10^8 m/s)
2. $f =$ Antenin rezonans frekansı (Hz)
3. $\epsilon_R =$ Kullanılan alümin dielektrik sabiti,
4. $\epsilon_{eff} =$ Kullanılan alümin etkin dielektrik sabitidir.

Etkin dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) Eş. 3.3.'te gösterilmiştir.

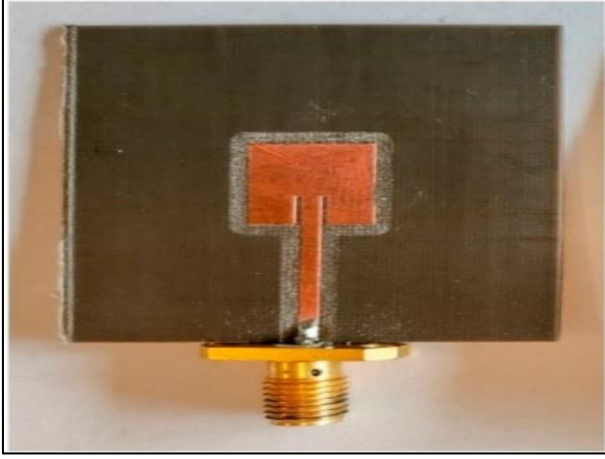
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{H_s}{W_p} \right)}} \right] \quad (3.3)$$

3.4. Mikroşerit Yama Antenlerin Besleme Teknikleri

Mikroşerit yama antenler farklı yöntemler ile beslenebilirler. Bu yöntemler temaslı ve temassız olmak üzere ikiye ayrılır. Temaslı yöntemler, mikroşerit hat ve koaksiyel prob ile doğrudan yama yüzeyi beslerken, yakınlık beslemeli, açıklık bağlantılı yarık kuplajlı, L-prob beslemeli gibi temassız yöntemlerde elektromanyetik güç kuplaj yoluyla yamaya aktarılır.

3.4.1. Mikroşerit hat ile besleme

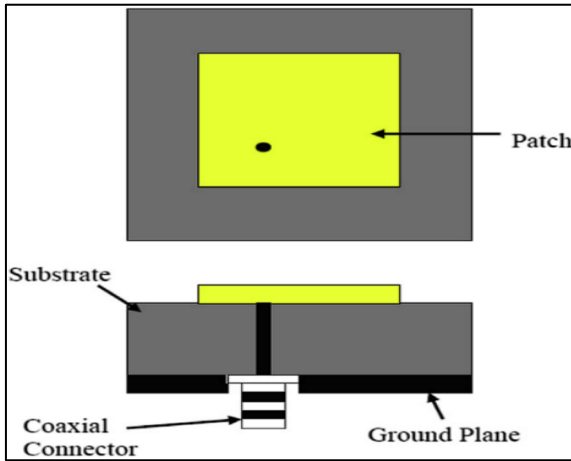
Mikroşerit hat ile besleme yöntemi, yama antenlerde sık kullanılan bir besleme yöntemidir ve kenar beslemesi (edge feed) olarak da adlandırılır. Bu yöntemde Şekil 3.3.'ten de görüleceği üzere, antenin kenarına antene degecek şekilde metal bir hat eklenir. Yama antenin boyutlarına göre çok daha ince bir genişlikte olan mikroşerit hat beslemesinin en büyük avantajlarından biri anten ile besleme hattının aynı yüzeyde üretilerek düzlemsel bir yapıya olanak sağlamasıdır [24-25]. Böylelikle, mikroşerit hat ile beslenen yama antenin, üretim maliyetleri düşük, üretim süreci oldukça basit ve anten derlitoplu yapıdadır.



Şekil 3.3. Mikroşerit hat ile beslenen yama anten [26]

3.4.2. Koaksiyel prob ile besleme

Koaksiyel kablo kullanılan koaksiyel besleme yöntemi, düzlemsel olmayan bir besleme tekniğidir. Şekil 3.4.'te gösterilen bu yöntemde, koaksiyel kablonun iç iletkeni alttaşı geçerek yamanın giriş empedansının 50Ω olduğu noktada lehimlenerek yama ile temas kurar, kablonun dış iletkeni ise antenin toprak düzlemine lehimlenir.

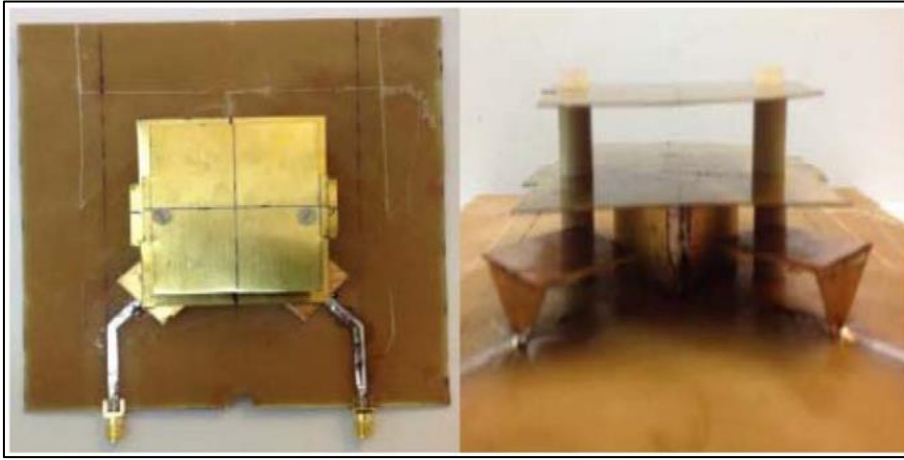


Şekil 3.4. Koaksiyel prob ile beslenen yama anten [27]

Temaslı besleme yöntemlerine mikroşerit hat ve koaksiyel prob örnek olarak gösterilmiştir. Bu iki besleme yöntemiyle üretilen yama antenin en büyük dezavantajlarından biri dar bantlı olmasıdır. Yama antenin geniş bant performansını artırmak için yakınlık beslemeli, açıklık bağlantılı yarı kuplajlı, L-prob beslemeli temassız besleme yöntemleri geliştirilmiştir.

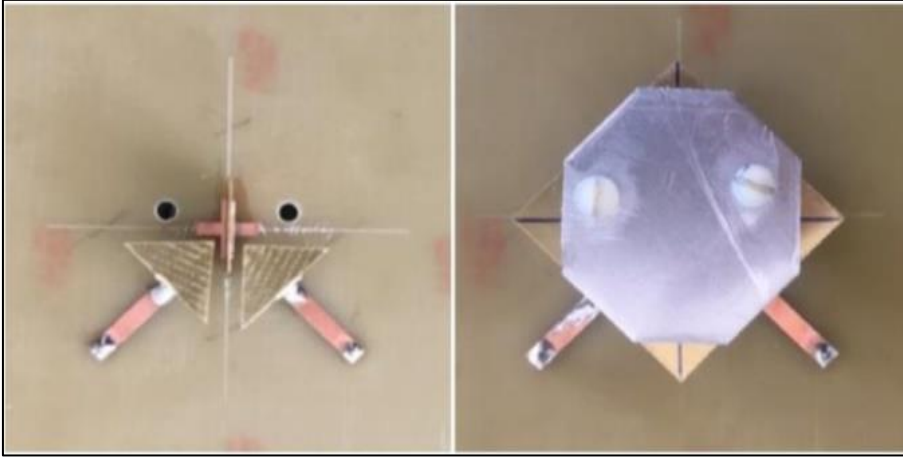
3.4.3. L-prob ile besleme

L-prob ile besleme, antenin bant genişliği ve kazancı gibi performansını artırmak için tasarlanan bir besleme yöntemidir. L-prob besleme ile genellikle askıda yama antenler kullanılır [28-31]. Yama antenin askıda kullanılmasının sebebi, dielektrik kayıpları azaltmak ve radyasyon verimliliğini artırmaktır. Şekil 3.5.'te L-prob beslemeli bir askıda yama antenin geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. L-prob ile beslenen askıda yama anten [29]

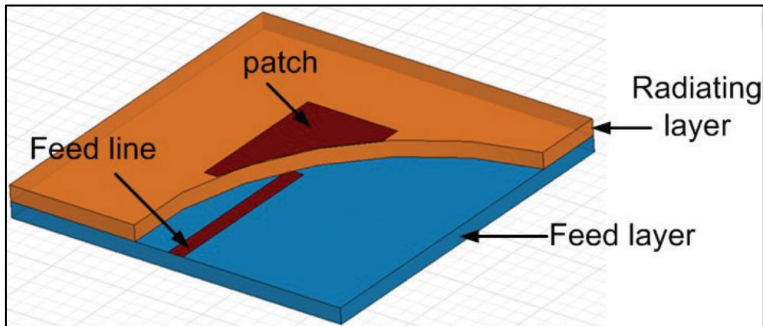
Şekil 3.5.'teki anten, ışıma yapan ana yama, bir parazitik yama ve iki tane L-prob beslemesinden oluşmaktadır. L-prob beslemeleri, ana ve parazitik yama arasında belirli bir yükseklik farkı bulunur. L-prob ile beslenen askıda yama antenin çalışma prensibi, prob beslemelerinin ana yamayı elektromanyetik kapasitif kuplaj ile uyarmasına dayanır. Bu yapıda, ana yamadan daha yüksekte ve daha küçük olan parazitik yamanın işlevi, antenin bant genişliğini artırmak ve empedans iyileştirmesini sağlar. Askıda yama antenlerin en büyük problemlerinden biri iki L-prob'un yakınlığından dolayı portlar arası izolasyonun kötü olmasıdır. Bu problem, Şekil 3.6.'dan da görüleceği üzere L-prob'ların arasına belirli bir yükseklikte metal duvar konularak çözülmüştür.



Şekil 3.6. L-prob ile beslenen metal duvarlı askıda yama anten [28]

3.4.4. Yakınlık ile besleme

Şekil 3.7.'de gösterilen yakınlık ile besleme yöntemi, yama antenlerin bant genişliği gibi performansını iyileştiren yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, ışıma yapan yama ve besleme hattı arasında doğrudan bir bağlantı bulunmaz. Besleme hattı ve yama arasındaki enerji, açık uçlu mikroşerit hattın elektromanyetik dalgalar ile yamayı uyarmasıyla sağlanır. Açık uçlu mikroşerit hattın yama üzerindeki konumlandırılmasının doğru yapılması, antenin bant genişliğini iyileştiren en önemli faktörlerden biridir. Bant genişliğini iyileştiren diğer faktörlerden biri, yamanın üzerinde yer alan alttaşın kalınlığının artırılmasıdır. Bununla birlikte, yama alttaşı kalınlığının artırılması yamaya güç aktarılmasını zorlaştırabilir. Bu problem, daha kalın bir besleme hattı alttaşıyla çözülebilir [32].



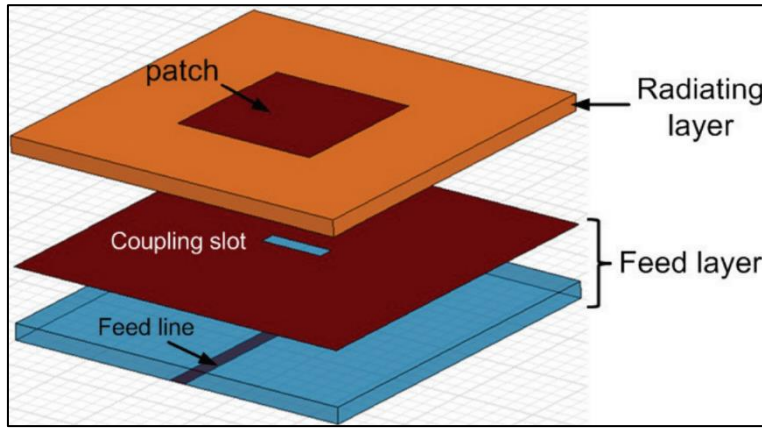
Şekil 3.7. Yakınlık bağlantı ile beslenen yama anten [32]

Yakınlık ile beslemenin en büyük avantajlarından biri, yama ile besleme hattının üzerinde yer aldığı iki farklı dielektrik katmanın ayrı ayrı optimize edilerek 13 % gibi yüksek bir

bant genişliği elde edilmesidir [25]. Bu beslemenin en büyük dezavantajları ise, iki katmanlı yapısı sebebiyle üretiminin geleneksel mikroşerit yama antenlere göre daha zor ve pahalı olmasıdır.

3.4.5. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile besleme

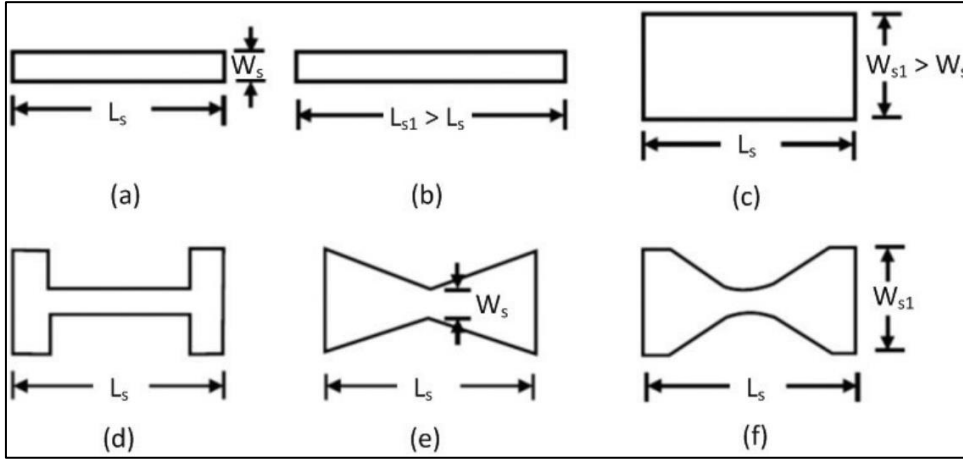
Yama anteni geniş bantlı yapma tekniklerinden biri de açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile beslemedir [33-35]. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile besleme yöntemi, yakınlık ile besleme yönteminde olduğu gibi, yama ve besleme hattı alttaşı olmak üzere iki farklı dielektrik katmandan oluşur. Şekil 3.8.'de yer alan bu besleme tekniğinin yakınlık ile besleme yönteminden en temel farkı iki dielektrik katmanının üstünde yarık bulunan bir toprak katmanı ile ayrılmasıdır. Üstünde yarık bulunan toprak katmanı besleme hattının yer aldığı dielektrik katmanın diğer tarafına yerleştirilmiştir. Toprak katmanının iki dielektrik katman arasına yerleştirilme nedeni ise iki dielektrik katman arasında istenmeyen radyasyonu azaltmaktır [25].



Şekil 3.8. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile beslenen yama anten [32]

İlk olarak 1985 yılında Pozar tarafından sunulan bu besleme yöntemi, diğer besleme yöntemlerine göre daha geniş bir bant aralığının yanı sıra mükemmel polarizasyon saflığı da sağlamaktadır [36]. Açıklık bağlantılı yarık kuplajlı yama antende yarık ve yama olmak üzere iki rezonans bulunur. Eğer bu iki bileşen doğru bir şekilde optimize edilirse iki rezonans birbirine yaklaşır ve geniş bir bant aralığı elde edilir. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj ile beslemeli yama antenlerin optimizasyonu için aşağıdaki gibi birden fazla değişken vardır.

1. Yama alttaş kalınlığı ve dielektrik sabiti,
2. Besleme hattı alttaş kalınlığı ve dielektrik sabiti,
3. Yama boyutları,
4. Şekil 3.9.'da gösterilen farklı yarığın geometrileri,
5. Yarığın boyutları,
6. Besleme hattın yarığa göre konumlandırılması,
7. Yarığın yamaya göre konumlandırılması,
8. Koçan uzunlukları.



Şekil 3.9. Farklı yarığın geometrileri, (a) ince dikdörtgen, (b) daha uzun ve ince dikdörtgen, (c) kalın dikdörtgen, (d) H şekilli, (e) papyon şekilli ve (f) kum saati şekilli [32]

Bu besleme yönteminin bazı dezavantajları vardır. Bunlar;

1. Birden fazla katmana sahip olan bu antenlerin üretimi, yarığın ve yamanın hizalanma zorlukları olduğu için karmaşık ve maliyetlidir.
2. Bu yapılar, tek katmanlı yapılar kadar sağlam değildir.
3. Bu antenin optimizasyonu için birden fazla değişken olduğu ve bu değişkenler birbirine bağlı oldukları için tasarım süresi hem uzamakta hem de zorlaşmaktadır.
4. Bu antenlerin en büyük dezavantajı ise yarığın dolayısıyla oluşan geriye doğru yansımalarıdır. Geriye doğru yansımalarla ilgili olarak antenin verimi düşmektedir.

Açıklık bağlantılı yarığın kuplajlı besleme, diğer besleme yöntemlerine göre daha geniş bant imkânı sağlarken, yarığın dolayısıyla oluşan geriye doğru yansıma problemini beraberinde

getirir. Bu problemi düzeltmek için reflektör veya yarıkları örten arka – boşluk destekli (cavity back) yapılar kullanılır [37-41]. Bu yapılar geriye doğru yansımayı engellerken, antenin toplam yüksekliğini artırır.

3.5. Mikroşerit Yama Anten Tasarımında Kullanılan Dielektrik Malzemeler

Mikroşerit yama antenlerin üretiminde kullanılan çok sayıda dielektrik malzeme bulunur. Çizelge 3.1.'de dielektrik malzeme üreten şirketlerin farklı dielektrik sabite sahip malzemeleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. RF Tasarımda kullanılan dielektrik malzemeler ve parametreleri

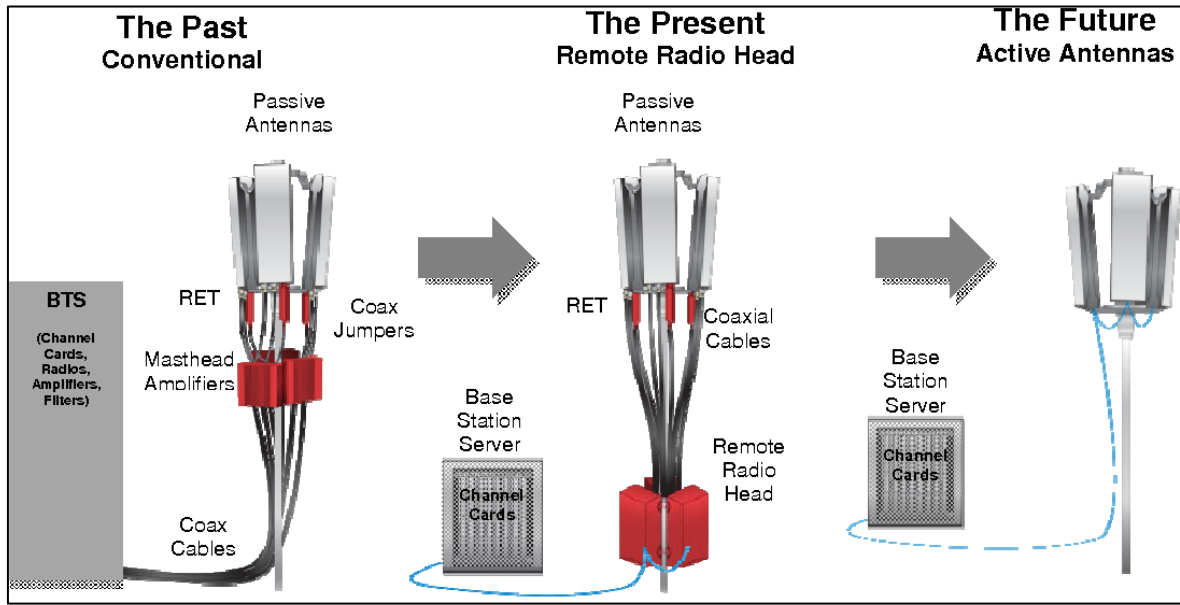
| Üretici Firma | Malzeme Kodu | Çalışma Frekansı (GHz) | Kalınlık Aralığı (mm) | Dielektrik Sabiti | Dielektrik Kaybı |
|---------------|----------------|------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| Rogers | RO3003 | 0-77 | 0,13 - 1,52 | 3,00 | 0,0010 |
| Rogers | RO3006 | 0-77 | 0,13 - 1,28 | 6,15 | 0,0020 |
| Rogers | RO3010 | 0-77 | 0,13 - 1,28 | 10,20 | 0,0022 |
| Rogers | RO3035 | 0-77 | 0,25 - 1,52 | 3,50 | 0,0015 |
| Rogers | RO4003C | 0-40 | 0,203 - 1,524 | 3,38 | 0,0027 |
| Rogers | RO4350B | 0-40 | 0,1 - 1,52 | 3,48 | 0,0037 |
| Rogers | RT/DUROID 5880 | 0-40 | 0,127 - 1,575 | 2,20 | 0,0009 |
| Rogers | RT/DUROID 5870 | 0-40 | 0,127 - 1,575 | 2,33 | 0,0012 |
| Rogers | AD 250C | 0-10 | 0,508 - 1,524 | 2,52 | 0,0013 |
| Rogers | AD 255C | 0-10 | 0,508 - 3,175 | 2,55 | 0,0013 |
| Rogers | AD 300D | 0-10 | 0,762 - 3,048 | 2,97 | 0,0021 |
| Rogers | AD 350A | 0-10 | 0,762 - 3,048 | 3,54 | 0,0033 |
| Taconic | RF-35 | 0-10 | 0,25 - 1,52 | 3,50 | 0,0025 |
| Taconic | RF-60 | 0-10 | 0,13 - 1,52 | 6,15 | 0,0028 |
| - | FR-4 | 0-10 | 0,508 - 3,2 | 4-5 | 0,025 |

Çizelge 3.1.'de RF tasarımda (anten ve alıcı-verici modül) en çok kullanılan dielektrik malzemeler ve elektriksel özellikleri verilmiştir. Çizelge 3.1.'den de görüleceği üzere en verimsiz yani dielektrik kaybı ve dielektrik sabiti değişkenliği en fazla olan malzeme FR-4'tür. FR-4'ün diğer malzemelere göre tek avantajı, fiyatı oldukça düşüktür. Bu sebeple; özellikle 10 GHz'e kadar olan anten tasarımlarında en çok kullanılan dielektrik malzeme FR-4'tür. Yüksek frekanslı anten tasarımlarında ve özellikle RF modüllerde en çok tercih edilen üretici firma ise Rogers'tır. Rogers malzemelerinin en büyük avantajı hem dielektrik

kayıpları oldukça azdır hem de RF modüllerde güç yükseltici gibi bileşenlerden dolayı oluşan yüksek ısıları atımı yani termal iletkenliği diğer malzemelere göre yüksektir.

4. MOBİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN EVRİMİ

Çağımızın modern haberleşme ağlarının bel kemiği olarak kabul edilen baz istasyonları, cep telefonları ve diğer kablosuz cihazlar arasındaki iletişimi sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere baz istasyonları, haberleşme teknolojilerinin başlangıcından günümüze kadar birçok gelişim göstermiştir.



Şekil 4.1. Baz istasyonlarının gelişimi [43]

4.1. Birinci Nesil (1G) Haberleşme ve Baz İstasyonları

Baz istasyonları ilk olarak, 1980'li yılların başlarında analog bir sistem olan 1G'nin tanıtılmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu dönemde kullanılan analog sistemli baz istasyonları büyük ve ağır ekipmanlardan oluşmasının yanı sıra düşük frekanslarda çalıştığı için sınırlı menzil ve kapasiteye sahiptirler.

4.2. İkinci Nesil (2G) Haberleşme ve Baz İstasyonları

Baz istasyonlarında 2G teknolojisine geçiş 1990'lı yılların başında olmuştur. Bu teknoloji ile, 1G'de kullanılan analog sinyallerin yerini dijital sinyaller almış ve mobil kablosuz haberleşme sistemlerinde dijital döneme geçiş yapılmıştır. Dijital dönemle birlikte, 1G'de yer alan ses kalitesi ve güvenlik gibi problemlerin önüne geçilmiş ve kullanıcılar için kısa

mesaj servisi (Short Message Service - SMS) ve multimedya mesajlaşma servisi (Multimedia Messaging Service – MMS) gibi bazı hizmetler gelmiştir. 2G baz istasyonları, analog sistemli 1G baz istasyonlarına göre daha küçük ve verimlidir. Ayrıca 2G ile mobil iletişim için küresel sistem (Global System for Mobile Communication – GSM), geçici standart (Interim Standard 136 - IS-136) ve kod bölmeli çoklu erişim (Code Division Multiple Access – CDMA) gibi standartlar mobil haberleşmeyi daha yaygın ve kullanılabilir hale getirmiştir.

4.3. Üçüncü Nesil (3G) Haberleşme ve Baz İstasyonları

2000’lerde mobil kablosuz haberleşme sistemlerindeki gelişmeler ve özellikle 3G teknolojisinin yaygınlaşması, mobil cihazların ve baz istasyonlarının işlevselliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bu dönemde, akıllı telefonların yaygınlaşması gibi mobil cihazlardaki teknolojik gelişmeler, 3G ağ altyapısının sağladığı veri aktarım hızını ve kapasiteyi önemli ölçüde artırmış ve evrensel mobil telekomünikasyon sistemi (Universal Mobile Telecommunication System – UMTS), yüksek hızlı paket erişimi (High Speed Packet Access – HSPA) gibi standartlar geliştirilmiştir. Bu artış kullanıcılara yüksek hızda internete erişebilme, kesilmeden video izleme, hızlı dosya indirme, gönderme ve kaliteli ses iletişimi gibi bazı avantajlar sağlamıştır.

4.4. Dördüncü Nesil (4G) Haberleşme ve Baz İstasyonları

2010’lu yıllarda, 4G ve uzun vadeli evrim (Long Term Evolution – LTE) gibi sistemler, mobil haberleşmede büyük ölçüde bir gelişim sağladı. Mobil haberleşmede yüksek hızlı geniş bant hizmetlerini getiren 4G ile yüksek çözünürlüklü (High Definition – HD) video, çevrimiçi oyunlar ve diğer yoğun veri gerektiren uygulamalar için çok büyük bir performans sunulmuştur. 4G, getirdiği yüksek hız, güçlü bağlantısı ile kullanıcıların yüksek kaliteli içeriklere erişimini mümkün kılarak, mobil cihazları sadece iletişim aracı olmaktan çıkarıp eğlence ve iş aracı haline getirmiştir. 4G baz istasyonları, MIMO gibi teknolojileri kullanarak, veri iletim hızını ve ağ kapasitesini önemli ölçüde geliştirmiştir. Böylelikle, çok sayıda kullanıcının daha yüksek hızlarda internete erişebilmesi ve ağ yoğunluğunun daha etkin bir şekilde yönetilmesi sağlanmıştır. 4G’den önce ve sonra Türkiye’deki operatörlerin frekans spektrumları Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 4G öncesi Türkiye’deki operatörlerin frekans spektrumları

| | GSM900 | GSM1800 | 3G | WiMAX |
|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| TURKCELL | 890-960 MHz | | 1910-2170 MHz | |
| VODAPHONE | | 1710-1880 MHz | 1910-2170 MHz | |
| AVEA | | 1710-1880 MHz | 1910-2170 MHz | |
| TÜRK TELEKOM | | | | 3400-3600 MHz |

Çizelge 4.2. 4G sonrası Türkiye’deki operatörlerin frekans spektrumları

| | LTE800 | GSM900 | GSM1800 | 3G | LTE2500 | WiMAX |
|--------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| TURKCELL | 790-860 MHz | 890-960 MHz | 1710-1880 MHz | 1910-2170 MHz | 2490-2690 MHz | |
| VODAPHONE | 790-860 MHz | 890-960 MHz | 1710-1880 MHz | 1910-2170 MHz | 2490-2690 MHz | |
| TÜRK TELEKOM | 790-860 MHz | 890-960 MHz | 1710-1880 MHz | 1910-2170 MHz | 2490-2690 MHz | 3400-3600 MHz |

4.5. Beşinci Nesil (5G) Haberleşme ve Baz İstasyonları

Günümüzde, mobil haberleşme alanında 5G (beşinci nesil) teknolojisiyle yeni bir dönem başlamaktadır. 5G, milimetre dalga teknolojisi, hüzme şekillendirme (beamforming) ve çok büyük MIMO gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu ile mobil iletişimde üst düzey bir performans sunmaktadır. Özellikle; 5G'nin sağladığı yüksek veri hızları, düşük gecikme süreleri ve yoğun cihaz bağlantısı, kullanıcı deneyimini önemli bir ölçüde geliştirmektedir. Bu gelişimin temel taşlarından biri de aktif anten teknolojisidir.

Aktif antenler, 5G öncesi pasif anten sistemlerine kıyasla çok daha gelişmiş ve esnek bir iletişim altyapısı sunar. Bu antenler, RF sinyallerini aktif elektronik bileşenler kullanarak işleyip güçlendirir ve bu sayede iletim ve alım süreçlerini optimize ederler. Aktif anten teknolojisinin bu özelliği, daha güçlü, güvenilir ve kesintisiz bağlantılar kurulmasını sağlamaktadır. Özellikle 5G gibi yüksek veri transfer hızı ve düşük gecikme süresi

gerektiren teknolojilere uygun olarak tasarlanan aktif antenler, milimetre dalga, beamforming ve MIMO gibi yenilikçi tekniklerle entegre edilerek, mobil haberleşmede üst düzey performans sunar. Bu teknikler, kullanıcıların daha yüksek bant genişliği ve daha düşük gecikme süresi deneyimlemelerini sağlarken, aynı zamanda ağıın kapasitesini ve verimliliğini artırır. Aktif anten sistemleri, dinamik frekans seçimi ve adaptif ışın yönlendirme gibi ileri düzey fonksiyonlarla da donatılmış olup, bu sayede radyo dalgalarının çevresel koşullara göre optimum şekilde yönlendirilmesini ve dağıtılmasını mümkün kılar. Bu durum, özellikle şehir merkezlerinde ve yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip bölgelerde (havaalanları, stadyumlar vb.) haberleşme performansını önemli ölçüde iyileştirir.

Aktif anten sistemlerinin; milimetre dalga, beamforming ve MIMO gibi teknikler ile entegre edilmesiyle tasarlanan 5G baz istasyonları; düzgün bir kapsama alanı, daha yüksek hızlar ve düşük gecikme süreleri ile haberleşme teknolojisinde ilerlemeler sağlar. Bu ilerlemeler, nesnelerin interneti (Internet of Things – IoT), otonom araçlar ve akıllı şehirler gibi yeni nesil uygulamaların gelişimini destekler. Örneğin; 5G'nin düşük gecikme süreleri, otonom araçların güvenli ve hızlı bir şekilde iletişim kurmasını sağlayarak sürücüsüz taşımacılığın gelişimine katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, 5G teknolojisi mobil iletişim dünyasını kullanıcılar arası haberleşmenin ötesine taşıyarak daha akıllı bir geleceğin temellerini atarak kullanıcı deneyimlerini ve haberleşme altyapılarını kökten değiştirmektedir. Ülkemizde ve küreselde kullanılacak olan 6 GHz altı 5G frekans bantları Çizelge 4.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Türkiye ve küreselde 6 GHz altı 5G frekans bantları

| Ülke | Frekans (GHz) | Bant Adı |
|------------|---------------|----------|
| Türkiye | 3,40 – 3,80 | n78 |
| ABD | 3,55 – 3,70 | n78 |
| | 3,70 – 4,20 | n77 |
| İngiltere | 3,40 – 3,80 | n78 |
| Almanya | 3,40 – 3,80 | n78 |
| Fransa | 3,46 – 3,80 | n78 |
| İtalya | 3,60 – 3,80 | n78 |
| Çin | 3,30 – 3,60 | n78 |
| Güney Kore | 3,40 – 3,70 | n78 |
| Japonya | 3,60 – 4,20 | n77 |
| Avustralya | 3,40 – 3,70 | n78 |
| Hindistan | 3,30 – 3,60 | n78 |

4.5.1. 5G Baz istasyonu antenlerinde olması gereken ve hedeflenen teknik isterler

Baz istasyonu antenlerinin tasarımında, antenin çalışma performansını belirleyen bazı teknik isterler vardır. Ülkemizde 5G baz istasyonu antenlerinde olması gereken ve bu tez çalışmasında hedeflenen teknik isterler Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Türkiye ve küreselde baz istasyonu antenleri için teknik isterler

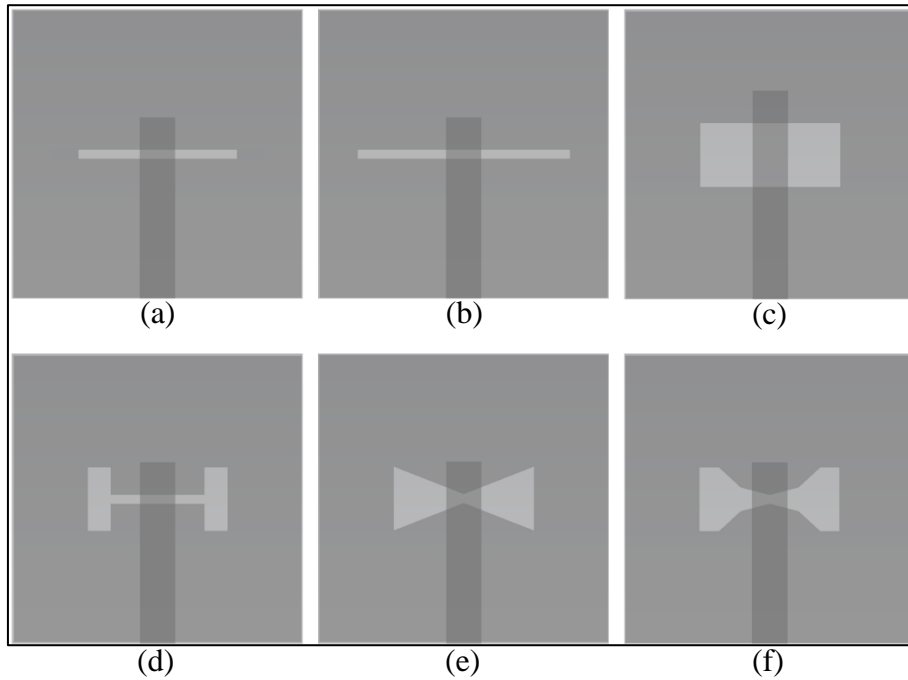
| Tanım | Olması gereken teknik isterler | Hedeflenen teknik isterler |
|--|--------------------------------|-------------------------------|
| Çalışma Frekansı | 3,4 GHz – 3,8 GHz | 3,3 GHz – 4,2 GHz |
| Geri Dönüş Kayıpları (S_{11} , S_{22}) | < -10 dB | < -15 dB |
| Portlar Arası İzolasyon | < -20 dB | < -30 dB |
| HPBW | $65^\circ \pm 5^\circ$ | $65^\circ \pm 5^\circ$ |
| Ön – Arka Işıma Oranı | > 20 dB | > 20 dB |
| Çapraz Kutup Ayrışımı | > 15 dB | > 15 dB |
| Polarizasyon Çeşidi ve Sayısı | $\pm 45^\circ$ Doğrusal, Çift | $\pm 45^\circ$ Doğrusal, Çift |
| Empedans | 50 Ω | 50 Ω |

5. ANTEN TASARIMI VE BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde; başlangıçta farklı yarıık geometrilerinin analizi yapılacaktır. Doğru yarıık geometrisinin seçiminden sonra tek bir yarıığın boyutlandırılması ve anten üzerindeki konumlandırılması yapılarak geri dönüş kaybına etkileri incelenecektir. İlk yarıığın optimizasyonundan sonra ikinci yarıık eklenerek doğru boyutlandırma/konumlandırma yapılarak antenin geri dönüş kayıpları ve portlar arası izolasyonu gözlemlenecektir. Son olarak benzetim ve üretim sonuçlarının karşılaştırmalarına yer verilecektir.

5.1. Farklı Yarıık Geometrilerinin Anten Performansına Etkileri

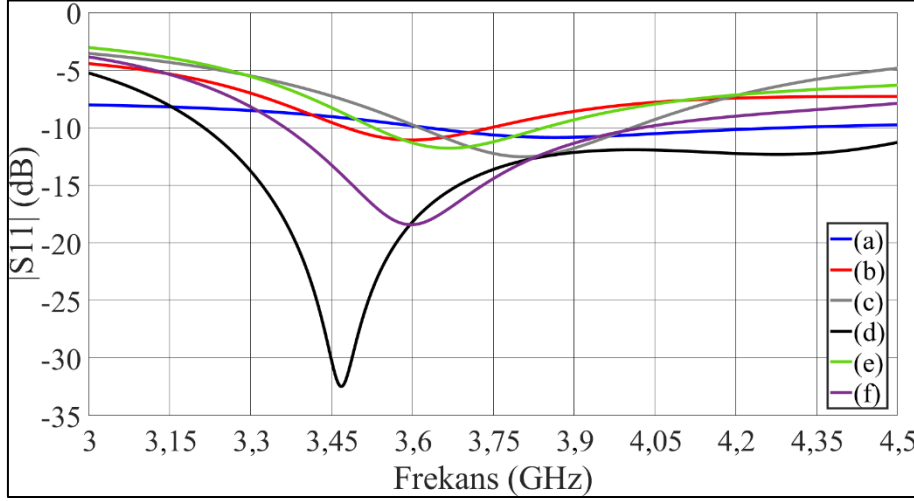
Açıklık bağlantılı yarıık kuplaj beslemelerde, antenin geniş bantlı ve yüksek performanslı olması için yarıık geometrisi önemli bir parametredir. Şekil 3.9.'da gösterilen 6 farklı yama geometrisi mikroşerit hatlar ile benzetim ortamında modellenmiş olup Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı yarıık geometrilerinin benzetim ortamında modellenmesi

Modellenen yarıık geometrilerinin konumu yama elemanının tam merkezindedir ve boyutları Şekil 3.9.'da gösterildiği gibidir. Yama boyutları ve mikroşerit hatların yarığı

geçme miktarı yani koçan uzunlukları aynı olup yarık geometrisinin geri dönüş kaybına etkileri Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.

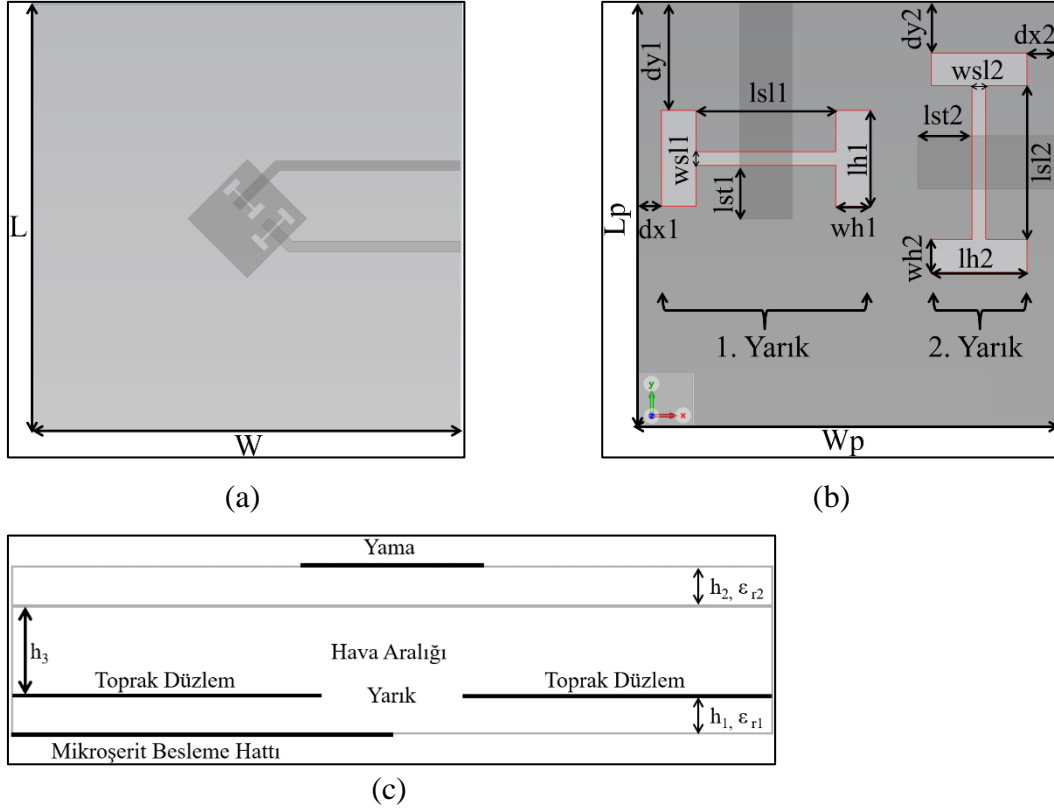


Şekil 5.2. Farklı yarık geometrilerinin geri dönüş kaybı

Şekil 5.2.'de gösterilen farklı yarık geometrilerinin geri dönüş kaybı üzerindeki etkileri incelendiğinde; ince dikdörtgen (a), daha uzun ve ince dikdörtgen (b), kalın dikdörtgen (c), papyon şekilli (e) yarık geometrilerinin, H şekilli (d) ve kum saati şekilli (f) yarık geometrili yama antenlere göre daha dar bir banda sahip olduğu gözlemlenmektedir. $S_{11} < -10$ dB referans alınırsa H şekilli yarık geometrisinin kum saati şekilli yarık geometrisine göre bant genişliğinin çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bu iki yarık geometrisi karşılaştırıldığında H şekilli yarık geometrisinin daha geniş bantlı olduğu görülmektedir. Bu sebeple H şekilli yarık geometrisi üzerinden parametrik analiz yapılarak anten performansı incelenecektir.

5.2. Anten ve Yarık Geometrisi Tasarımı

Açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenler, iki farklı alttaştan oluşur. Aralarında belirli bir hava boşluğu olan iki alttaştın birinde mikroşerit hat ve yarık bulunurken diğer alttaştta yama elemanı bulunur. Bu alttaşlarda, piyasada kolay bulunması, ekonomik ve kolay işlenebilir olması nedeniyle FR4 ($\epsilon_r = 4,3$, $\tan\delta = 0,025$) dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Tasarlanacak olan açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenin geometrik konfigürasyonu Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama anten geometrik yapısının (a) üst görünümü, (b) yama ve yarıklar, (c) yan görünümü

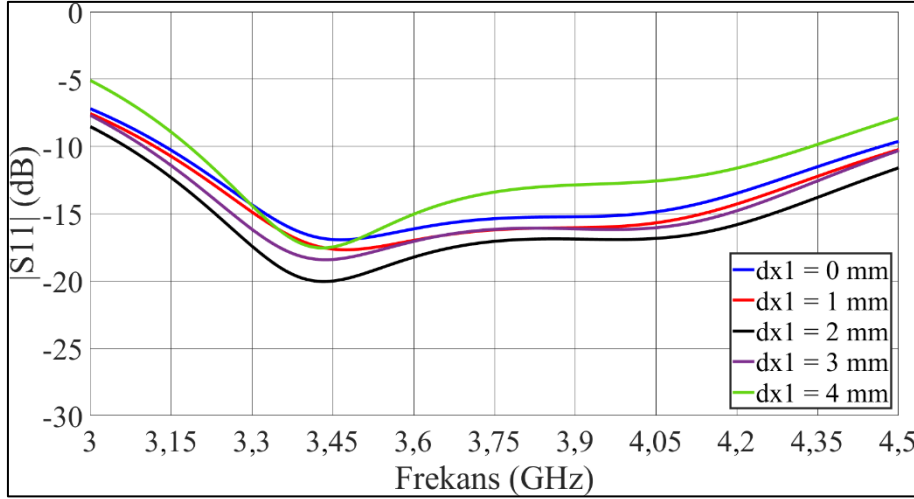
Şekil 5.3.'te gösterilen açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenin fiziksel boyutlarının nominal değerleri ve değer aralıkları Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Önerilen açıklık bağlantılı yarıklı kuplaj beslemeli yama antenin değer aralıkları

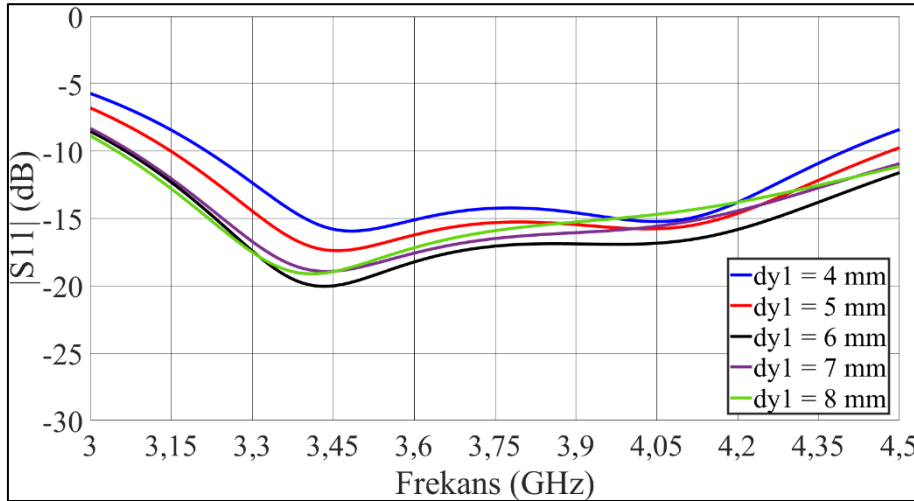
| Tanım | Parametre | Nominal değer (mm) | Değer aralığı (mm) |
|--|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| Toprak düzlem | W x L | 120 x 120 | 80 – 120 |
| Yama | W _p x L _p | 23,75 x 23,75 | - |
| Besleme alttaşı | h1 | 1,524 | - |
| Yama alttaşı | h2 | 1,524 | - |
| Hava aralığı | h3 | 4 | 2 – 6 |
| İlk/ikinci yarığın yamadan uzaklığı (x- ekseninde) | dx1 | 2 | 0 – 4 |
| | dx2 | 2 | 0 – 4 |
| İlk/ikinci yarığın yamadan uzaklığı (y- ekseninde) | dy1 | 6 | 4 – 8 |
| | dy2 | 3 | 0 – 4 |
| İlk/ikinci yarıklı genişliği | wsl1 | 0,75 | 0,25 – 1,25 |
| | wsl2 | 0,75 | 0,25 – 1,25 |
| İlk/ikinci yarıklı uzunluğu | lsl1 | 7,75 | 5,75 – 9,75 |
| | lsl2 | 8,75 | 6,75 – 10,75 |
| İlk/ikinci yarıklı kulak genişliği | wh1 | 1,91 | 1,41 – 2,41 |
| | wh2 | 1,81 | 1,31 – 2,31 |
| İlk/ikinci yarıklı kulak uzunluğu | lh1 | 5,3 | 4,3 – 6,3 |
| | lh2 | 5,3 | 4,3 – 6,3 |
| İlk/ikinci koçan uzunluğu | lst1 | 2,7 | 2,2 – 3,2 |
| | lst2 | 2,6 | 2,1 – 3,1 |

5.3. Birinci Yarığın Anten Üzerinde Konumlandırılması

Bu bölümde, ilk yarığın x - ve y - eksenlerinde yamanın kenarından olan uzaklıklarının anten performansına olan etkileri incelenmiştir. Yarığın x - eksenindeki uzaklığı 0'dan 4 mm'ye ve y - eksenindeki uzaklığı 4 mm'den 8 mm'ye değiştirilerek antenin geri dönüş kaybı ile ilgili parametrik çalışma yapılmıştır. Geri dönüş kayıp grafikleri Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Birinci yarığın x - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi



Şekil 5.5. Birinci yarığın y - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi

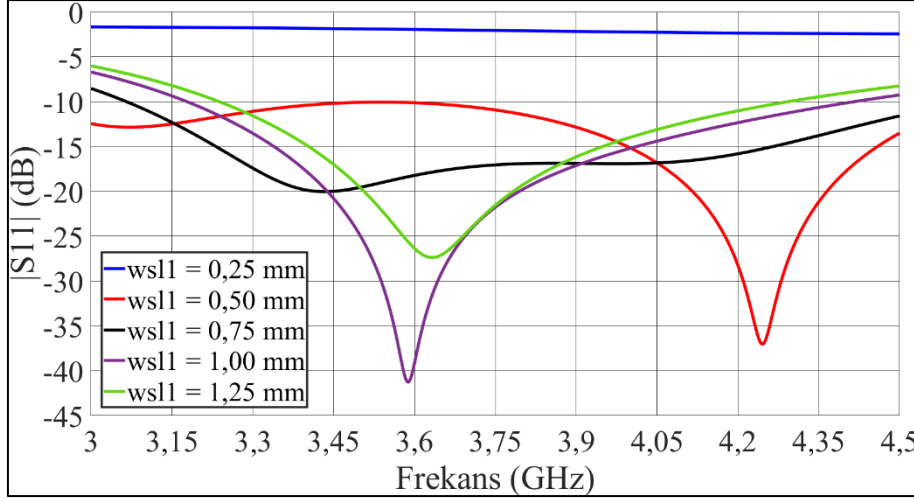
Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te yer alan geri dönüş kaybı grafiklerine göre birinci yarığın antenin kenarına yakın olması ve antenin merkezine doğru yaklaşması bant genişliğini olumsuz etkilemektedir. Diğer uzaklıklar karşılaştırıldığında hedeflenen frekans bandında ve geri dönüş kaybı değerinde $dx1 = 2$ mm, $dy1 = 6$ mm olması uygun görülmüştür.

5.4. Birinci Yarığın Boyutlandırılması

Bu bölümde, yarık genişliği/uzunluğu, yarık kulak genişliği/uzunluğu ve koçan uzunluğu gibi parametrelerin Çizelge 5.1.'deki değer aralıkları ile parametrik çalışma yapılmasıyla geri dönüş kaybı üzerindeki etkileri incelenecektir.

5.4.1. Birinci yarık genişliği

Birinci yarığın genişliğinin (w_{s1}) 0,25 mm ile 1,25 mm değer aralıklarında parametrik çalışması yapılarak geri dönüş kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametrik çalışma Şekil 5.6.'da gösterilmektedir.

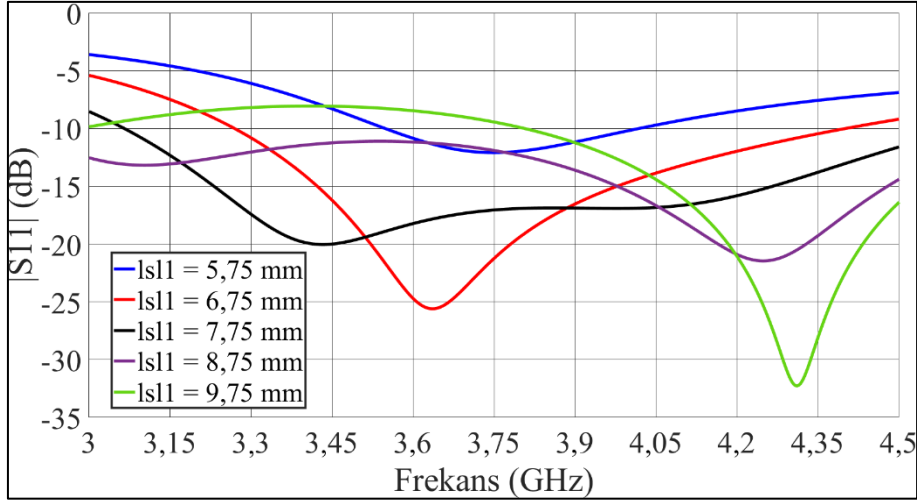


Şekil 5.6. Birinci yarık genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi

Şekil 5.6.'dan da görüldüğü üzere yarık genişliğinin 0,25 mm olmasıyla anten hiçbir şekilde rezonansa girmemektedir. Yarık genişliğinin kademeli olarak artırılmasıyla, yarık rezonans noktasının anten rezonans noktasına yaklaştığı ve antenin geri dönüş kaybı seviyesinin değiştiği gözlemlenmektedir. Bu sebeple, hedeflenen bant genişliğini yarık genişliğinin 0,75 mm olması sağlamaktadır.

5.4.2. Birinci yarık uzunluğu

Bu bölümde, birinci yarık uzunluğunun (l_{s1}) antenin geri dönüş kaybına olan etkisi incelenmiştir. 5,75 mm ile 9,75 mm değer aralıklarında olan birinci yarık uzunluğunun parametrik analizi Şekil 5.7.'de gösterilmiştir.

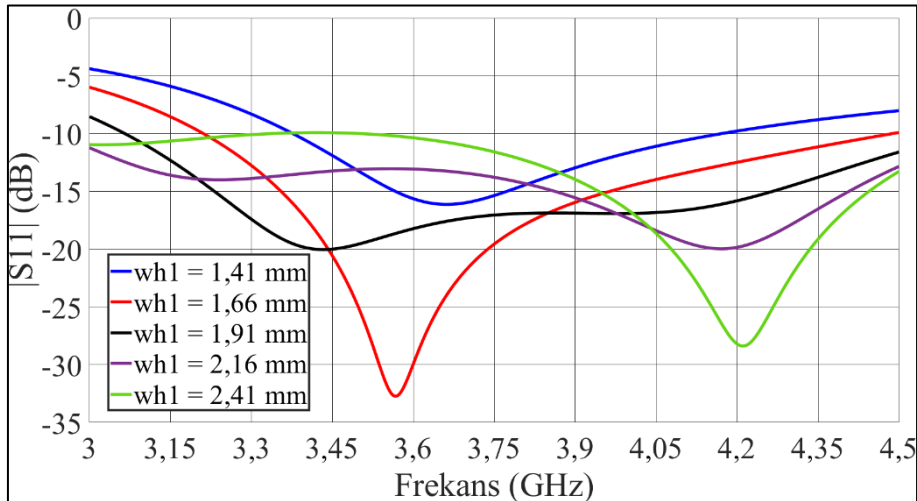


Şekil 5.7. Birinci yarık uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi

Şekil 5.7.'de yarık genişliğinin tam aksine yarık uzunluğunun artmasıyla yarık rezonans noktasının anten rezonans noktasından uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 5.7.'ye göre en geniş bant genişliğine sahip yarık uzunluğu 8,75 mm olmasına rağmen çalışma frekansında geri dönüş kaybının -15 dB'den düşük olması hedeflenmektedir. Bu sebeple yarık uzunluğunun 7,75 mm olması hedeflenen teknik isterleri sağlamaktadır.

5.4.3. Birinci yarık kulak genişliği

Bu analizde, 1,41 mm ile 2,41 mm değer aralıklarında birinci yarık kulak genişliğinin (wh1) geri dönüş kaybı ve bant genişliği üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu etkiler Şekil 5.8.'de verilmiştir.

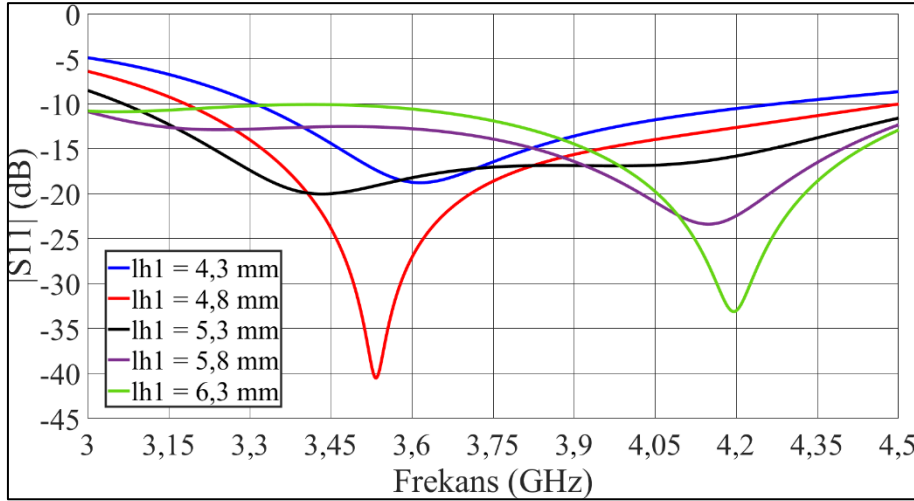


Şekil 5.8. Birinci yarık kulak genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi

Şekil 5.8.'de, birinci yarık kulak genişliğinin artmasıyla yarığın rezonansa girdiği frekans değeri azalmakta ve antenin rezonans nokta seviyesi olumlu yönde değişmektedir. Bunun sebebi ise, birinci yarık kulak genişliğinin, H şekilli yarığın toplam uzunluğunu etkilemesidir. Bütün yarık kulak genişliği değerleri göz önünde bulundurulduğunda 1,91 mm değeri bütün hedefleri sağlamaktadır.

5.4.4. Birinci yarık kulak uzunluğu

Bu bölümde birinci yarık kulak uzunluğunun (lh_1) anten performansına olan etkileri verilmiştir. Yarık kulak uzunluğunun 4,3 mm ve 6,3 mm değerleri arasında değiştirilmiş ve bu değerlerin sonuçları Şekil 5.9.'da verilmiştir.

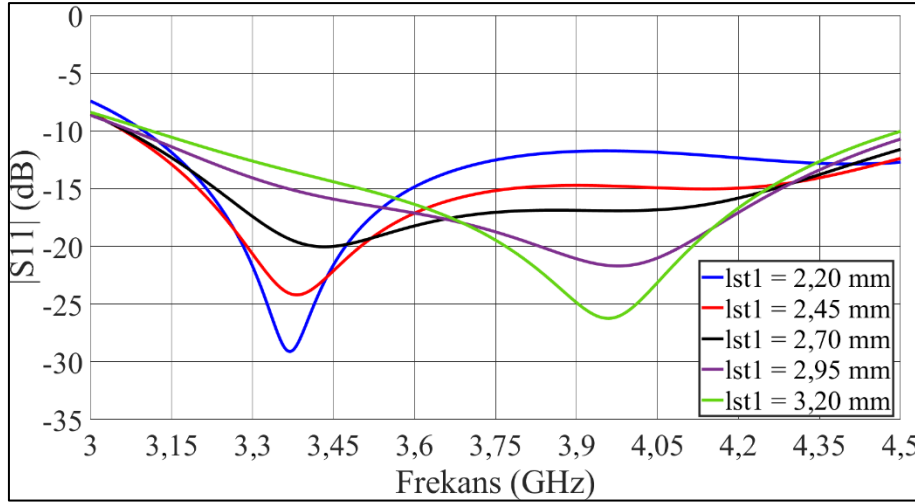


Şekil 5.9. Birinci yarık kulak uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi

Şekil 5.9.'da, yarık kulak genişliğinde olduğu gibi yarık kulak uzunluğunun artmasıyla yarık rezonansının yama rezonansından uzaklaştığı görülmektedir. Hedeflenen bant genişliği ve geri dönüş kaybı değeri için bu iki rezonans noktasının birbirlerine optimum uzaklıkta olması gerekmektedir. Şekil 5.9.'dan da görüleceği üzere bu optimum uzaklık birinci yarık kulak uzunluğunun 5,3 mm olmasıyla sağlanmaktadır.

5.4.5. Birinci koçan uzunluğu

Bu çalışmada, birinci koçan uzunluğunun (l_{st1}) antenin bant genişliğine ve geri dönüş kaybı değerine etkileri incelenmektedir. 2,20 mm ile 3,20 mm arasında değişen birinci koçan uzunluğunun parametrik analizi şekilde gösterilmiştir.

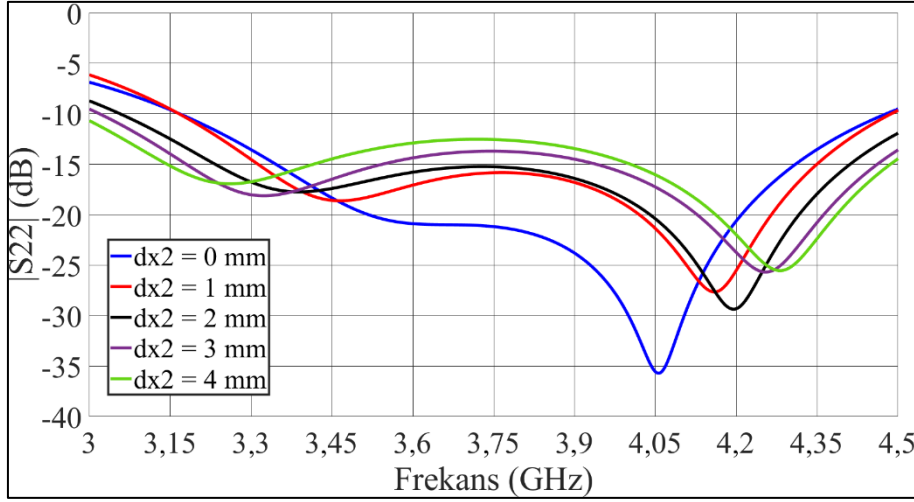


Şekil 5.10. Birinci koçan uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi

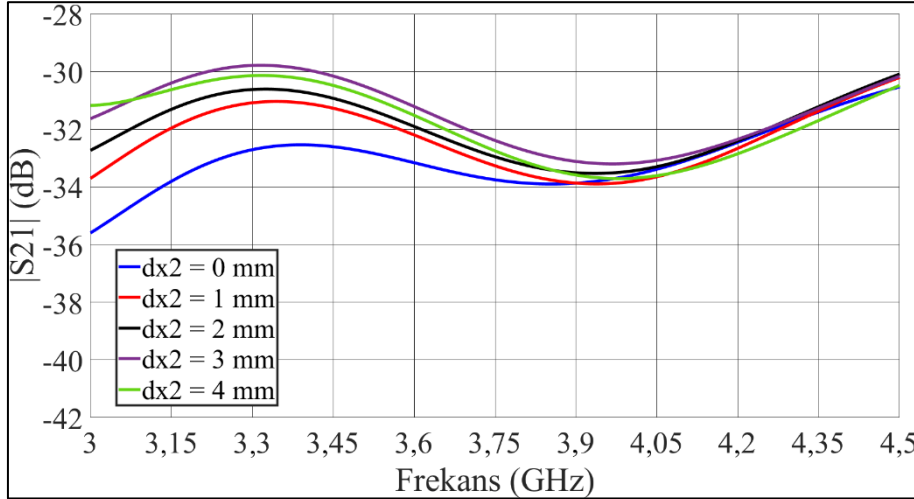
Koçan uzunluğu, bu tür antenlerde reaktansı dengelemek, yani antenin empedans uyumunu ayarlamak için kullanılan bir parametredir. Şekil 5.10.'dan da görüldüğü üzere birinci koçan uzunluğu, yarık ve yamanın geri dönüş kaybı seviyelerini değiştirmesinin yanı sıra sadece yamanın rezonansa girdiği frekansı değiştirmektedir. Hedeflenen bant genişliği ve geri dönüş kaybı değeri göz önünde bulundurulduğunda birinci koçan uzunluğunun 2,70 mm olması bütün hedefleri sağlamaktadır.

5.5. İkinci Yarığın Anten Üzerinde Konumlandırılması

İlk yarığın anten üzerinde konumlandırılması ve boyutlandırılması yapılarak hedeflenen teknik isterler sağlanmıştır. Bu bölümde, ikinci yarığın x - ve y - eksenlerinde yamanın kenarından olan uzaklıklarının anten performansına olan etkileri incelenmiştir. Başlangıç olarak yarığın x - eksenindeki uzaklığı 0'dan 4 mm'ye değiştirilmesiyle antenin geri dönüş kaybı ve portlar arası izolasyonu ile ilgili parametrik analiz yapılmıştır. Antenin geri dönüş kaybı ve portlar arası izolasyon grafikleri Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de verilmiştir.



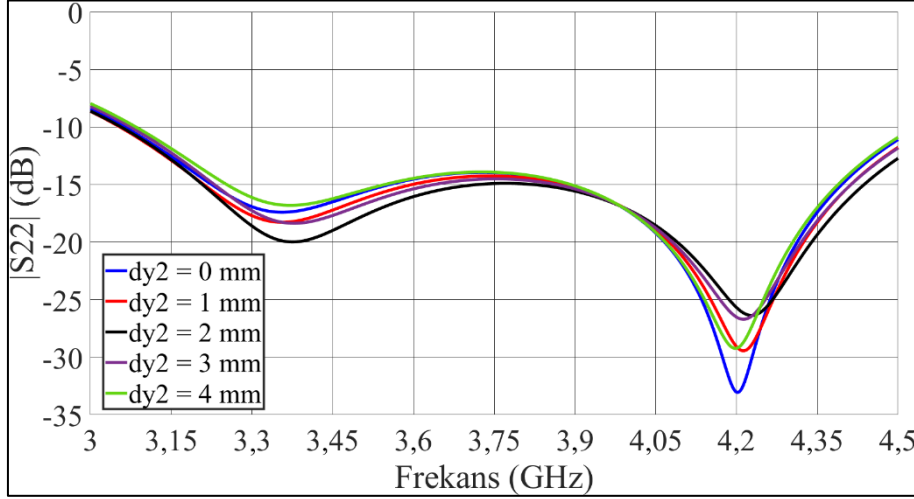
Şekil 5.11. İkinci yarığın x - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi



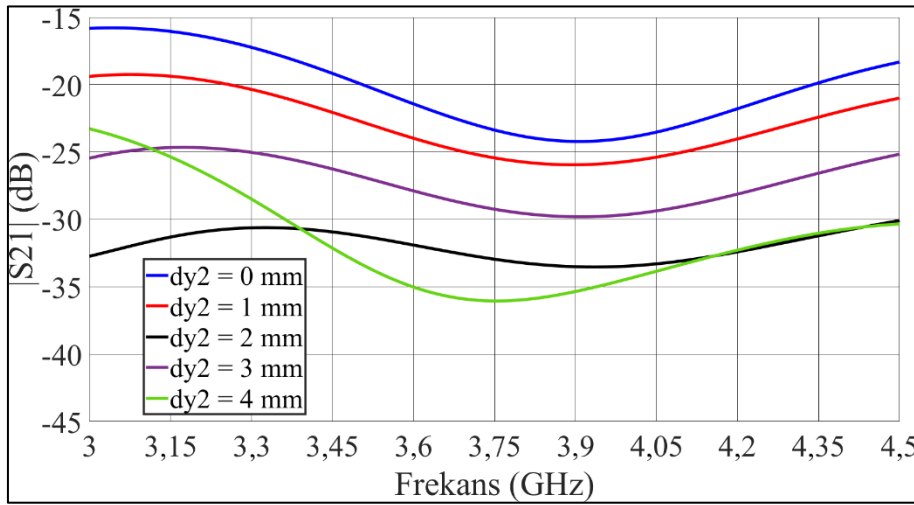
Şekil 5.12. İkinci yarığın x - ekseninde antene uzaklığının portlar arası izolasyona etkisi

Şekil 5.11.'de geri dönüş kaybı grafiğine göre ikinci yarığın antenin x - eksenindeki kenarına yakın olması bandı daraltmıştır. Yarığın, antenin x - eksenindeki kenarından uzaklaştıkça yarığın ve yamanın rezonans noktaları birbirinden uzaklaşmış ve geri dönüş kaybı -15 dB'nin üzerinde çıkmıştır. Şekil 5.12.'de ise x - ekseninde iki yarığın arasındaki mesafe portlar arası izolasyonu önemli ölçüde değiştirmede gözlemlenmiştir. Hedeflenen teknik istekleri sağlaması açısından, ikinci yarığın x - ekseninde antenden uzaklığı 2 mm olarak tercih edilmiştir.

İkinci yarığın antenin y - eksenindeki kenarına olan uzaklığının geri dönüş kaybı ve portlar arası izolasyona etkisi Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'te incelenmiştir.



Şekil 5.13. İkinci yarığın y - ekseninde antene uzaklığının geri dönüş kaybına etkisi



Şekil 5.14. İkinci yarığın y - ekseninde antene uzaklığının portlar arası izolasyona etkisi

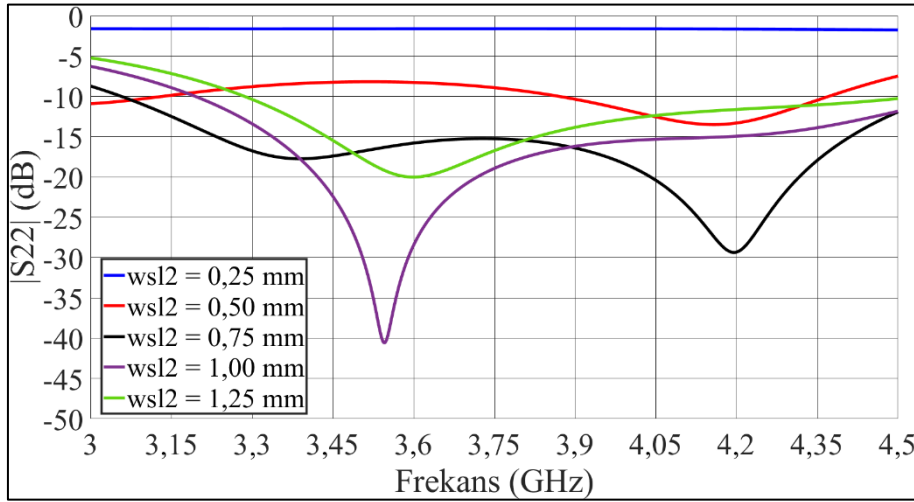
Şekil 5.13.'te ikinci yarığın y - ekseninde antenden olan uzaklığının geri dönüş kaybına neredeyse hiçbir etkisi olmamasına rağmen portlar arası izolasyona büyük ölçüde etki etmiştir. Şekil 5.14.'ten de görüleceği üzere iki yarığın y - ekseninde örtüşmesi, yani dik (ortogonal) olması portlar arası izolasyonu iyileştirmektedir. İki yarığın y - ekseninde birbirinden uzaklaşması portlar arası izolasyonu bozmaktadır. İkinci yarığın y - ekseninde antenden 2 mm uzak olması hem geri dönüş kaybında hem de portlar arası izolasyonda hedefleri sağlamaktadır.

5.6. İkinci Yarığın Boyutlandırılması

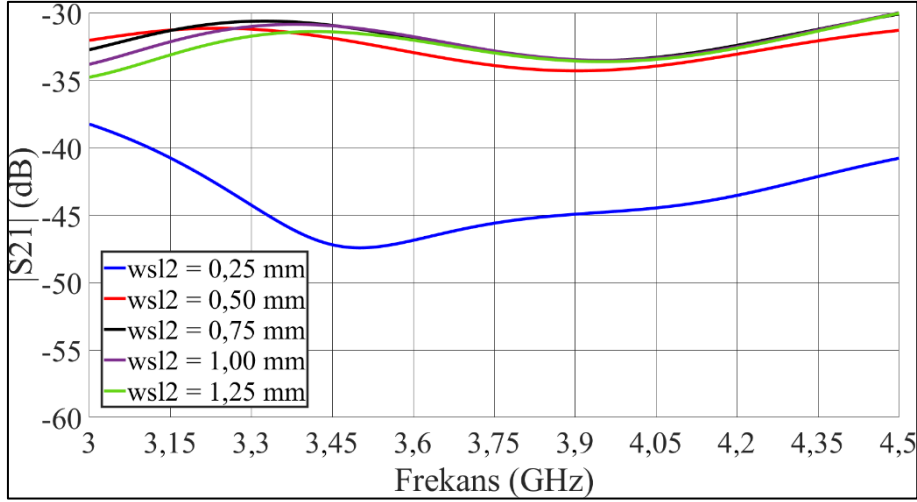
Bu bölümde, birinci yarığın boyutlandırılmasında olduğu gibi yarık genişliği, uzunluğu, yarık kulak genişliği, uzunluğu ve koçan uzunluğu gibi parametrelerin Çizelge 5.1.'deki değer aralıkları ile parametrik analiz yapılarak antenin geri dönüş kaybı ve portlar arası izolasyonu üzerindeki etkileri incelenecektir.

5.6.1. İkinci yarık genişliği

Bu bölümde, ikinci yarığın genişliğinin (w_{s2}) 0,25 mm ile 1,25 mm değer aralıklarında parametrik çalışması yapılarak geri dönüş kaybı ve portlar arası izolasyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametrik çalışma Şekil 5.15. ve Şekil 5.16.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.15. İkinci yarık genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi

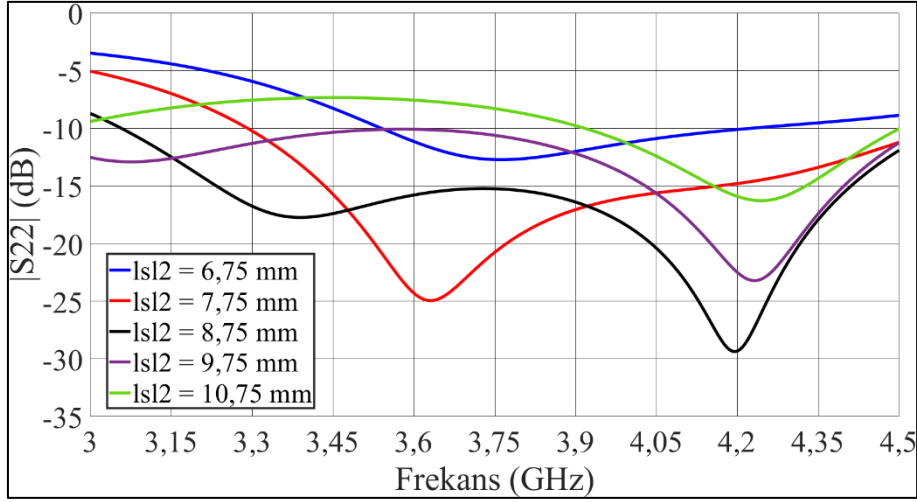


Şekil 5.16. İkinci yarık genişliğinin portlar arası izolasyona etkisi

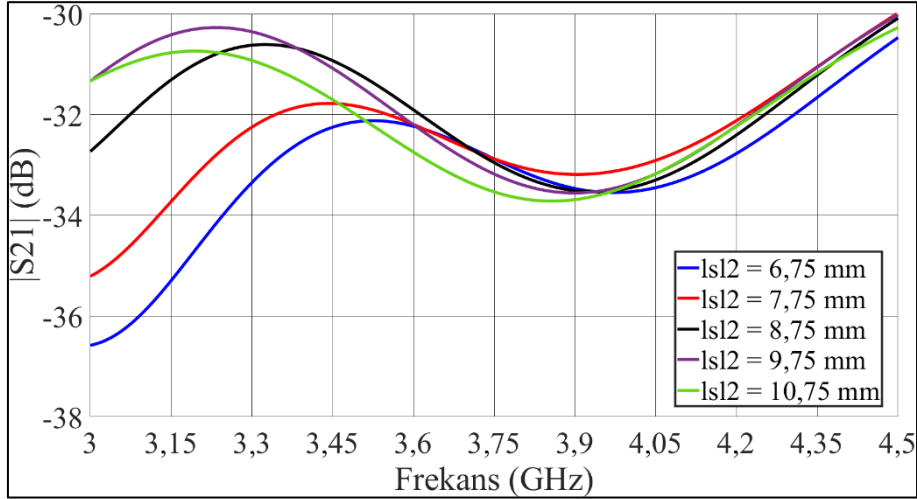
Şekil 5.15.'te görüldüğü üzere yarık genişliğinin 0,25 mm olmasıyla anten hiçbir şekilde rezonansa girmemektedir. Yarık genişliğinin artırılmasıyla, yarık rezonans noktasının anten rezonans noktasına yaklaştığı ve antenin geri dönüş kaybı seviyesinin değiştiği gözlemlenmektedir. Şekil 5.16.'da portlar arası izolasyon incelendiğinde ise 0,25 mm yarık genişliğinde anten rezonansa giremediği için portlar arası herhangi bir etkileşim bulunmamaktadır. Etkileşim olmadığı için de izolasyon düşük bir seviyededir. Bu sebeple, bant genişliğini, geri dönüş kaybı seviyesini ve portlar arası izolasyon değerini sağladığı için yarık genişliğinin 0,75 mm olması uygun görülmektedir.

5.6.2. İkinci yarık uzunluğu

İkinci yarık uzunluğunun (l_{s2}) antenin geri dönüş kaybına ve portlar arası izolasyona olan etkisi incelenmiştir. İkinci yarık uzunluğunun değer aralığı 6,75 mm ile 10,75 mm olarak seçilmiş ve ikinci yarık uzunluğunun parametrik çalışması Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. İkinci yarık uzunluğunu geri dönüş kaybına etkisi

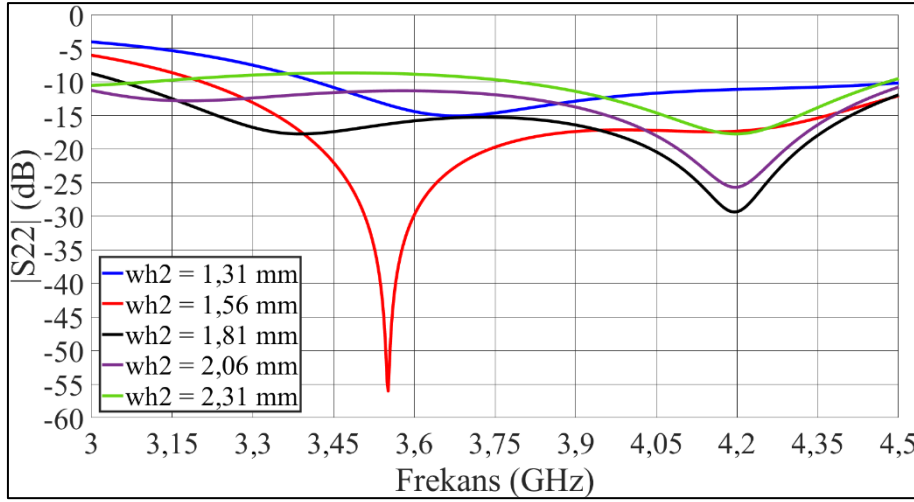


Şekil 5.18. İkinci yarık uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi

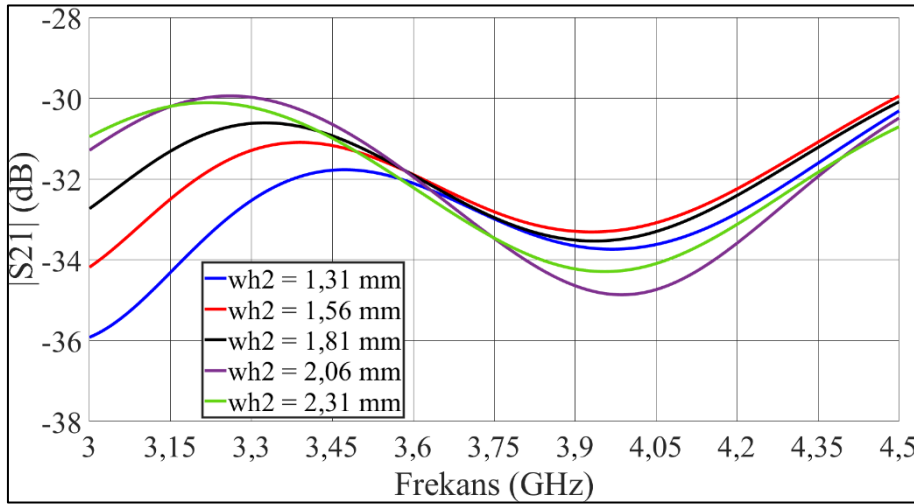
Şekil 5.17.'de, yarık genişliğinin tam aksine yarık uzunluğunun artmasıyla yarık rezonans noktasının anten rezonans noktasından uzaklaştığı görülmektedirken, Şekil 5.18.'de yer alan ikinci yarık uzunluğunun portlar arası izolasyona neredeyse hiçbir etkisi olmadığı görülmektedir. Şekil 5.17.'de yer alan geri dönüş kayıpları arasında, en geniş bant genişliğine sahip yarık uzunluğu 9,75 mm olmasına rağmen çalışma frekansında geri dönüş kaybının -15 dB'den düşük olması hedeflenmektedir. Bu sebeple yarık uzunluğunun 8,75 mm olması hedeflenen teknik isterleri sağlamaktadır.

5.6.3. İkinci yarık kulak genişliği

Bu bölümde, ikinci yarık kulak genişliğinin (wh_2) 1,31 mm ile 2,31 mm değer aralıklarının geri dönüş kaybına ve portlar arası izolasyon üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu etkiler Şekil 5.19. ve Şekil 5.20.'de verilmiştir.



Şekil 5.19. İkinci yarık kulak genişliğinin geri dönüş kaybına etkisi



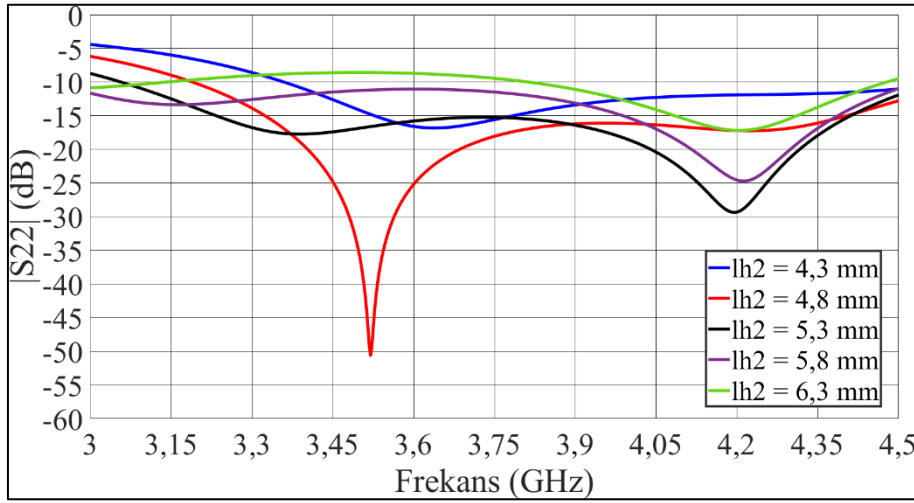
Şekil 5.20. İkinci yarık kulak genişliğinin portlar arası izolasyona etkisi

Şekil 5.19.'a göre ikinci yarık kulak genişliğinin artmasıyla yarığın rezonans noktasının frekansı düşmektedir. Bunun sebebi, yarık kulak genişliğinin yarığın toplam uzunluğunu artırmasıdır. İkinci yarık kulak genişliğinin portlar arası izolasyona neredeyse hiçbir etkisinin olmadığı Şekil 5.20.'de gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, hedeflenen bant

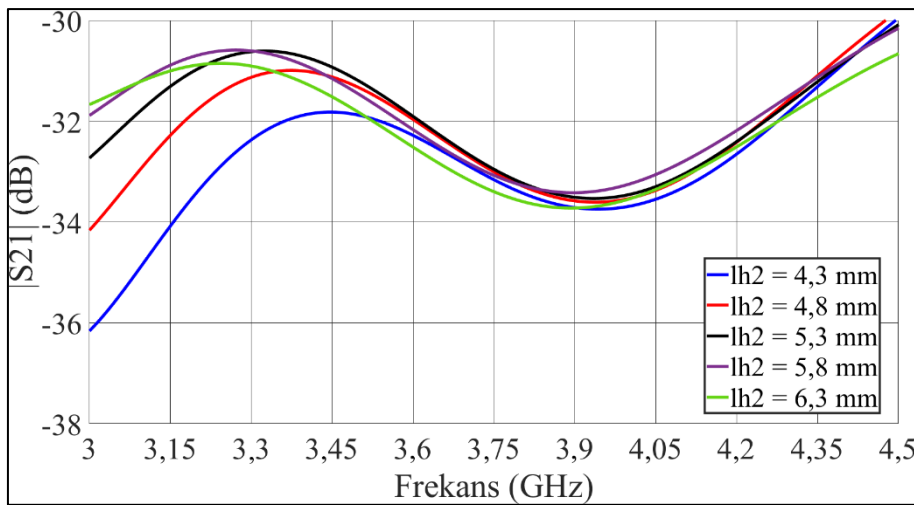
genişliği ve geri dönüş kaybı seviyesi dikkate alındığında 1,81 mm genişlik değerinin uygun olduğu görülmektedir.

5.6.4. İkinci yarık kulak uzunluğu

Bu parametrik analizde ikinci yarık kulak uzunluğunun (lh_2) geri dönüş kaybına ve portlar arası izolasyona ne kadar etki ettiği incelenmektedir. Yarık kulak uzunluğu 4,3 mm ve 6,3 mm değerleri arasında seçilmiş ve bu uzunlukların etkileri şekil 5.21. ve şekil 5.22.'de verilmektedir.



şekil 5.21. İkinci yarık kulak uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi

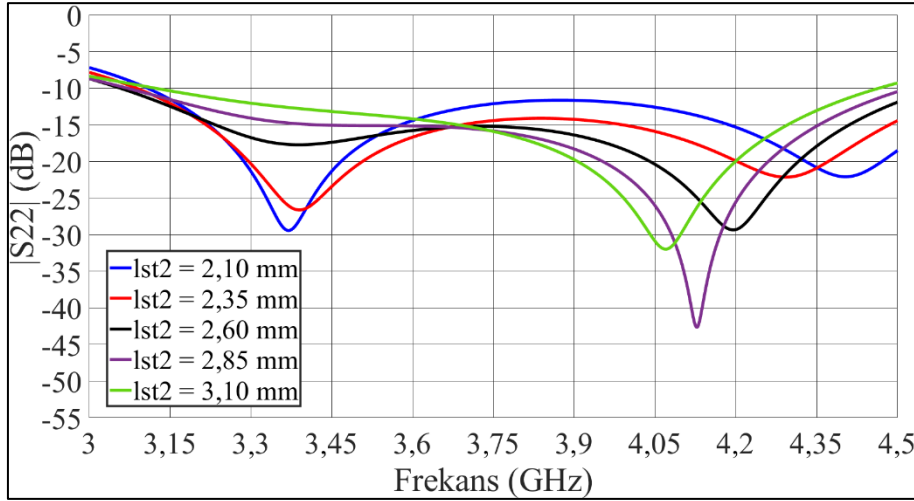


şekil 5.22. İkinci yarık kulak uzunluğunun portlar arası izolasyona etkisi

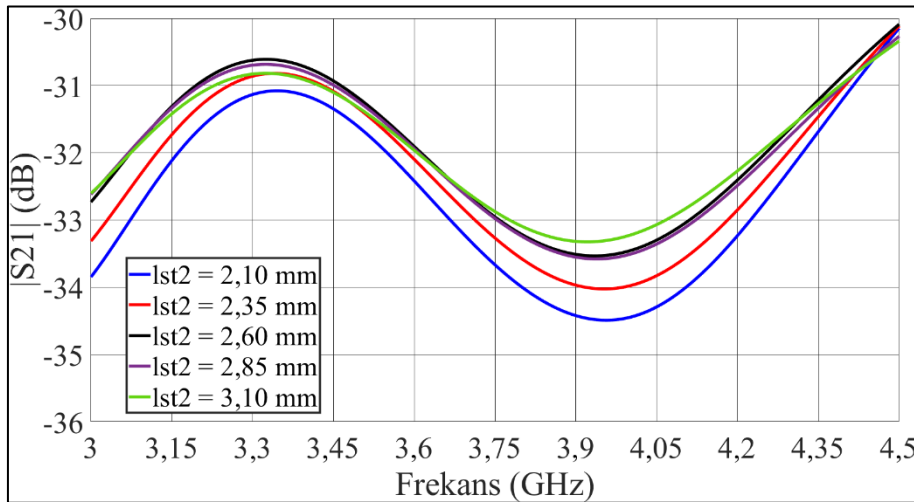
Şekil 5.21.'de, yarık kulak uzunluğu da yarık kulak genişliği gibi H şekilli yarığın toplam boyutunu artırmış ve kulak uzunluğunun artırılmasıyla yarık rezonansa girdiği frekans değerinin düştüğü görülmektedir. Şekil 5.22.'de ise portlar arası izolasyona hiçbir etkisi olmayan ikinci yarık uzunluğunun en iyi çalıştığı uzunluk değerinin 1,81 mm olduğu görülmektedir.

5.6.5. İkinci koçan uzunluğu

Bu analizde, değer aralığı 2,10 mm ile 3,10 mm arasında olan ikinci koçan uzunluğunun (l_{st2}) antenin bant genişliğine, geri dönüş kaybı değerine ve portlar arası izolasyonuna olan etkileri incelenmektedir. Bu inceleme Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'te verilmiştir.



Şekil 5.23. İkinci koçan uzunluğunun geri dönüş kaybına etkisi

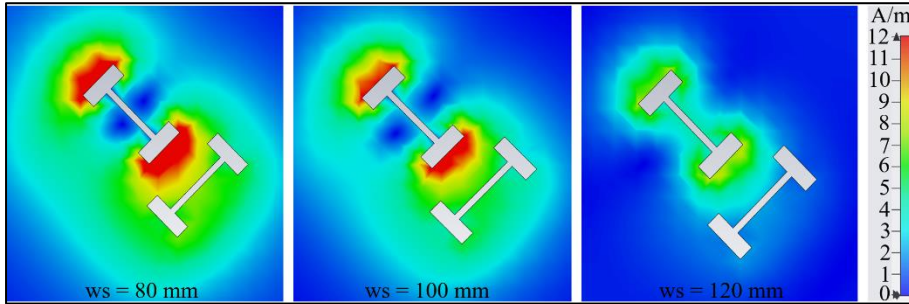


Şekil 5.24. İkinci koçan uzunluğunun portlar arası izolasyona etkisi

Birinci koçan uzunluğunda olduğu gibi ikinci koçan uzunluğu da açıklık beslemeli yarıklı kuplaj beslemeli yama antenin reaktansını değiştirmektedir. Şekil 5.23.'te görüldüğü üzere ikinci koçan uzunluğu, yamanın reaktans değişimine bağlı olarak sadece yamanın rezonansa girdiği frekansı ve H şekilli yarıklı ile yamanın geri dönüş kaybı seviyelerini değiştirmektedir. Şekil 5.24.'te, portlar arası izolasyona etkisi olmayan ikinci koçan uzunluğu değeri, hedeflenen bant genişliği ve geri dönüş kaybı değeri göz önünde bulundurulduğunda 2,60 mm olarak seçilmiştir.

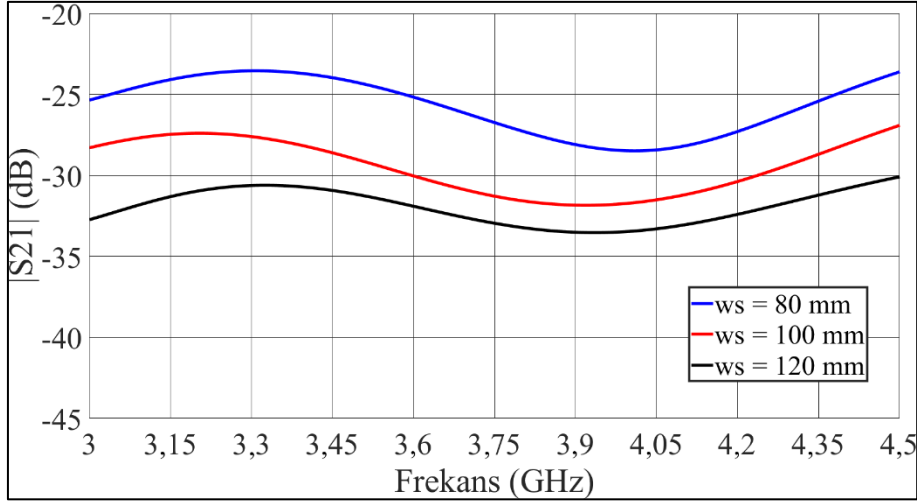
5.7. Toprak Düzlem Boyutlarının Geriye Doğru Yansımaya Etkisi

Bu analizde, açıklık bağlantılı yarıklı kuplaj ile beslemeli yama antenin en büyük problemlerinden biri olan geriye doğru yansımanın azaltılması ile ilgili çalışma yapılacaktır. Bunun için toprak düzlemin boyutları değiştirilecek olup bu boyutlar sırasıyla 80 mm, 100 mm ve 120 mm olarak seçilmiştir. İlk olarak birinci H şekilli yarıklı üzerindeki yüzey akım yoğunluklarına bakılacaktır. Yüzey akım yoğunlukları Şekil 5.25.'te gösterilmiştir.



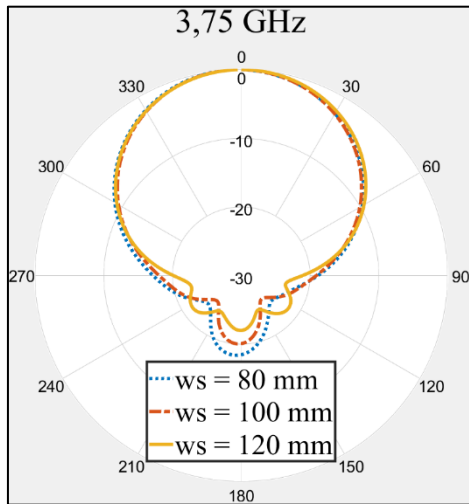
Şekil 5.25. Farklı toprak düzlem boyutlarında birinci yarıklı üzerindeki akım yoğunluğu

Şekil 5.25.'te görüldüğü gibi farklı toprak düzlemi boyutlarında birinci yarığın üzerinde oluşan ve çevresinde oluşturduğu yüzey akımları gösterilmiştir. Birinci yarıklı üzerinde oluşan yüzey akımlarının en fazla yoğun olduğu bölge yarıklı kulak bölgesidir. 80 mm boyutlu toprak düzleminde yarıklı kulak bölgesinde oluşan yüzey akım yoğunluğu en fazladır ve bu oluşan yüzey akımları ikinci yarığın da fazlasıyla etkilemektedir. Şekil 5.25.'ten de görüleceği üzere toprak düzleminin boyutunun artırılmasıyla birinci yarıklı kulak bölgesinde ve ona bağlı ikinci yarıklı bölgesinde oluşan yüzey akımları azalmaktadır. Oluşan bu yüzey akımlarının portlar arası izolasyona olan etkisi Şekil 5.26.'da verilmiştir.



Şekil 5.26. Farklı toprak düzlem boyutlarının portlar arası izolasyona etkisi

Şekil 5.26.'da, farklı boyutlarda olan toprak düzleminin portlar arası izolasyona olan etkisi gösterilmiştir. Şekil 5.25.'te iki yarık üzerinde oluşan yüzey akımlarının portlar arası izolasyonu direkt etkilediği Şekil 5.26.'da gözlemlenmiştir. Farklı boyutlardaki toprak düzleminin, yüzey akım yoğunluğuna ve portlar arası izolasyona olan etkileri inceledikten sonra benzetim ortamında merkez frekans olan 3,75 GHz'deki yarım güç hüzme genişliğine olan etkileri Şekil 5.27.'de incelenecektir.



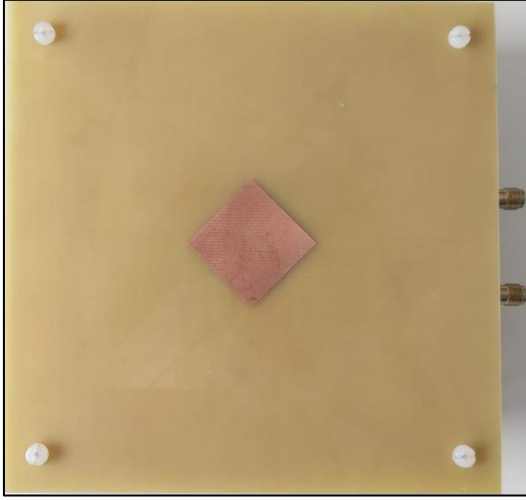
Şekil 5.27. Farklı toprak düzlem boyutlarının yarım güç hüzme genişliğine etkisi

Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da toprak düzlem boyutunun artırılmasıyla hem iki yarık üzerinde oluşan yüzey akımlarının azaldığı, hem de yüzey akımlarının azalmasına bağlı olarak portlar arası izolasyonun düzeldiği görülmüştür. Şekil 5.27.'de ise toprak düzlem

boyutunun yarım güç hüzmeye genişliğini kayda değer şekilde etkilemediği fakat ön – arka oranı olan FBR’yi değiştirdiği gözlemlenmiştir. Toprak düzlem boyutunun artırılmasıyla FBR değerinin de iyileştiği Şekil 5.27.’de görülmüştür. Bu sebeple; 120 mm boyutlu toprak düzleminin Çizelge 4.4.’te yer alan portlar arası izolasyon ve FBR değerlerini sağladığı Şekil 5.26. ve Şekil 5.27.’de gözlemlenmiştir. Sonuç olarak FBR iyileştirmesi için antenin toplam yüksekliğini artıran arka – boşluk destekli yapı kullanılmamıştır.

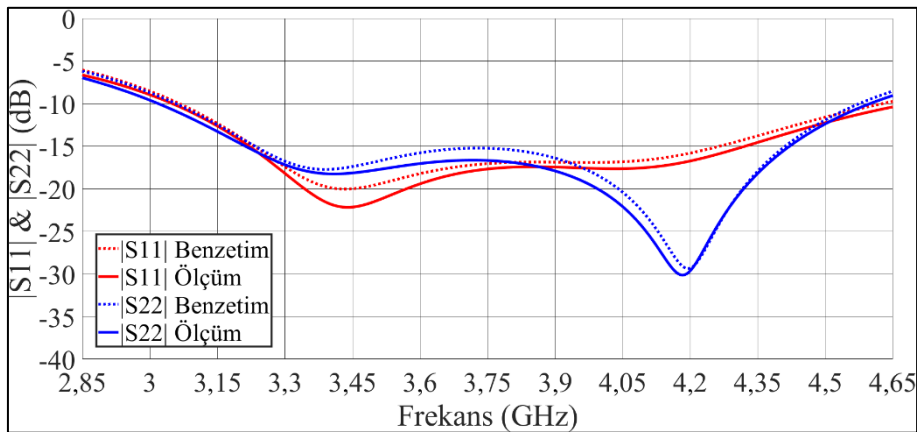
6. ÖNERİLEN ANTENİN ÜRETİMİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu çalışmada, Bölüm 5.'te önerilen açıklık bağlantılı yarı kuplaj beslemeli yama antenin Çizelge 4.4.'e göre parametrik analizi yapılmış ve Çizelge 5.1.'deki nominal değerleri bulunmuştur. Bu değerlere göre önerilen antenin üretimi yapılmıştır.

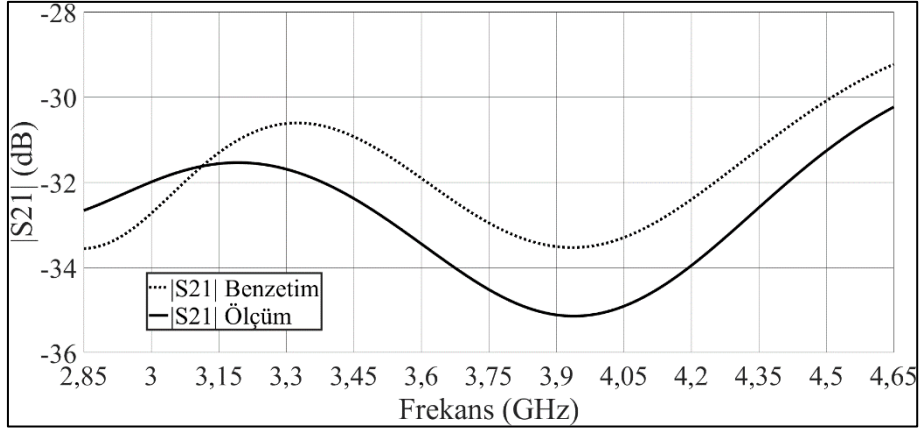


Şekil 6.1. Prototip anten

Şekil 6.1.'deki prototip antenin S-parametreleri ölçümü HP8720D analizörü ile yapılmıştır. Benzetim ortamında tasarlanan ve prototip antenin S-parametreleri karşılaştırılması Şekil 6.2.'de verilmiştir.



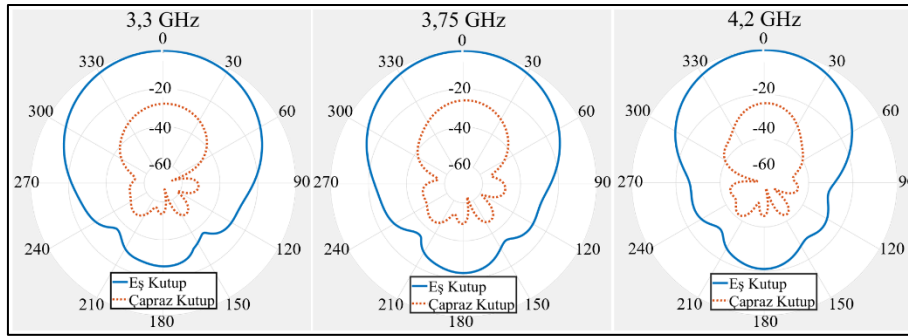
(a)



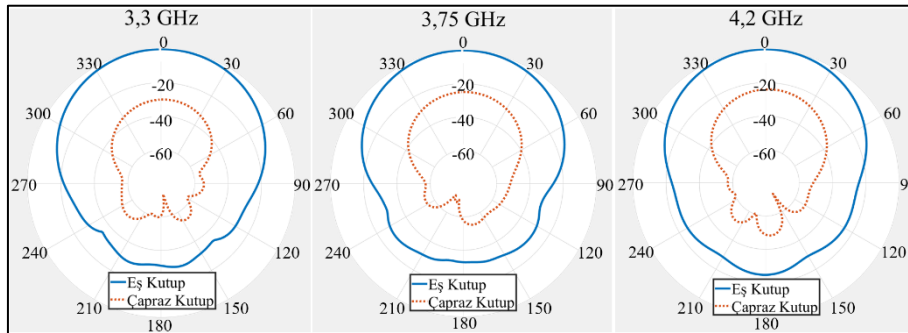
(b)

Şekil 6.2. Önerilen antenin benzetim ve ölçüm S-parametre sonuçları (a) geri dönüş kaybı, (b) portlar arası izolasyon

Anten ölçümleri 3,3 GHz – 4,2 GHz çalışma bandında geri dönüş kayıplarının S_{11} , $S_{22} < -15$ dB, izolasyonunun da $S_{21} < -30$ dB olduğunu göstermektedir.



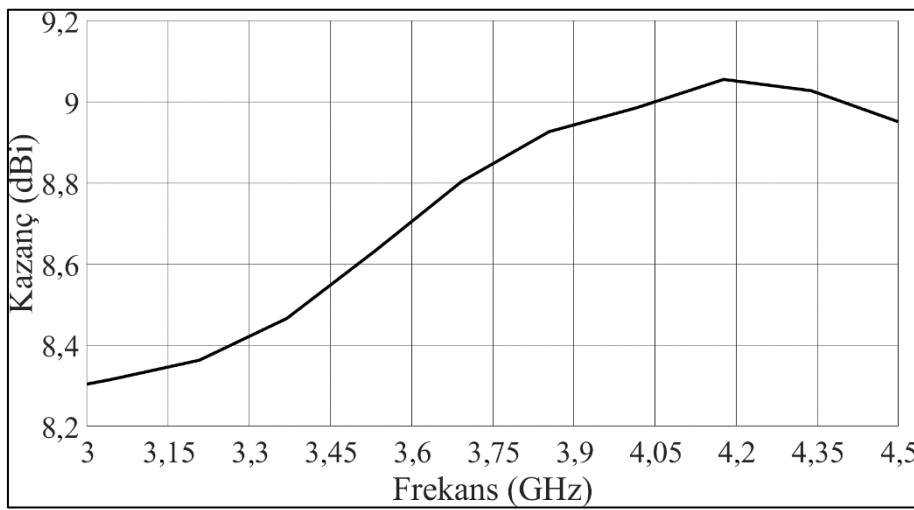
(a)



(b)

Şekil 6.3. Üretimi yapılan antenin yankısız oda ölçümleri (a) dikey ekseninde, (b) yatay ekseninde

Şekil 6.3.'te üretimi yapılan antenin yankısız odada bandın başında (3,3 GHz), ortasında (3,75 GHz) ve sonunda (4,2 GHz) olmak üzere HPBW ve XPD ölçümleri verilmiştir. 3,3 GHz – 4,2 GHz çalışma bandında, dikey ekseninde HPBW ölçümleri $64^\circ - 56^\circ$ arasında, yatay ekseninde ise $66^\circ - 60^\circ$ arasında olduğu görülmektedir. Şekil 6.3.'e göre üretilen antenin çalışma bandında kararlı ve simetrik olduğu görülmesinin yanı sıra $FBR > 20$ dB, $\pm 30^\circ$ ışına doğrultusunda $XPD > 24$ dB olarak ölçülmüştür. Antenin yankısız oda ölçümlerinin Çizelge 4.4.'teki hedeflenen teknik isterleri sağladığı görülmektedir. Son olarak, Şekil 6.4.'te ise üretilen antenin kazanç grafiği verilmiştir.



Şekil 6.4. Üretimi yapılan antenin kazanç ölçümü

Şekil 6.4.'ten de görüleceği üzere anten kazancı frekans bandının başında 8,42 dBi, ortasında 8,83 dBi ve sonunda ise 9,05 dBi olarak ölçülmüştür. Ölçülen kazanç değerlerinin, Şekil 6.3.'te HPBW ölçümleri ile uyumlu olduğu ve üretilen açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yamanın yüksek kazançlı bir anten olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1.'de, önerilen çalışma ve literatürde bulunan benzer diğer çalışmaların karşılaştırmaları verilmiştir. Karşılaştırma tablosunda sırasıyla yarık kuplajlı yama [40-42], uç beslemeli yama [43] ve uç beslemeli çapraz dipol [44] gibi yapılar bulunmaktadır. Çizelge 6.1.'den de görüleceği üzere önerilen çalışma 7.1 mm yükseklik ile en düşük profilli anten olup, bant genişliği olarak da en geniş banda sahip antendir.

Çizelge 6.1 Önerilen çalışmanın benzer çalışmalar ile karşılaştırması

| Kaynaklar | Anten tipi | Bant genişliği (GHz; %) | S_{11} , S_{22} (dB) | S_{21} (dB) | FBR (dB) | Yükseklik (mm) |
|------------------|---------------------------|--|-----------------------------|---------------|-------------|-------------------|
| [40] | Yarık kuplajlı yama | 3,30 – 3,80; 14,1% | < -10 | < -20 | > 25 | 37,2 |
| [41] | Yarık kuplajlı yama | 3,40 – 3,80; 17,1% | < -10 | < -20 | > 20 | 34 |
| [42] | Yarık kuplajlı yama | 3,23 – 3,80; 16,2% | < -10 | < -50 | > 10 | 10 |
| [43] | Uç beslemeli yama | 3,14 – 4,58; 37,3% | < -10 | < -38,5 | > 12,5 | 12,7 |
| [44] | Uç beslemeli çapraz dipol | 3,13 – 4,42; 34,1% | < -10 | < -23 | > 5 | 30 |
| Önerilen çalışma | Yarık kuplajlı yama | 3,05 – 4,60; 40,5% 3,21 – 4,32; 29,5% | < -10 < -15 | < -30 | > 20 | 7,1 |

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 6 GHz altı frekans bölgesinde küreseldeki tüm olası 5G bantları için kullanılacak ekonomik, çift kutuplu ($\pm 45^\circ$ doğrusal polarizasyon), düşük profilli ve geniş bantlı (3,3 GHz – 4,2 GHz) bir açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama anten tasarımı sunulmuştur. Anten tasarım sürecinin başlangıcında, farklı şekillerdeki yarık geometrileri simülasyon ortamında modellenmiş ve performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, en iyi performansa sahip olan H şekilli yarık geometrisi tercih edilmiştir.

Tasarlanan antenin hedeflenen temel teknik isterleri; geri dönüş kayıpları (S_{11} , $S_{22} < -15$ dB), portlar arası izolasyon ($S_{12} = S_{21} < -30$ dB), HPBW = $65^\circ \pm 5^\circ$, FBR > 20 dB ve XPD > 15 dB olarak belirlenmiştir. Farklı yarık geometrilerinin analiz edilmesinden sonra, ilk olarak H şekilli yarığın boyutlandırılması ve anten üzerindeki konumlandırılması yapılmıştır. Ardından ikinci H şekilli yarığın boyutlandırılması ve ilk yarığa göre anten üzerindeki konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu parametrik çalışmada doğru boyutlar ve konumlandırmalar, hedeflenen temel teknik isterler göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Parametrik çalışmanın tamamlanmasının ardından antenin toprak düzleminin boyutlarının, açıklık beslemeli yarık kuplajlı yama antenlerin en büyük sorunlarından biri olan geriye doğru yansımaya etkileri benzetim ortamında incelenmiştir. Arka – boşluk destekli yapıya ihtiyaç duyulmamış ve bu yapıya bağlı olarak antenin toplam yüksekliği artırılmamıştır. Hedeflenen temel teknik isterlerin sağlanmasının ardından benzetim ortamında anten tasarımı tamamlanmış ve önerilen antenin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Son aşamada; bu çalışmada önerilen açıklık bağlantılı yarık kuplaj beslemeli yama antenin geri dönüş kaybı, portlar arası izolasyonu, yarım güç hüzme genişliği ve kazanç gibi performans parametreleri, benzetim ortamında ve prototip anten üzerinde yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Benzetim ve ölçüm sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Görülmektedir ki; önerilen anten Çizelge 4.4.'te yer alan hedeflenen teknik isterleri sağlayarak 5G baz istasyonları için uygunluğu doğrulandığı gibi, Çizelge 6.1.'de yer alan benzer diğer çalışmalara da performans olarak üstün gelmektedir.

KAYNAKLAR

1. Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). Oxford: Clarendon Press.
2. Kraus, J. D. (1988). Heinrich Hertz-theorist and experimenter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 36(5), 824-829.
3. Hemour, S., and Wu, K. (2014). Radio-frequency rectifier for electromagnetic energy harvesting: Development path and future outlook. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1667-1691.
4. Strong, R. (2005). Radar: the evolution since World War II. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 20(1), 19-24.
5. Jensen, M. A., and Wallace, J. W. (2004). A review of antennas and propagation for MIMO wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(11), 2810-2824.
6. Shoaib, N., Shoaib, S., Khattak, R. Y., Shoaib, I., Chen, X., and Perwaiz, A. (2018). MIMO antennas for smart 5G devices. *IEEE Access*, 6, 77014-77021.
7. Mishra, P. K., Jahagirdar, D. R., and Kumar, G. (2014). A review of broadband dual linearly polarized microstrip antenna designs with high isolation. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56(6), 238-251.
8. Singh, I., and Tripathi, V. S. (2011). Micro strip patch antenna and its applications: a survey. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 2(5), 1595-1599.
9. Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
10. Bhattacharyya, A. K., Cherrette, A. R., and Bruno, R. D. (2013). Analysis of ring-slot array antenna using hybrid matrix formulation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(4), 1642-1650.
11. Pozar, D. M. (1992). Microstrip antennas. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
12. Kumar, G., and Ray, K. P. (2002). *Broadband microstrip antennas*. Dedham, MA: Artech house.
13. Lee, K. F., and Tong, K. F. (2012). Microstrip patch antennas—basic characteristics and some recent advances. *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2169-2180.
14. Guo, Y. X., Luk, K. M., Lee, K. F., and Chair, R. (2002). A quarter-wave U-shaped patch antenna with two unequal arms for wideband and dual-frequency operation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50(8), 1082-1087.
15. Garg, R. (2001). *Microstrip antenna design handbook*. Dedham, MA: Artech house.

16. Grieg, D. D., and Engelmann, H. F. (1952). Microstrip-A new transmission technique for the kilomegacycle range. *Proceedings of the IRE*, 40(12), 1644-1650.
17. Deschamps, G. A. (1953). *Microstrip microwave antennas*. In Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, Oct 18-22.
18. Gutton, H., and Baissinot, G. (1955). *Flat aerial for ultra high frequencies*. French patent, 703113.
19. Howell, J. (1975). Microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(1), 90-93.
20. Munson, R. J. I. T. (1974). Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22(1), 74-78.
21. James, J. R., and Wilson, G. J. (1977). Microstrip antennas and arrays. Part 1: Fundamental action and limitations. *IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics*, 1(5), 165-174.
22. Bahl, I. J., and Bhartia, P. (1982). *Microstrip Antennas*, (Chap. 3.), Dedham, MA: Artech House.
23. James, J. R., and Hall, P. S. (Eds.). (1989). Handbook of microstrip antennas (Vol. 1.), Stevenage: IET.
24. Singh, M., Basu, A., and Koul, S. K. (2006). *Design of aperture coupled fed microstrip patch antenna for wireless communication*. In 2006 Annual IEEE India Conference IEEE, 1-5.
25. Bisht, S., Saini, S., Prakash, V., and Nautiyal, B. (2014). Study the various feeding techniques of microstrip antenna using design and simulation using CST microwave studio. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(9), 318-324.
26. Vincenti Gatti, R., Rossi, R., and Dionigi, M. (2020). Single-layer line-fed broadband microstrip patch antenna on thin substrates. *Electronics*, 10(1), 37.
27. Khanna, A., Srivastava, D. K., and Saini, J. P. (2015). Bandwidth enhancement of modified square fractal microstrip patch antenna using gap-coupling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2), 286-293.
28. Ciydem, M., and Miran, E. A. (2020). Dual-polarization wideband sub-6 GHz suspended patch antenna for 5G base station. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(7), 1142-1146.
29. Ciydem, M., and Koc, S. (2015). High isolation dual-polarized broadband antenna for base stations. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(3), 603-607.
30. Mak, C. L., Luk, K. M., Lee, K. F., and Chow, Y. L. (2000). Experimental study of a microstrip patch antenna with an L-shaped probe. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48(5), 777-783.

31. Luk, K. M., and Lau, K. L. (2011). U.S. Patent No. 7,994,985. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
32. Parizi, S. A. R. (2017). Bandwidth enhancement techniques. *Microstrip Antennas: Trends in Research on*, 1.
33. Miran, E. A., Uzman, B., and Okan, T. (2024). A Broadband Suspended Plate Antenna with Dual Polarization for 2G/3G/Wi-Fi/4G/LTE. *Gazi University Journal of Science*, 37(3), 1205-1213.
34. Miran, E., and Ciydem, M. (2022). Dual-polarized elliptic-H slot-coupled patch antenna for 5G applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(4), 1204-1218.
35. Miran, E. A., and Ciydem, M. (2024). A Low-Profile High Isolation Wideband Dual-Polarized Antenna for Sub-1 GHz Base Stations. *Gazi University Journal of Science*, 37(2), 677-686.
36. Kumar, N., Sharma, N. (2019). The Various Feeding Techniques of Microstrip Patch Antenna Using HFSS. *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 6(6), 23-29.
37. Serra, A. A., Nepa, P., Manara, G., Tribellini, G., and Cioci, S. (2007). A wide-band dual-polarized stacked patch antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 6, 141-143.
38. Barba, M. (2008). A high-isolation, wideband and dual-linear polarization patch antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(5), 1472-1476.
39. Wang, Y., and Du, Z. (2015). Dual-polarized slot-coupled microstrip antenna array with stable active element pattern. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(9), 4239-4244.
40. Caso, R., Serra, A., Buffi, A., Rodriguez-Pino, M., Nepa, P., and Manara, G. (2011). Dual-polarised slot-coupled patch antenna excited by a square ring slot. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 5(5), 605-610.
41. Hua, C., Li, R., Wang, Y., and Lu, Y. (2018). Dual-polarized filtering antenna with printed Jerusalem-cross radiator. *IEEE Access*, 6, 9000-9005.
42. Lu, J., Kuai, Z., Zhu, X., and Zhang, N. (2011). A high-isolation dual-polarization microstrip patch antenna with quasi-cross-shaped coupling slot. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(7), 2713-2717.
43. Ryu, K. S., and Kishk, A. A. (2008). Wideband dual-polarized microstrip patch excited by hook shaped probes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(12), 3645-3649.
44. Chen, P., Wang, L., and Ding, T. (2020). A broadband dual-polarized antenna with CRR-EBG structure for 5G applications. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 1507-1512.



Gazili olmak ayrıcalıktır