

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**5G ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ ANTENLERDE ANTENLER ARASI
İZOLASYON YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE
UYGULANMASI**

Kadir Can AYVACI

**Danışman
Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2023**



© 2023 [Kadir Can AYVACI]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLERİN DİZİNİ	vii
ÇİZELGELERİN DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL ANTEN TEORİSİ	4
2.1. Anten Parametreleri	4
2.1.1. Işıma örüntüsü.....	4
2.1.2. Yönlülük.....	4
2.1.3. Kutuplanma.....	5
2.1.3.1. Doğrusal kutuplanma	6
2.1.3.2. Dairesel kutuplanma	7
2.1.3.3. Eliptik kutuplanma.....	7
2.1.4. Anten giriş empedansı	8
2.2. Anten Tipleri.....	9
2.2.1. Dizi antenler	9
2.2.2. Mikroşerit antenler	10
2.2.2.1. Mikroşerit antenlerin temel özellikleri.....	10
2.2.2.2. Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri	12
2.2.2.2.1. Mikroşerit hat ile besleme	12
2.2.2.2.2. Koaksiyel hat ile besleme	12
2.2.2.2.3. Açıklık bağlaşım ile besleme	12
2.2.2.2.4. Yakınlık bağlaşım ile besleme.....	13
2.3. Mikroşerit Yama Antenin Analizi	13
2.3.1. İletim hattı modeli.....	13
3. ANTENLER ARASIN İZOLASYON YAPILARI	15
3.1. Metamalzeme Yapılar	15
3.2. Elektromanyetik Bant Aralığı Oluşturan Yapılar	16
3.3. Metalik Hat	16
4. LİTERATÜR ÖZETİ	17
5. ANTEN VE İZOLASYON YAPISININ TASARIMI.....	23
5.1. Benzetim Sonuçları ve Analizi	24
5.1.1. Referans anten dizisinin tasarımı.....	24
5.1.2. İzolasyon yapıli anten tasarımı.....	28
5.1.2.1. Antenler arasına metalik hat ve bozulmamış toprak yüzeye rezonatörlerin yerleştirilmesi (IDA).....	29
5.1.2.2. Bozulmamış toprak yüzeyde bulunan rezonatörlerin etkilerinin incelenmesi	36
5.1.2.3. Antenler arasına metalik hat ve bozulmamış toprak yüzeye rezonatörlerin etkilerinin ayrı ayrı incelenmesi.....	38
5.2. Referans Anten İle İzolasyon Yapılı Anten Üretimi ve Ölçüm Sonuçları.....	42
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR.....	51
ÖZ GEÇMİŞ.....	56

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

5G ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ ANTENLERDE ANTENLER ARASI İZOLASYON YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE UYGULANMASI

Kadir Can AYVACI

Süleyman Demirel Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ

Bu tez kapsamında, çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) anten sistemleri için kullanılabilecek ve antenler arasındaki izolasyonu iyileştirmeye yönelik topoloji tasarımları, benzetimler üzerinden analizleri, üretimleri ve ölçümleri çalışılmıştır. Tasarımlarda MIMO anten birim elemanı olarak sıradan dikkörtgen mikroşerit anten seçilmiştir ve anten dizilimleri analiz kolaylığı açısından 1×2 düzeninde gerçekleştirilmiştir. Birim elemanların merkez frekansı olarak 5. Nesil (5G) mobil haberleşme sistemleri için bir frekans bandı olarak belirlenen 3,5 GHz seçilmiştir. Tasarımlar ticari CST Studio Suite® elektromanyetik çözücü yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda alttaş malzeme olarak nispeten kolay temin edilebilen ve her iki de yüzü bakır kaplı FR4 malzemesi kullanılmıştır. Tasarımların gerçekleştirilmesinin ardından antenler baskı devre kartı (PCB) kazıma cihazı ile FR4 alttaş kullanılarak üretilmiş ve Keysight E5063A vektör ağ analizörü ile S-parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarıma ilk olarak, 3,5 GHz merkez frekansında çalışacak ve 1×2 düzeninde antenler arası herhangi bir izolasyon yöntemi kullanılmamış sıradan dikkörtgen mikroşerit anten dizisi ile başlanmıştır. Bu anten izolasyon başarımında referans anten olarak kullanılmıştır ve tez içerisinde sıklıkla Referans Dizi Anten (RDA) olarak adlandırılmıştır. Anten dizisinin merkez frekansının belirlenmesinde $|S_{11}|$ minimumu, izolasyon değerinin tespiti için ise hedef frekansta $|S_{21}|$ seviyesi takip edilmiştir. Benzetimlerde RDA yapısı 3,508 GHz frekansında $-16,41$ dB $|S_{21}|$ değeri gösterirken ölçümlerde $-15,20$ dB seviyesi elde edilmiştir.

Nihai tasarımda RDA tasarımındaki izolasyonu iyileştirmek için anten düzleminde antenler arasına şerit hat eklenmiş ve toprak düzlemi bozularak 4 adet tamamlayıcı kapalı halka rezonatör (TKHR) yapısı 45° döndürülerek yerleştirilmiştir. Bu tasarıma izolasyon yapıları dizi anten (IDA) adı verilmiştir. Benzetimlerde IDA yapısı 3,523 GHz merkez frekansında $-33,46$ dB $|S_{21}|$ değeri gösterirken ölçümlerde $-31,04$ dB değerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar IDA yapısının RDA yapısına göre izolasyondaki başarımını ortaya koymaktadır.

RDA yapısından IDA yapısına geçerken kullanılan elemanların etkisini ortaya koymak adına, RDA ve IDA'ya ek olarak Anten 1, Anten 2, Anten 3, Anten 4 ve Anten 5 yapıları tasarlanmış ve bu antenlerin performansı sadece benzetimler üzerinden incelenmiştir. Burada bu antenlerin analiz edilmesinin amacı, anten düzlemindeki şerit hattın ve toprak düzlemindeki 4 adet 45° döndürülmüş TKHR yapısının izolasyon başarımındaki etkilerini ortaya koymaktır.

Sonuç olarak nihai tasarımda elde edilen IDA yapısı hem benzetim hem de ölçüm ortamında –30 dB seviyesinden daha düşük $|S_{21}|$ değeri sergileyerek izolasyon uygulamaları bir alternatif tasarım olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Tamamlayıcı Kapalı Halka Rezonatör (TKHR), İzolasyon, oklu Giriş oklu ıkış (MIMO)

2023, 56 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

RESEARCH AND APPLICATION OF ISOLATION METHODS BETWEEN ANTENNAS IN 5G MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT ANTENNAS

Kadir Can AYVACI

Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics and Communication Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ

Whitin the scope of this thesis, topology designs for multiple input multiple output (MIMO) antenna systems to improve the isolation between the antennas, their analyses by using simulations, fabrications and measurements are studied. In the designs, ordinary rectangular microstrip antenna is chosen as the unit element of the MIMO antenna, and for the simplicity in the analyses the antenna sequence is realized in 1×2 layout. As the center frequency of the unit elements, 3.5 GHz is chosen which has been determined as one of the frequency bands of 5th Generation (5G) mobile communication systems. The designs are realized by using commercial CST Studio Suite® electromagnetic solver software. In the designs, FR4 material, with copper coated on both sides, is used as the substrate which is available relatively easily. Following the completion of the designs, the antennas are fabricated by using printed circuit board (PCB) milling machine on FR4 substrate, and S-parameter measurements are realized by using Keysight E5063A vector network analyzer.

Firstly, the design is started with an ordinary rectangular microstrip antenna array at 3.5 GHz center frequency in 1×2 layout having no applied isolation approach on it. This antenna is used as the reference antenna in the isolation success, and in the thesis, it is frequently called as the Reference Array Antenna (RDA). To determine the center frequency of the antenna array and the isolation level, the $|S_{11}|$ minimum and the $|S_{21}|$ level are tracked, respectively. At 3,508 GHz frequency, the RDA structure shows $-16,41$ dB and $-15,20$ dB $|S_{21}|$ levels in simulations and experiments, respectively.

In the final design, to improve the isolation of the RDA design, a strip line is added in the antenna plane in between the antennas, and 4 complementary closed ring resonators (TKHR) in 45° rotated manner is placed by defecting the ground plane. This design is called as the array antenna with isolation structure (IDA). At 3,523 GHz frequency, the IDA structure reaches $-33,46$ dB and $-31,04$ dB $|S_{21}|$ levels in simulations and experiments, respectively. The results show the success of the IDA with respect to RDA in terms of isolation.

To reveal the effects of the elements that are used in the evaluation of IDA from RDA, Antenna 1, Antenna 2, Antenna 3, Antenna 4, and Antenna 5 structures designed and the performances of these antennas are investigated by simulations only. The aim of the analysis of these antennas is to reveal the effects of the isolation performances of the strip line in the antenna plane and the four 45° rotated TKHR structures in the ground plane.

As the result, IDA structure that is obtained in the final design shows that it is an alternative design for isolation applications with it's $|S_{21}|$ levels lower than -30 dB both in simulations and experiments.

Keywords: Complementary Closed Ring Resonators (CCRR), Isolation, Multiple Input Multiple Output (MIMO)

2023, 56 pages



TEŞEKKÜR

Bu tezi gerçekleştirmem ve yüksek lisans yolculuğum sırasında bana rehberlik eden, desteğini, bilgi birikimini, tecrübelerini esirgemeyen ve kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı gerçekleştirme sürecinde anten üretim ve ölçümleri için ekipmanlarını esirgemeyen Tron Elektronik A.Ş. ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Yardıma ihtiyacım olduğunda desteklerini esirgemeyen Elif Merve KÜÇÜKÖNER'e teşekkür ederim.

Hayatımın her noktasında beni destekleyen, her imkanı sağlayan ve gelişmemi isteyen babam Ali AYVACI, annem Nezahat AYVACI ve ablam Derya AYVACI'ya sonsuz sevgi ve saygıları sunarım.

Kadir Can AYVACI
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLERİN DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Çoklu giriş çoklu çıkış sistem modeli	1
Şekil 2.1. Doğrusal kutuplanan dalganın elektrik alanının xy düzleminde değişimi.....	6
Şekil 2.2. Dairesel Kutuplanan dalganın elektrik alan hareketinin xy düzleminde görünüşü (a) Saat yönünün tersine, (b) Saat yönünde	7
Şekil 2.3. Dikdörtgen yamadan oluşan bir mikroşerit antenin şematik gösterimi (a) Antenin ön yüzü, (b) Antenin toprak yüzeyi, (c) Antenin yandan görünüşü	11
Şekil 2.4. Mikroşerit anten şematik gösterimi (a) Antenin ön yüzü, (b) Yandan gösterimi.....	14
Şekil 3.1. Dielektrik ve manyetik geçirgenlik sınıflandırma tablosu	15
Şekil 5.1. Referans antenin ön yüz şematik görünümü.....	25
Şekil 5.2. Antenin toprak düzlemi şematik görünümü.....	25
Şekil 5.3. Antenin yandan şematik görünümü.....	25
Şekil 5.4. Referans antenin nümerik elde edilen $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ grafikleri.....	26
Şekil 5.5. Referans antenin benzetim ile elde edilen kazanç grafiği	27
Şekil 5.6. Referans antenin $\Phi=0^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları.....	27
Şekil 5.7. Referans antenin $\Phi=90^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları.....	28
Şekil 5.8. IDA ön yüz şematik görünümü.....	29
Şekil 5.9. IDA toprak yüzeyi, rezonatör yapısı şematik görünümü ve tasarım parametreleri.....	30
Şekil 5.10. Rezonatör yapısı şematik görünümü ve tasarım parametreleri.....	30
Şekil 5.11. Önerilen IDA yapısının (a) s_1 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $ S_{11} $, (b) s_1 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $ S_{21} $, (c) w_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $ S_{11} $, (d) w_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $ S_{21} $, (e) l_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $ S_{11} $ ve (f) l_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $ S_{21} $ grafikleri.....	31
Şekil 5.12. Önerilen IDA yapısının nümerik olarak elde edilen $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ grafikleri.....	33
Şekil 5.14. Önerilen IDA yapısının $\Phi=0^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları.....	34
Şekil 5.15. Önerilen IDA yapısının $\Phi=90^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları.....	35
Şekil 5.16. Rezonatör yapısının yüzey akım yoğunluk dağılımı	35
Şekil 5.17. Anten 1 yapısının (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü.....	36
Şekil 5.18. Anten 2 yapısının (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü.....	36
Şekil 5.19. Anten 3 yapısının (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü.....	37
Şekil 5.20. RDA, IDA, Anten 1, Anten 2 ve Anten 3 yapılarının $ S_{11} $ grafikleri....	37
Şekil 5.21. RDA, IDA, Anten 1, Anten 2 ve Anten 3 yapılarının $ S_{21} $ grafikleri....	38

Şekil 5.22. Anten 4 yapısı (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü.....	39
Şekil 5.23. Anten 5 yapısı için (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü.....	39
Şekil 5.24. Önerilen IDA, Anten 4 ve Anten 5 yapılarının $ S_{11} $ değerlerinin karşılaştırması.....	40
Şekil 5.25. Önerilen IDA, Anten 4 ve Anten 5 tasarımlarının $ S_{21} $ değerlerinin karşılaştırması.....	40
Şekil 5.26. Üretilen RDA yapısının önden görünümü	43
Şekil 5.27. Üretilen RDA yapısının arkadan (toprak yüzey) görünümü	43
Şekil 5.28. Üretilen RDA yapısının ölçüm ve benzetim $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ sonuçlarının karşılaştırılması.....	44
Şekil 5.29. Üretilen IDA yapısının önden görünümü	44
Şekil 5.30. Üretilen IDA yapısının arkadan görünümü.....	45
Şekil 5.31. Üretilen IDA yapısının ölçüm ve benzetim $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ sonuçlarının karşılaştırılması.....	45

ÇİZELGELERİN DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1. Referans dikdörtgen mikroşerit antenin tasarım parametreleri, açıklamaları ve değerleri	26
Çizelge 5.2. Metalik hat, rezonatör yapısı ve dikdörtgen mikroşerit antene ait tasarım parametreleri, açıklamaları ve değerleri	32
Çizelge 5.3. Önerilen IDA anteninin $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ değerleri.....	33
Çizelge 5.4. Önerilen RDA, Anten 4, Anten 5 ve IDA yapılarının $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ genlik değerleri	41
Çizelge 5.5. Önerilen RDA, Anten 4, Anten 5 ve IDA yapılarının rezonans frekansları, anten yüzde bant genişlikleri, anten kazanç, anten yönlülükleri ve yarı güç hüzmeye genişlikleri	42
Çizelge 5.6. 3,508 GHz frekansında RDA yapısının $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ ölçüm ve benzetim sonuçları.	46
Çizelge 5.7. Tasarlanan IDA yapısının 3,523 GHz frekansında benzetim ve ölçümünün $ S_{11} $ ve $ S_{21} $ sonuçları.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

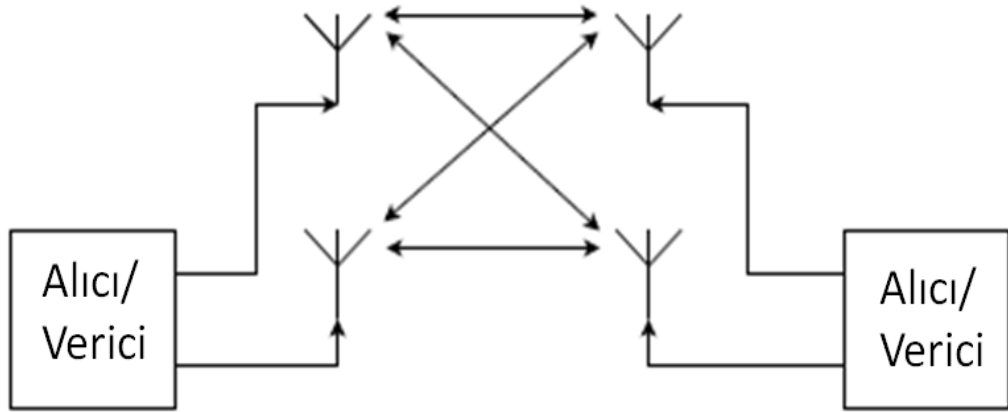
c	Serbest uzaydaki ışık hızı
d	Antenler arasındaki mesafe
D	Anten yönlülüğü
D_o	Ortalama anten yönlülüğü
D_{max}	Maksimum anten yönlülüğü
dB	Desibel
dB _i	Desibel izotropik
f	Frekans
GSM	Mobil iletişim için küresel sistem
h	Altaş kalınlığı
I_t	Üreteç akımı
IDA	İzolasyon yapıları anten
k_1	Altaş üst uç noktası ve rezonatör uç mesafesi
k_2	İki rezonatör arasındaki mesafe
k_3	Altaş alt uç noktası ve rezonatör uç mesafesi
l	Anten altaş uzunluğu
l_1	Yamanın uzunluğu
l_2	Metalik hat uzunluğu
m	Anten besleme hattının girintisinin uzunluğu
MHz	Mega Hertz
MIMO	Çoklu giriş çoklu çıkış
MWS	Microwave Studio
n	Anten besleme hattının girintisinin genişliği
PCB	Baskı devre kartı
P_L	Kaybolan güç
P_r	Antene aktarılan güç
P_{rad}	Işıyan güç
P_t	Üretecin içinde kaybolan güç
PCR	Çift paralel bağlı hat rezonatör
R_A	Antenin giriş direnci
R_t	Üretecin iç direnci
RDA	Referans dizi anten
s_1	Rezonatör büyük kare dış uzunluğu
s_2	Rezonatör büyük kare iç uzunluğu
s_3	Rezonatör küçük kare uzunluğu
SRR	Bölünmüş halka rezonatör
t	Bakır kalınlığı
TKHR	Tamamlayıcı kapalı halka rezonatörü
U	Işıma şiddeti
U_{max}	Maksimum ışıma şiddeti
U_o	Ortalama ışıma şiddeti
w	Anten altaş genişliği
ω	Açısal frekans
w_1	Yamanın genişliği
w_s	Anten besleme hattının genişliği
w_2	Metalik hat genişliği
WLAN	Kablosuz yerel alan ağı

X_A	Antenin giriş reaktansı
V_g	Üretecin tepe gerilimi
Z_A	Antenin giriş empedansı
Z_t	Üretecin empedansı
ϵ	Dielektrik sabiti
ϵ_{eff}	Etkin dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu
λ_0	Serbest uzay dalga boyu
Ω	Empedans birimi
Γ	Yansıma katsayısı
X_t	Üretecin reaktansı
ϕ	Elektromanyetik dalganın kırıldıktan sonra normal ile yaptığı açı
θ	Elektromanyetik dalganın geliş normal ile yaptığı geliş açısı
μ	Manyetik geçirgenlik



1. GİRİŞ

Gelişen mobil teknolojiler ile internete erişen cihaz sayısı her geçen gün artmaktadır. Mobil cihazlar için ayrılan frekans bandında kullanıcı sayısının artması nedeniyle, bant genişliği ve veri hızı konusunda ihtiyaçlar oluşmuştur. Bu nedenle, daha gelişmiş 5. Nesil (5G) sistemlerin geliştirilmesi gündeme gelmiştir (Andrews vd., 2014). 5. Nesil Avrupa Komisyonu, 5G uygulamaları için 3,5 GHz bandının kullanımını uygun bulmuştur (European Commission, 2016). 5. Nesil sistemler, 10 Gbps veri aktarım hızında haberleşmeyi sağlayabilmektir ancak bu veri hızına ulaşmak için yüksek frekanslarda haberleşme gerekir. Yüksek frekanslarda oluşan zayıflama ve antenlerde oluşabilecek olumsuz durumlar, bu hızı engel olabilir. Oluşabilecek risklerin önüne geçebilmek için çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) sistemlerin entegre edilmesi gereklidir (Rusek vd., 2012).



Şekil 1.1. Çoklu giriş çoklu çıkış sistem modeli

MIMO sistemler, aynı anda birçok kullanıcının birbiriyle haberleşmesini sağlar. Çoklu anten kullanımı ile eş zamanlı olarak birden çok alıcı-verici sistemin haberleşmesi sağlanır. MIMO sistemlerde yapılacak izolasyon ile çoklu haberleşmenin neden olduğu girişimlerin azaltılması sağlanır (Larsson vd., 2014). MIMO sistemler sayesinde elde edilebilecek avantajlardan yararlanabilmek için farklı elemanlar kullanılması gerekir. Bu elemanlardan birisi de antenlerdir (Andrews vd., 2014). MIMO sistemlerin dar alanlarda çoklu kullanımının gerekliliği, antenler arası mesafenin az olmasından kaynaklı

bağlaşımına sebep olur. Bu bağlaşım da sistem performansını olumsuz olarak etkiler (Liu vd., 2013; Ghannad vd., 2019).

Antenler arasındaki karşılıklı bağlaşım azaltılarak, bir başka deyişle anten elemanları arasındaki izolasyon iyileştirilerek, yakın olarak konumlandırılmış antenlerin birbirine karşı olan olumsuz etkileri azaltılabilir (Liu vd., 2013). Bu tez kapsamında, antenlerin yakın konumlandırılmasından kaynaklı oluşan olumsuz etkilerin azaltılması hedeflenmektedir.

Literatüre bakıldığında izolasyonu arttırmak için birçok yöntem önerisi görülmüştür (Emadeddin vd., 2017; Arun vd., 2014; Qamar ve Park, 2014). Literatür Özeti bölümünde bu yöntemler üzerine yapılan pek çok çalışma incelenmiş ve sunulmuştur.

Bu tez çalışması bölümleri aşağıdaki gibi ilerlemiştir.

1. Bölümde; 5. Nesil sistemlerin gerekliliğine ve bu sistemlerin kullanımı sırasında karşılaşılabilecek problemlere değinilmiştir.
2. Bölümde; bu çalışmada kullanılan anten tasarımı için ön bilgi olarak temel anten teorisi, anten parametreleri, anten tipleri ve mikroserit yama anten analizi hakkında bilgiler verilmiştir. Başlıca anten parametrelerinden ışıma örüntüsü, yönlülük, kutuplanma ve anten giriş empedansı açıklanmıştır.
3. Bölümde; antenler arasındaki izolasyon yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Antenler arası izolasyon sağlamak için kullanılan birçok yöntem vardır. Bu çalışma kapsamında antenler arası izolasyon iyileştirmesi için, temel olarak metamalzeme yapılar, elektromanyetik bant genişliği oluşturan yapılar ve metalik hatlar üzerine değinilmiştir.
4. Bölümde; bu çalışma ile ilgili olarak literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir.

5. Bölümde; çalışmadaki tasarımların benzetim adımları, ortaya konulan çıktılar incelenip kıyaslanmıştır. Tasarımlarda oluşan en ideal yapıların üretim ve ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmalar için elde edilen sonuçların bir kısmı 24-26 Kasım 2022 tarihleri arasında Bursa'da gerçekleştirilen Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2022)'nda sözlü olarak sunulmuş ve tam metin olarak yayımlanmıştır (Ayvacı ve Ekmekçi, 2022).

6. Bölümde; çalışma sonucunda elde edilen çıktılar tartışılmış ve daha sonra yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. TEMEL ANTEN TEORİSİ

Elektromanyetik dalgayı vericiden alıcıya iletmek için kullanılan antenler; elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjisine, elektrik enerjisini ise elektromanyetik enerjiye dönüştüren yapılardır (Balanis, 2005).

Kablosuz haberleşme teknolojisi ile farklı anten yapıları ortaya çıkmıştır. Antenlerin, serbest uzayda elektromanyetik enerjiyi iletebilmesi veya alabilmesi için bazı koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar için gerekli parametrelerden bir bölümü bu başlıkta anlatılacaktır.

2.1. Anten Parametreleri

2.1.1. Işıma örüntüsü

Antenin en önemli parametrelerinden biri olan ışıma örüntüsü (paterni), ışıma karakteristiğinin uzaydaki konumuna göre grafiksel gösterimi ya da matematiksel tanımıdır. Işıma örüntüsü; antenin güç, yönlülük vb. özellikleri hakkında bilgi verir (Balanis, 2005).

2.1.2. Yönlülük

Bir yöndeki ışıma şiddetinin, tüm yönlerde oluşan ışıma şiddetinin ortalamasına oranı, antenin yönlülüğü olarak ifade edilir (Balanis, 2005). Bir başka tanıma göre, yönlülük, yön bağımsız ışıma şiddetinin bir yöndeki gücünü ifade eder (Stutzman, 2012). Yönlü antenlerde yönlülük değerinin yüksek olması beklenirken, daha geniş alanda ışıma istenen antenlerde yönlülük değerinin düşük olması beklenir. Anten yönlülüğünü matematiksel olarak ifade etmek gerekirse;

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanabilir. Işıma eğer yön bağımsız ise maksimum ışıma şiddeti;

$$D_{max} = D_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir. (2.1) ve (2.2)'de verilen U , birim katı açıdan geçen elektromanyetik güçtür. (2.3), (2.4) ve (2.5)'te antenin θ ve ϕ bileşenleri için toplam maksimum yönlülük D_0 olarak tanımlanır (Balanis, 2005).

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (2.3)$$

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (2.4)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (2.5)$$

2.1.3. Kutuplanma

Antenden ışıyan dalga, elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin genlik değerleri ve açısı, uzaya ve zamana bağlı olarak değişiklik gösterir. Elektrik alan vektörünün genliğinin uzayda sabit bir konumda çizdiği iz dalganın kutuplanmasını belirler. Elektromanyetik dalganın davranışına göre üç farklı kutuplanma türü vardır. Bunlar doğrusal kutuplanma, dairesel kutuplanma ve eliptik kutuplanmadır (Balanis, 2005).

$-z$ ekseninde ilerleyen bir dalganın anlık alanını tanımlayan matematiksel ifade denklem (2.6)'da gösterilmiştir (Balanis, 2005).

$$\varepsilon(z; t) = \hat{a}_x \varepsilon_x(z; t) + \hat{a}_y \varepsilon_y(z; t) \quad (2.6)$$

Denklem (2.7) ve (2.8)'de verilen ε_x ve ε_y denklemleri, genlik ve açısı sahip karmaşık büyüklüklerdir (Balanis, 2005).

$$\varepsilon_x(z; t) = E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_y(z; t) = E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.8)$$

Denklem (2.7) ve (2.8)'de belirtilen E_{x0} ve E_{y0} , x ve y bileşenlerinin genlik değerleridir.

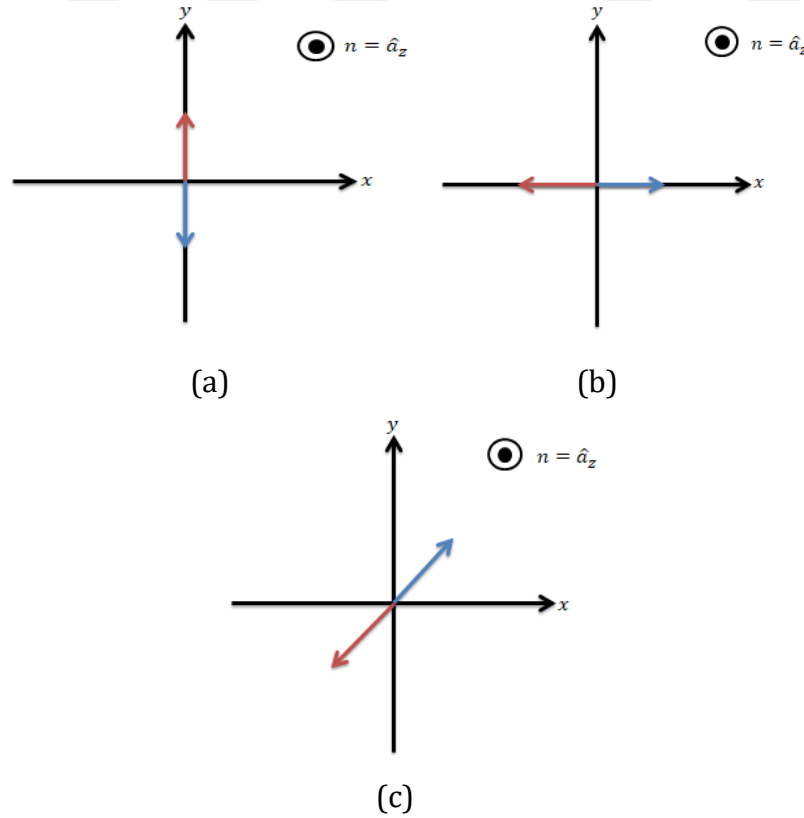
2.1.3.1. Doğrusal kutuplanma

Doğrusal kutuplanma için, bir dalgaının, x ve y bileşenleri arasındaki zaman faz farkı;

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.8)$$

denklem (2.8)'de ifade edilmiştir. Denklem (2.8)'de verilen ϕ , fazı ifade etmektedir (Balanis, 2005).

Şekil 2.1'de z eksenı yönünde yayılan ve doğrusal kutuplanmış elektromanyetik dalgalar için, elektrik alan değişiminin xy düzlemindeki görünümü üç örnek için verilmiştir.



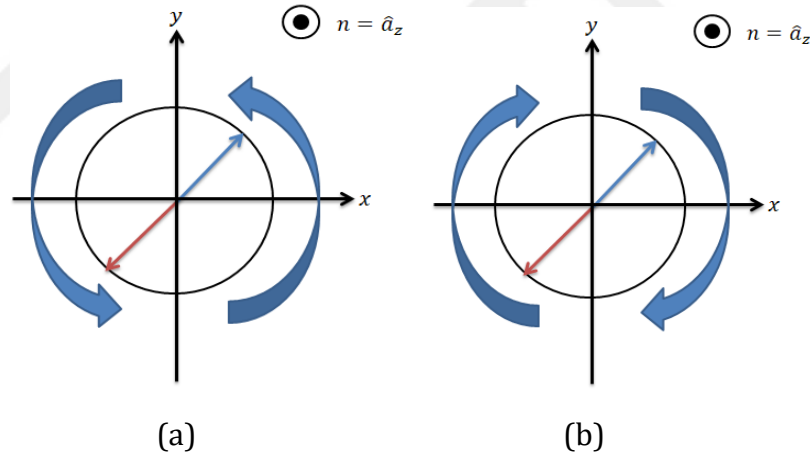
Şekil 2.1. Doğrusal kutuplanan dalgaının elektrik alanının xy düzleminde değişimi

2.1.3.2. Dairesel kutuplanma

Dairesel kutuplanma, $-z$ yönünde yayılan bir dalga için x ve y bileşenlerinin genlikleri eşit iken, aralarındaki zaman faz farkı denklem (2.9)'daki gibi olduğu durumdur (Balanis, 2005).

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0,1,2,3 \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0,1,2,3 \end{cases} \quad (2.9)$$

Elektromanyetik dalganın ilerleme yönündeki dönme hareketine göre saat yönünde ve saat yönünün tersine olarak iki farklı dairese kutuplanma tanımlanabilir (Balanis, 2005). Şekil 2.2'de 2 farklı dairese kutuplanma için elektrik alan hareketinin, xy düzlemlerinde görünümü örnek olarak verilmiştir.



Şekil 2.2. Dairesel Kutuplanan dalganın elektrik alan hareketinin xy düzleminde görünüşü (a) Saat yönünün tersine, (b) Saat yönünde

2.1.3.3. Eliptik kutuplanma

Bir dalganın x ve y bileşenlerinin aralarındaki zaman faz farkı $\frac{\pi}{2}$ 'nin tek katları olduğu ve bileşen genliklerinin birbirinden farklı olduğu kutuplanma türüne eliptik kutuplanma denir. Eliptik kutuplanmada, elektrik alan veya manyetik alan vektörünün ucu, uzayda eliptik bir yol izler ve ilerleme yönüne göre saat

yönü ve saat yönünün tersine olmak üzere 2 farklı eliptik kutuplanma tanımlanır (Balanis, 1989).

2.1.4. Anten giriş empedansı

Bir antene, elektromanyetik enerjinin giriş yaptığı iki nokta arasındaki gerilimin akıma veya elektrik alanın manyetik alana oranı antenin giriş empedansı olarak tanımlanır. Anten giriş empedansı denklem (2.10)'da tanımlanmıştır (Balanis, 1989).

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da verilen R_A antenin giriş direnci, X_A antenin giriş reaktansı ve Z_A antenin giriş empedansı olarak tanımlanır. Antenin üretece bağlandığı durum için üretelin empedansı denklem (2.11)'de verilmiştir. Üretelin iç direnci R_t ve üretelin reaktansı X_t olarak ifade edilmiştir (Balanis, 2005).

$$Z_t = R_t + jX_t \quad (2.11)$$

Denklem (2.12) ile üretelin akımı, denklem (2.13) ile akımın genliği ifade edilir.

$$I_t = \frac{V_g}{Z_A + Z_t} = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_t) + j(X_A + X_t)} \quad (2.12)$$

$$|I_t| = \frac{|V_g|}{[(X_A + X_t)^2 + (R_r + R_L + R_t)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.13)$$

Antene ışıma için aktarılan güç, denklem (2.14) ile hesaplanabilir (Balanis, 2005).

$$P_r = \frac{1}{2} |I_t|^2 R_r = \frac{|V_t|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L + R_t)^2 + (X_A + X_t)^2} \right] \quad (2.14)$$

Denklem (2.15) kullanılarak kaybolan güç hesaplanabilir (Balanis, 2005).

$$P_L = \frac{1}{2} |I_t|^2 R_L = \frac{|V_t|^2}{2} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L + R_t)^2 + (X_A + X_t)^2} \right] \quad (2.15)$$

Üreteç içinde kaybolan güç hesabı için denklem (2.16) kullanılabilir (Balanis, 2005).

$$P_t = \frac{|V_t|^2}{2} \left[\frac{R_t}{(R_r + R_L + R_t)^2 + (X_A + X_t)^2} \right] \quad (2.16)$$

Eşlenik uyumlandırma şartına göre antene giren güç kayıpları azaltılmalıdır. Aktarılan gücü en iyi şekilde kullanabilmek için denklem (2.17) ve (2.18) eşitlikleri uygulanmalıdır (Balanis, 2005).

$$R_r + R_L = R_g \quad (2.17)$$

$$X_A = -X_g \quad (2.18)$$

Anten giriş empedansı uyumlandırılarak, aktarılabilecek en iyi güç aktarımı sağlanır (Balanis, 2005).

2.2. Anten Tipleri

Farklı frekans bölgeleri ve ihtiyaçlara göre, farklı anten tasarımları çalışılmıştır. Bu tasarımlara lens antenler, yansıtıcı antenler, tel antenler, açıklık antenler, dizi antenler ve mikroşerit antenler örnek olarak verilebilir (Balanis, 2005). Bu tez kapsamında mikroşerit antenler ve dizi antenler üzerine tasarımlar çalışılmıştır.

2.2.1. Dizi antenler

Çeşitli uygulamalarda, antenlerin hüzmeye genişliğinin dar olması istenir. Hüzmeye genişliğini daraltmak için anten yönlülüğünün artırılması gereklidir. Anten

yönlülüğünün arttırılabilmesi için antenin elektriksel özelliklerinin değiştirilmesi gerekir. Tek elemanlı anten yapılarında, elektriksel özelliklerini değiştirerek özelleştirmek zordur. Ancak, birden fazla anteni belirli bir düzende yerleştirerek oluşturulan yapılarda, antenin yönlülüğünü artırmak ve istenilen hüzme genişliği elde etmek daha kolay ve pratiktir. Bu tarz anten tasarımlarına dizi anten denir (Balanis, 2005).

2.2.2. Mikroşerit antenler

Mikroşerit antenler alt yüzeyi (toprak düzlemi) ve üst yüzeyi (anten düzlemi) metal olan, bu iki metal yüzey arasında dielektrik tabaka bulunan anten tipleridir. Diğer anten türlerine göre birçok avantajı olması, araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Mikroşerit antenler, günümüzde Wi-Fi, uydu haberleşmesi, mobil haberleşme, GPS ve radar gibi sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır (Balanis, 2005).

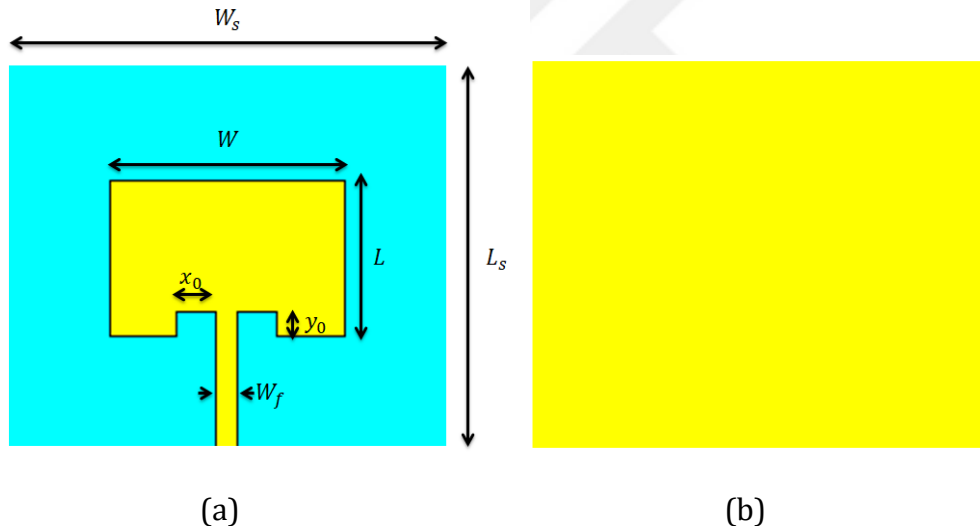
Mikroşerit antenler birçok farklı geometrik tasarım ile karşımıza çıkabilir. Mikroşerit anten geometrilerine kare, dikdörtgen, üçgen ve daire örnek verilebilir (Agrawal ve Bailey, 1977). Her yapı için farklı tasarım yöntemleri geliştirilmiştir.

2.2.2.1. Mikroşerit antenlerin temel özellikleri

Mikroşerit antenler toprak düzlemin üzerine çok ince ($t \ll \lambda_0$ ve λ_0 serbest uzay dalga boyunu göstermektedir.), dalga boyuna oranla daha yüksek bir alttaş ($h \ll \lambda_0$ ve genellikle $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$) ve en üstte ince metal bir şerit (yama) yerleştirilmesinden ibarettir. Mikroşerit yama anten parametreleri istenilen güç ve ısımayı sağlayacak şekilde belirlenir (Balanis, 2005).

Dikdörtgensel yama antenler için uzunluk (L) genellikle $\frac{\lambda_0}{3} < L < \frac{\lambda_0}{2}$ arasındadır. Şerit (yama) ve toprak düzlemi, Şekil 2.3 (a)(b)(c)'de görüldüğü gibi dielektrik levhayla (alttaş) birbirinden ayrılır. Mikroşerit antenlerin tasarımında kullanılabilen dielektrik levhaların, dielektrik sabitleri (ϵ_r)

genellikle $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır. İyi bir anten performansı için en uygun dielektrik sabitli malzeme seçilmelidir (Balanis, 2005). Düşük dielektrik sabitli malzemeler ile yüksek bant genişliği, daha iyi verimlilik ve büyük eleman boyutuna sebep olmasına karşın ısıyan alanların daha az kısıtlı olduğu tasarımlar elde edilir (Pozar, 2011). Mikrodalga devrelerinde, istenmeyen ısıma ve bağlaşımı en aza indirebilmek adına, elektromanyetik alanları daha çok sınırlandırmak gerekir ve bu sebeple yüksek dielektrik sabit değerlikli, kalın alttaşlar tercih edilir. Ancak bu malzemelerin kayıpları, daha az verimli ve düşük bant genişliğine sahip yapılar oluşmasına sebep olur (Richards ve Harrison, 1981). Mikroşerit antenler sıklıkla mikrodalga devreleriyle entegre olduğundan, devre tasarımı ve iyi bir anten performansı arasında bir karar vermek gerekir.



Şekil 2.3. Dikdörtgen yamadan oluşan bir mikroşerit antenin şematik gösterimi
(a) Antenin ön yüzü, (b) Antenin toprak yüzeyi, (c) Antenin yandan görünüşü

2.2.2.2. Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri

Mikroşerit anten tasarımları için farklı besleme yöntemleri kullanılmaktadır. Besleme yöntemlerinden bazıları mikroşerit hat ile besleme, yakınlık bağlaşım ile besleme, açıklık bağlaşım ile besleme ve koaksiyel prob ile besleme yöntemidir (Balanis, 2005).

2.2.2.2.1. Mikroşerit hat ile besleme

Mikroşerit hat metal bir şerit altında dielektrik levha ve yapının alt yüzeyinde metal (toprak) yüzey olarak tasarlanmış bir hattır. Basit bir anten besleme yöntemidir. Yama anten girişinde görülen empedans değeri ve besleme değerlerinin aynı olması beklenir (Ai vd., 2020).

2.2.2.2.2. Koaksiyel hat ile besleme

Koaksiyel hat, bir tel çevresine sırasıyla dielektrik yapı ve metalik malzeme ile kaplanmış bir iletim hat modelidir. Hat kayıpları, diğer besleme yöntemlerine oranla daha azdır. Koaksiyel hat ile besleme, RF ve mikrodalga gibi farklı frekans bölgelerinde de çalıştırılabilir. Ancak empedans uyumlama işleminde az sayıda teknik uygulanabilir. Bu nedenle empedans uyumlama işlemleri devre üzerinde veya anten üzerinde uygulanır. Anten tasarımında, anten empedansının tasarımına en uygun olduğu noktadan koaksiyel hat ile besleme yapılır (Kumar vd., 2013).

2.2.2.2.3. Açıklık bağlaşım ile besleme

Mikroşerit hat besleme yöntemi ile ortaya çıkan elektromanyetik dalgaların bağlaşım sorunları için açıklık bağlaşım beslemeler ve temassız teknikler ile olan besleme yöntemleri oluşturulmuştur (Bisht, 2014).

2.2.2.2.4. Yakınlık bağlaşım ile besleme

Yakınlık bağlaşım ile besleme, mikroşerit yama antenin elektromanyetik enerjisinin bir yayılım ile bağlaşım yapmasından ortaya çıkmıştır (Bisht vd., 2014). Anten tasarımında, empedans eşleniğinin en iyi olduğu noktadan mikroşerit hat uzatılarak besleme bağlaşımıyla yapılır. Yama anten elemanının konumu, beslemenin üstündedir ve toprak düzlemi, iki alt tabaka arasına yerleştirilir. İki alt tabaka arasındaki toprak düzlemi, bağlanti yuvasına sahiptir. Yakınlık bağlaşım ile beslemede empedans uyumlama, diğer besleme yöntemlerine kıyasla daha zordur. Ancak entegrasyon kolaylığı bulunmaktadır (Balanis, 2005).

2.3. Mikroşerit Yama Antenin Analizi

Mikroşerit yama antenlerin analizi için birçok yöntem bulunmaktadır. Ancak en çok bilinenlerden biri iletim hattı modelidir (Balanis, 2005).

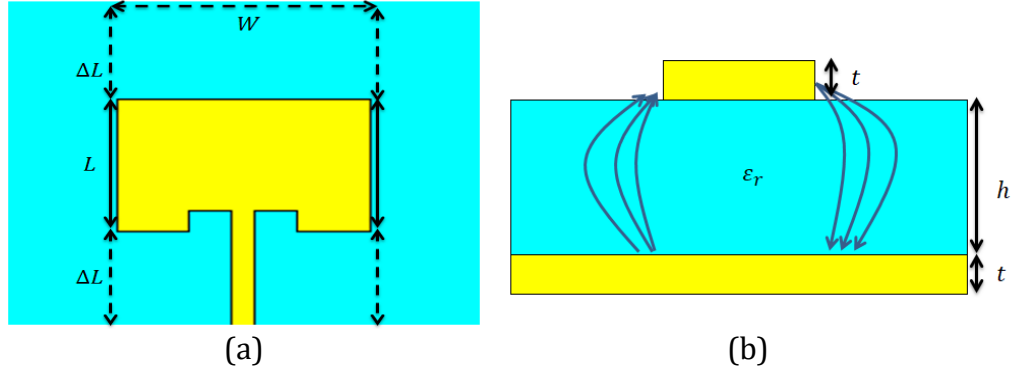
2.3.1. İletim hattı modeli

İletim hattı modelinin doğruluğu az ve bağlaşımını modellemek oldukça zordur (Krowne vd., 1983). İletim hattı modeli W genişliğinde ve L uzunluğunda bir iletim hattı olarak gösterilir. Işıma iki elemanlı bir açıklık dizisi oluşturan bir L uzunluğu ile h yükseliğindeki iki ince yarıktan yayıldığını varsaymaktadır (Balanis, 2005).

Yama antenin boyutları, uzunluğu ve genişliği boyunca elektromanyetik saçaklanmalar oluşur. Bu saçakların etkileri saçak etkisi olarak bilinir. Dalgaların bazıları tabanda, bazıları havada hareket ettiğinden dolayı saçaklanma ve hattaki dalga yayılımını hesaba katabilmek için etkin değer dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) tanımlanır (Balanis, 2005). Etkin dielektrik sabiti, aynı elektriksel özelliklere sahip olan düzgün bir dielektrik malzemenin sabiti olarak açıklanabilir. Etkin dielektrik değeri denklem (2.17) ile hesaplanır (Balanis, 2005).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

Saçaklanmalar ile antenin elektriksel uzunluğu, fiziksel uzunluğundan daha büyük hale gelir. Bu sebeple, tasarımlarda kullanılacak elektriksel uzunluğun önemi artar. Saçaklanmalar Şekil 2.4'te modellenmiştir.



Şekil 2.4. Mikroşerit anten şematik gösterimi (a) Antenin ön yüzü, (b) Yandan gösterimi

ΔL , etkin dielektrik ve yüksekliğin bir fonksiyonudur (Hammerstad, 1975).

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \left(\frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8 \right)} \right) \quad (2.18)$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (2.19)$$

Etkin dielektrik uzunluğu ve elektriksel uzunluğu denklem (2.18) ve denklem (2.19) ile bulunabilir (Kumar, 2013).

Anten tasarımında önemli parametreler uzunluk, genişlik ve kullanılacak dielektrik malzemedir. Çalışma frekansını sağlayacak parametrelerin uygun değerleri hesaplanarak belirlenmelidir. Etkin bir ışıma ve iyi bir performans için parametreler denklem (2.20) ve denklem (2.21) kullanılarak bulunur (Balanis, 2005).

$$w = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.20)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.21)$$

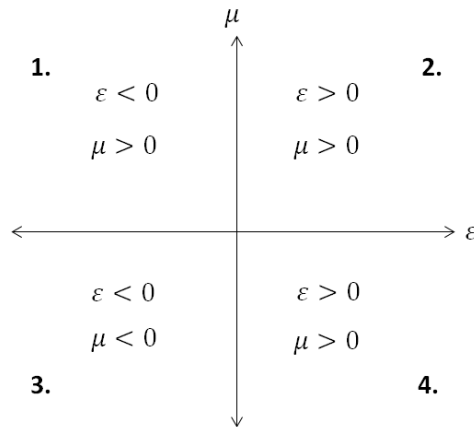
3. ANTENLER ARASIN İZOLASYON YAPILARI

Çoklu giriş çoklu çıkış sistemlerdeki antenler, aynı anda farklı kanallardan haberleşme olanağı sağlar. Ancak antenlerin karşılıklı bağlaşımı, iletişimde çeşitli olumsuzluklara sebep olur (Liu vd., 2013). Bu olumsuzluklara örnek olarak anten ışıma özelliklerinin değişmesi, gürültü seviyesinin artması vb. durumlar örnek verilebilir (Kumar ve Kommuri, 2019). Literatürde antenler arasında izolasyonu arttırmak için birçok yöntem ve yapı önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında metamalzeme yapılar, elektromanyetik bant aralığı oluşturan yapılar ve metalik hat yöntemleri açıklanmıştır.

3.1. Metamalzeme Yapılar

Metamalzemeler dielektrik geçirgenliği çok büyük veya küçük değerler alabilen ve belirli frekans bandında negatif olabilen yapılardır. Böylece negatif kırılma indisine sahip bir ortamın oluşturulabilmesini ve malzemenin elektro fiziksel özelliklerini doğrudan etkileyebilmeyi sağlar (Ghatak ve Gorai, 2021).

Doğada bulunan malzemeler sadece bir dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerine sahiptirler (Buriak vd., 2016). Ancak metamalzeme tasarımlar kullanılarak istenen dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip yapılar ortaya çıkarılabilir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerine göre 4 sınıfa ayrılabilir.



Şekil 3.1. Dielektrik ve manyetik geçirgenlik sınıflandırma tablosu

3.2. Elektromanyetik Bant Aralığı Oluşturan Yapılar

Belirli frekanslarda elektromanyetik dalgaların yayılmasını engelleyen veya gerekli durumlar için bir durdurma bandı oluşturan yapılara elektromanyetik bant aralığı oluşturan yapılar denir (Chen vd., 2014). Genel olarak, Elektromanyetik bant boşluğu (EBG) yapıları frekansa bağlı olarak yüksek empedans sağlayarak, elektromanyetik dalgaların yayılmasını engeller (Qian vd., 1999).

3.3. Metalik Hat

İki yapı arasındaki bağlaşımı engellemek için kullanılan yöntemlerden biri de yapılar arasına metalik hat yerleştirmektir (Ghannad vd., 2019).

4. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar için literatür özeti sunulmuştur.

Dash vd. (2022), izolasyonu daha iyi bir hale getirmek için anten aralıkları 1,8 mm olan MIMO anten tasarımına, antenler arası ters çatal olarak adlandırdıkları metalik bir yapı yerleştirmişlerdir. Yerleştirilen ters çatal metalik yapıya kısa devre işlemi uygulanarak, 5,45 GHz frekansında 30 dB seviyesinden daha iyi bir izolasyon iyileştirmesi sağladığını görmüşlerdir.

Singh ve Parihar (2022), Vivaldi anten yapısıyla oluşturdukları MIMO anten yapısı için antenler arası izolasyon yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, iki anten arasına iki eksenli anizotropik meta yüzey tasarlanmıştır. Bu meta yüzeyler ile birimleri sistematik olarak yerleştirerek, 15 dB seviyesinden daha iyi bir izolasyon değeri elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Emadeddin vd. (2017), bitişik iki yama antenin arasındaki izolasyonu arttırmak için bir yapı önerilmiştir. Bu yapı antenlerin toprak kısmına basit iki yarık yapısı oluşturularak ve antenler arasına farklı uzunluklarda kısa devre edilmiş 5 adet iletken şerit eklenerek oluşturulmuştur. Bu yapı sayesinde mikroşerit antenin üst yüzeyinde oluşan yüzey dalgaları ve uzay dalgalarının yayılmasını engellenmiştir. Çalışma sonucunda 4,32 GHz frekansında 41 dB seviyesinde izolasyon sağlanırken antenlerin ışıma özelliklerinde bir değişim olmadığı görülmüştür.

Fang vd. (2022), izolasyonu iyileştirmek adına dairesel yamalardan oluşan katlı bir yapı önermişlerdir. Yapının en alt katı alüminyum, orta katmanı FR-4 ve en üst katı ise Rogers 4003C malzemesi kullanılarak tasarlanmıştır. Alüminyum yapıya meta yüzey tasarımı yapılarak, antenler arasındaki izolasyon iyileştirilmiştir. Meta yüzey yapıları ile antenin akım ve polarizasyon modu değiştirilerek, 1,83 GHz ve 2,17 GHz frekans bandı arasında 6 ile 21 dB değerleri arasında izolasyon iyileşmesi raporlanmıştır.

Mao vd. (2021), 2,58 GHz ve 4,8 GHz rezonans frekanslarında çalışabilen bir MIMO anten yapısının arasına yerleştirilen bir yapı sayesinde izolasyonun iyileşmesini sağlayan bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem ile bozulmuş zemin yapısı ve dikdörtgen metal şerit kullanılarak tasarlanan yapı, sırasıyla 22 dB ve 19 dB seviyesinde bir izolasyon iyileşmesini sağlayarak, iki frekans bandında da izolasyonu iyileştirdiği görülmüştür.

Kumar vd. (2022), geniş bant ve iyi bir izolasyon ile çalışan yarım daire biçimli monopol anten dizi yapısında bir MIMO anten tasarımı sunmuşlardır. Bozulmuş zemin yapısı ve farklı metalik yapılar kullanılarak 20 dB üzeri izolasyonun iyileştirilmesini sağlayan bu yapı, 4,06 GHz ve 16,5 GHz frekans bandı aralığında çalışmaktadır.

Bhattacharjee vd. (2022), seçici yüzey adını verdikleri yapıyı iki mikroşerit yama anten arasına yerleştirerek, izolasyonun 3,7 GHz rezonans frekansında 50 dB seviyesinde iyileşmesini sağlamışlardır.

Arun vd. (2014), bu çalışmalarında bir anten dizisi ve bu antenler arasındaki izolasyonu iyileştirebilmek için antenler arasına modifiye serpantin adını verdikleri bir yapı tasarlamışlardır. Bu yapı 1×2 düzeninde ve aralarında 6 mm bulunan antenlere uygulandığında, 2,45 GHz'de 44 dB seviyesinde bir izolasyon sağladığı görülmüştür.

Farahani vd. (2010), hem dizi antenler arasındaki izolasyonu arttırılmasını sağlayan hem de antenlerin yönlülüğünün artmasını sağlayan bir EBG tasarımı sunmuşlardır. Bu EBG yapısını antenleri çevreleyen alttaşın üst katmanına yerleştirerek, rezonans frekansını değiştirmeden yama antenlerin saçaklanmalarını azaltmayı sağlamışlardır. Bu yapı sayesinde 5,75 GHz frekansında 10 dB seviyesinde izolasyon iyileştirmesi sağlanmıştır.

Lee vd. (2015), EBG ve SRR yapısının birlikte kullanılması ile izolasyonu iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Birbirine yakın iki monopol anten arasına, antenler ile eş düzlemliler olarak bir EBG yapı ve bu antenlerin alt yüzeyine ise bir

SRR yapısı eklenerek, izolasyonun 42 dB seviyesinde iyileştirilmesi sağlanmıştır. Bunun yanı sıra antenlerin ışıyan arka loblarının 6 dB seviyesinde azalması sağlanmıştır. Böylece, izolasyon seviyesinin arttırılmasının yanında, antenlerin ışıma verimliliğinin de arttırıldığı rapor edilmiştir.

Kumar ve Kommuri (2019), aralarında $0,15 \lambda$ mesafe bulunan antenlere eş düzlemde bir metalik hat eklemiş ve antenlerin alt yüzeyine 6×2 düzeninde bir EBG yapı tasarlamışlardır. Bu tasarım ile antenlerin H-düzlemi etkilerini azaltmışlar ve böylece WLAN frekans bandı olan 5,8 GHz için 21,8 dB seviyesinde izolasyon iyileştirmesi sağlamışlardır.

Ghannad vd. (2019), antenlerin besleme hatlarına bağlı iki dar T-şekilli saplama yapısı ve bu yapılar arasına bir dikdörtgen metalik hat ile zemine dar bir dikdörtgen yarık eklenerek oluşturulan düşük profilli bir yapı önerilmişlerdir. T-şekilli saplamalar ve metalik hat eklenmesi, antenin empedans uyumlandırmasını sağlamıştır. Metalik hat ve toprak zeminde bulunan yarık ile 5,5 GHz'de izolasyonun 50 dB seviyelerinde olduğu görülmüştür. Önerilen yapı sayesinde antenlerin yakın mesafede yüksek izolasyon sağlandığı rapor edilmiştir.

Yu vd. (2018), 3-D Metamalzeme olarak adlandırdıkları bir yapı önermiştir. İki elemanlı anten yapısının iki kısa pim ile birbirine bağlanan bir üst M-şekilli yamadan ve iki alt U-şekilli yamadan oluşur. 5 adet yapı antenler arasına yerleştirilmiştir. Yapılar benzetim programları ile optimize edilip 2,38 GHz'de 18 dB seviyesinde bir izolasyon iyileşmesi sağlamıştır. Antenler arasındaki mesafe $0,13 \lambda$ olarak verilmiştir.

Xia vd. (2018), 5,3 GHz'de çalışan iki yama antenin izolasyon seviyesinin iyileştirilmesi için metamalzeme yapı önermiştir. Antenlerin uçtan uca mesafesi 11 mm olan düzende antenler arasına modifiye edilmiş ve üçe bölünmüş rezonatör halkalar tasarlanmıştır. Bu yapılar antenle eş düzlemsel olarak yerleştirilmiştir. 12,3 dB seviyesinde bir izolasyon iyileştirmesi sağlamıştır.

Luo vd. (2018), MIMO anten dizisinin tepesine periyodik metamalzeme hücrelerinden oluşan 13×9 düzeninde asılı bir meta yüzey kullanılarak düşük korelasyon uygulanır. Optimizasyon araçları kullanılarak nihai sonuca varılmıştır. Kazançta 3 dB seviyesinde bir artış ve 30 dB seviyesinde izolasyon sağlandığı raporlanmıştır.

Salah vd. (2020), WLAN ve 5G uygulamaları için çalışabilen çift bant frekansta MIMO anten ve bu anten yapısı için izolasyon iyileştirme yöntemi önerilmiştir. 2,4 GHz frekansında rezonansa giren dört SRR yerleştirilerek uygulanır. Yapı 2,4 GHz frekansında 30 dB, 3,6 GHz frekansında 20 dB seviyesinde bir izolasyon sağlandığı raporlanmıştır.

Luo vd. (2019), WLAN uygulamaları için çift bant frekanslı dizi anten ve izolasyon yöntemi önermişlerdir. 2×6 düzeninde yerleştirilmiş metamalzeme yapıları çift frekansta rezonansa gelerek izolasyonu iyileştirmiştir. 2,4 GHz frekansında 15 dB ve 5,25 GHz frekansında 9 dB izolasyon iyileştirmesi raporlanmıştır. Yapının, antenlerin ışıma karakteristiklerini etkilemediği görülmüştür.

Si vd. (2019), çok yakın antenler aralarındaki izolasyonu arttırmak için farklı bir metamalzeme önermişlerdir. Bu çalışmada metamalzemenin çalışma frekansı geniş bir banda etki göstermektedir. 4,2 – 5,25 GHz aralığında 15 dB izolasyon iyileşmesi raporlanmıştır.

Iqbal vd. (2018), kablosuz uygulamalar için 5,8 GHz merkez frekansında çalışan antenler arasına metamalzeme yapısı önermişlerdir. Korelasyon katsayısının düşük, yüksek kazanç ve düşük kanal kapasite kaybı sağlamaktadır. Önerilen yapı ile 24,5 dB seviyesinde bir izolasyon, 0,1'den küçük korelasyon katsayısı, 9 dB'den düşük kanal kayıp kapasitesi sağlanmıştır.

Kumar vd. (2018), üç farklı frekans bandında çalışan antenler ve antenler aralarında izolasyonu arttıran dört tamamlayıcı halka rezonatör (CSRR) olarak adlandırılan yapı önerilmiştir. Bu yapıda 850–900 MHz, 1725–1770 MHz ve

2410–2466 MHz bantları arasında çalışılmıştır. Her bant için izolasyon sağlanmış ve frekans bantlarında bir tanesi haricinde değişiklik görülmemiştir. Tasarım 4×4 MIMO anten tasarımı için yapılmıştır. Her bir antenin alt bölümüne dairesel bir yapı tasarlanmış ve E-düzlem için antene eş düzlemde kare bir yapı tasarlanarak tasarım tamamlanmıştır.

Sushmeetha ve Natarajamani (2018), açık kenarlı bölünmüş halka rezonatörler (SRR) kullanarak farklı bir anten tasarımında izolasyon sağlamışlardır. Önerilen yapı kenarları açık SRR'lar, tipik SRR yapısının kenarları kaldırılmış halidir. Empedans eşleştirmesi için önerilen kenar açık SRR'nın hem iç hem de dış halkalarına farklı boyutlarda iki açık saplama bağlanmış ve sırasıyla yaklaşık 700 MHz ve 400 MHz bant genişliğine sahip 8,5 GHz ve 11,4 GHz merkez frekanslarında iki geçiş bandı oluşturulmuştur.

Qamar ve Park (2014), hem E-düzlemi hem de H-düzlemi için izolasyonu iyileştirecek bir yöntem önermiştir. Tasarım katlanmış, bölünmüş halka rezonatör olarak adlandırılmıştır. Antenler arasına yerleştirilen yapı E-düzlemi için 18 dB izolasyon iyileşmesi ve H-düzlemi için 9 dB izolasyon iyileştirmesi sağladığı olarak raporlanmıştır. Antenler arasındaki mesafe $0,093 \lambda$ olarak verilmiştir. Yapı hem arka yüzeye hem de antenle eş düzlemli yüzeye yerleştirilmiştir.

Yang vd. (2017), mikroşerit anten dizi yapısına, bir dizi fraktal tek düzlemli kompakt elektromanyetik bant aralığı oluşturan yapı önermiştir. Karşılıklı bağlantıyı daha fazla azaltmak için toprak düzlemi üzerine kazınmış üç çapraz yarık yerleştirilmiştir. Antenlerin toprak bölümleri birbirinden ayrılmıştır. 5,05 GHz için 16 dB izolasyon iyileştirilmiştir. Uçtan uca mesafesi $0,22 \lambda$ olarak verilmiştir.

Vishvakshen vd. (2017), çalışmasında bir çift paralel bağlı hat rezonatörün (PCR) uygulamasını sunulmuştur. Her PCR, küçük bir bağlantı mesafesi ile ayrılmış üç bağlı hattın oluşur. 3,5 GHz frekansı için bant bastırma özellikleri

sağlar. Bant durdurma özelliklerini geliştirmek için iki PCR çoğaltılır. İzolasyonda 26,2 dB seviyesinde izolasyon iyileştirmesi sağlanmıştır.

Liu vd. (2016) çalışmada izolasyon iyileştirmesi için farklı bir metamalzeme önerisinde bulunmuştur. Yapay olarak tasarlanmış dielektrik ve geçirgenlik özelliği nedeniyle metamalzeme tasarımı izolasyon iyileştirmesinde kullanılmıştır. Boşluk engelleyicisi ve sınır kılavuzu adlarını verdikleri yapıları birleştirerek izolasyonu iyileştirmişlerdir. Bu yapılar bir metal hat ve ona dik iki hatların ortan birleştirilerek oluşturulan yapıdır. Ortada birbiriyle eş ve mesafeli olan diğer metalik hat ile dik bir şekilde birleştirilerek rezonatif bir etkiye sebep olmaktadır. 2×2 düzeninde anten yapısına izolasyon sağlayabilmek için antenlerin tek yönlerine eş şekilde yerleştirilmiştir.

Jiang vd. (2016), 1×2 düzeninde anten yapısına periyodik L şeklinde yapı ve E-şekilli elektromanyetik bant aralığı oluşturan yapıyı birlikte önermişlerdir. Yapı ortasından kısa devre yapılmıştır. Önerdikleri yapıda antenler arası mesafe $0,26 \lambda$ olarak verilmiştir. 2,55 GHz merkez frekansında 26 dB izolasyon iyileştirmesi sağlamıştır.

Yang ve Rahmat-Samii (2003), çalışmalarında mantar benzeri elektromanyetik bant boşluğu oluşturan yapılar önemişlerdir. Mantar benzeri denmesinin sebebi kare olan yapıların orta kısımlarında kısa devre yapılmasıdır. Yapılar 8 dB seviyesinde izolasyon iyileşmesi sağlamıştır.

Ming-Chun vd. (2010), ayırık halka rezonatörleri ile yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem ayırık halka rezonatörleri, antenlere eş düzlemine ve anten toprak yüzeyine yerleştirilerek tasarlanmıştır. Tasarım ile yan lobların ışıması engellenmiş ve 9,07 dB seviyesinde izolasyon iyileşmesi sağlamışlardır.

Bait-Suwailam vd. (2010), çalışmalarında tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörler kullandıkları bir yapı önermişlerdir. Önerilen yapı ile $1/4$ boş alan dalga boyu ayrımıyla iki yama anten arasındaki karşılıklı izolasyon 10 dB seviyesinde bir izolasyon iyileşmesi elde edilmiştir. Önerilen yapının bir diğer avantajı ise geniş bantta kullanılabilir olmasıdır.

5. ANTEN VE İZOLASYON YAPISININ TASARIMI

MIMO anten tasarımlarında, antenler arası izolasyonun iyi olması istenir. Bunun nedenlerine genel olarak giriş bölümünde değinilmiştir. Literatürde farklı anten ve sistemlere yönelik, farklı izolasyon iyileştirme yöntemleri önerilmektedir (Liu vd., 2016; Bait-Suwailam vd., 2010; Salah vd., 2020). Bu çalışmada ise 5G frekansı olarak belirlenen 3,5 GHz için MIMO anten sisteminde 2×1 düzeninde birbirine eş mikroşerit yama anten tasarımı yapılarak, antenler arası izolasyon iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçların bir kısmı 24-26 Kasım 2022 tarihleri arasında Bursa'da gerçekleştirilen Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2022)'nda sözlü olarak sunulmuş ve tam metin olarak yayımlanmıştır (Ayvacı ve Ekmekçi, 2022).

İzolasyon yapısının tasarımına ilk olarak 2×1 düzeninde mikroşerit anten yapısının tasarımı yapılarak başlanmıştır. Anten tasarımında anten uçları arasındaki mesafe 6 mm olarak belirlenerek, referans anten (RDA) tasarımı ortaya çıkarılmıştır.

Referans antende, antenler arasında izolasyonu sağlayabilmek için ilk olarak antenler arasına metalik hat yerleştirilmiştir. Metalik hattın en ve boy uzunlukları değiştirilerek $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafikleri gözlemlenmiştir. Metalik hat dışında, bozulmamış toprak düzlemine farklı tasarımda yapıların parametre boyutları değiştirilerek $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafikleri raporlanmıştır.

Elde edilen sonuçlara ilave olarak metalik hat ve bozulmamış toprak düzlemine 4 adet tamamlayıcı kapalı halka rezonatörü (TKHR) eklenmiş ve benzetim sonuçları gözlemlenmiştir. Benzetimleri yapılan çalışmalarda iki anten arasına metalik hat ve bozulmamış toprak düzlemine ise tamamlayıcı kapalı halka rezonatörler eklenerek iki yapının parametreleri değiştirilmiş ve izolasyonun iyileştirmesi sağlanmıştır. Ancak parametrelerin sayısal olarak hesaplanması karmaşık bir hal aldığından, optimizasyon araçları ile nihai sonuca varılmıştır.

Eklenen metalik hat ve rezonatör yapısının birbirlerine etkisi ile en iyi sonuca ulaşılmıştır. Bu sebeple iki yapının aynı anda tasarımda bulunduğu durum için optimizasyon aracı kullanılmıştır.

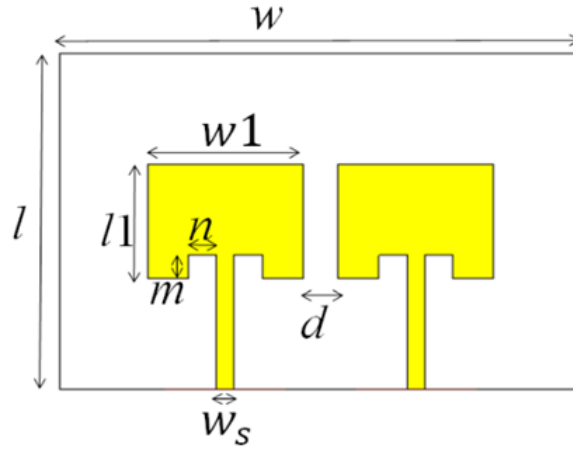
Önerilen anten yapılarının benzetimleri CST Studio Suite® ile gerçekleştirilmiş ve tasarlanan nihai antenlerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

5.1. Benzetim Sonuçları ve Analizi

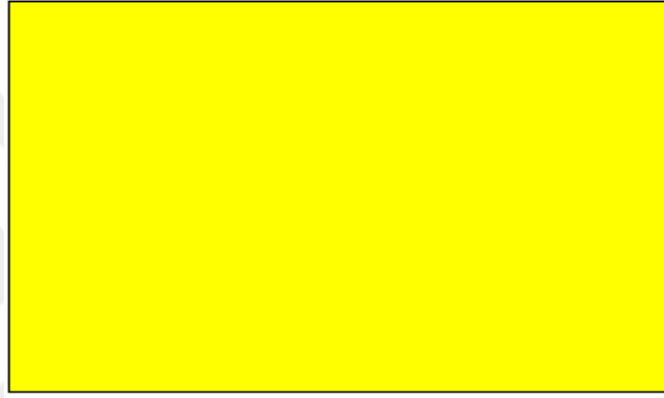
Bu kısımda tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen benzetimler neticesinde alınan sonular ve analizleri verilmektedir.

5.1.1. Referans anten dizisinin tasarımı

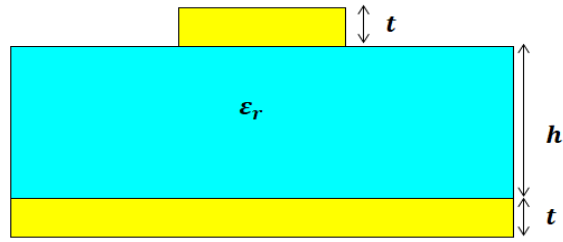
Bu tez çalışmasında önerilen MIMO anten tasarımlarında, antenler arası izolasyonu iyileştirmek için tasarlanan yapının performans analizlerinde RDA olarak dikdörtgen mikroşerit yama anten dizi yapısı belirlenmiş ve CST Studio Suite® araçları kullanılarak 3,5 GHz merkez frekansı için tasarlanan yapının benzetimi yapılmıştır. Referans antenin ön yüz şematik görünümü ve aynı zamanda tasarımda kullanılan parametreleri Şekil 5.1'de, tamamen toprak düzlemine sahip (tamamen bakır) olan arka düzleminin şematik görünümü Şekil 5.2'de ve antenin besleme tarafından bakılarak yandan şematik görünümü Şekil 5.3'te sunulmuştur. Tasarımda kullanılan parametreler; w alttaş genişliği, w_1 yamanın genişliği, l alttaş uzunluğu, l_1 yamanın uzunluğu, w_s besleme hattının genişliği, m besleme hattının girinti uzunluğu, n besleme hattının girtisinin sebep olduğu en, h dielektrik yapının yüksekliği, t metal kalınlığı ve d antenler arası mesafedir. Anten tasarımında alttaş olarak FR-4 malzemesi kullanılmıştır. Benzetimler için FR-4 dielektrik sabiti (ϵ_r) 4,38, kayıp tanjantı ($\tan\delta$) 0,025 olarak kullanılmıştır. Önerilen referans anten için kullanılan parametreler Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Referans antenin ön yüz şematik görünümü



Şekil 5.2. Antenin toprak düzlemi şematik görünümü

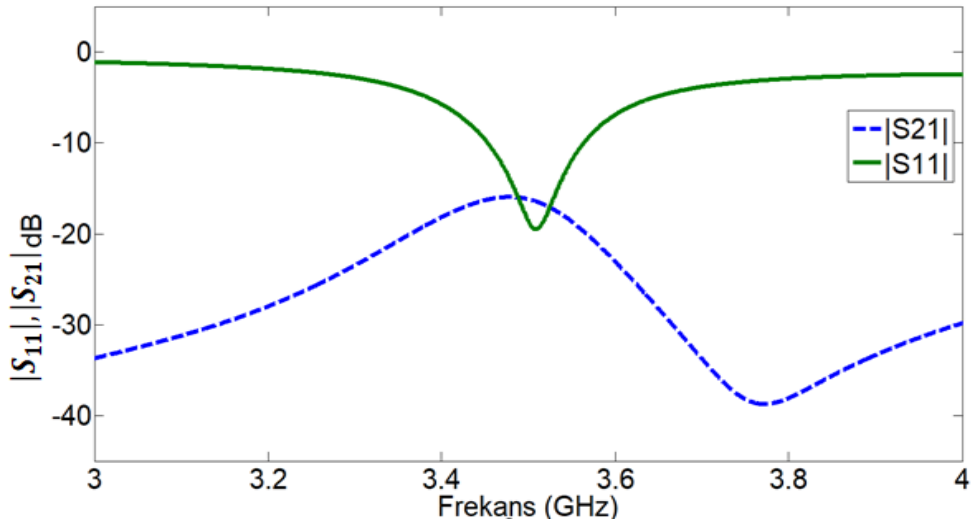


Şekil 5.3. Antenin yandan şematik görünümü

Çizelge 5.1. Referans dikdörtgen mikroşerit antenin tasarım parametreleri, açıklamaları ve değerleri

Parametre	Açıklaması	Değeri (mm)
w	Alttaş genişliği	90
w_1	Yamanın genişliği	31
l	Alttaş uzunluğu	60
l_1	Yamanın uzunluğu	20,14
w_s	Besleme hattının genişliği	2,85
m	Besleme hattı girintisinin uzunluğu	4
n	Besleme hattı girintisinin eni	4,87
d	Antenler arası mesafe	6

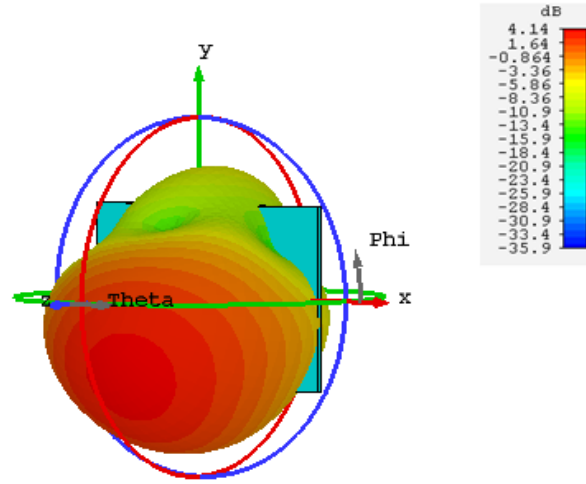
Tekli mikroşerit anten tasarım parametrelerinde kullanılan denklem (2.20) ve denklem (2.21), referans anten tasarımı için geçerli olmamaktadır. Dizi anten yapısı ile denklemler daha karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle referans anten dizisinin tasarımı için CST Studio Suite® araçları kullanılmıştır. Tasarlanan anten yapısının nümerik olarak rezonans frekansı incelenmiştir. Antenlerin dB cinsinden $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafikleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Referans antenin nümerik elde edilen $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafikleri

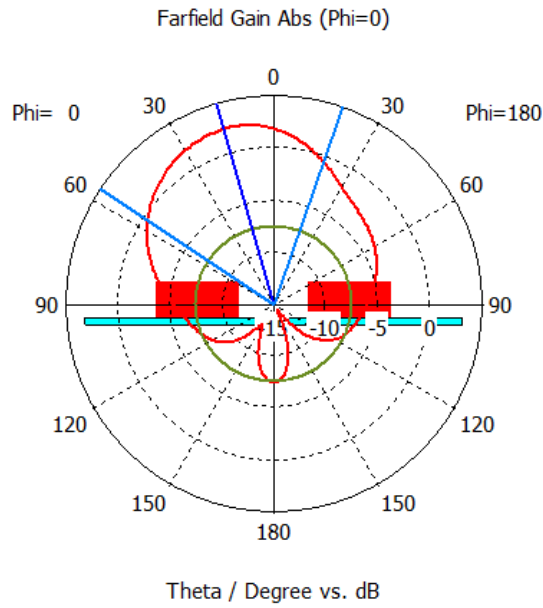
Referans anten dizisinin tasarımı, CST Studio Suite® ile elde edilen S -parametre genlik sonuçlarında 3,5 GHz'de $|S_{11}|$ değeri -18,50 dB ve $|S_{21}|$ değeri -16,17 dB'dir.

Şekil 5.1'deki referans anten dizisinde birbirine eş olan iki antenden sol taraftaki antenin, kazanç grafiği dB cinsinden Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

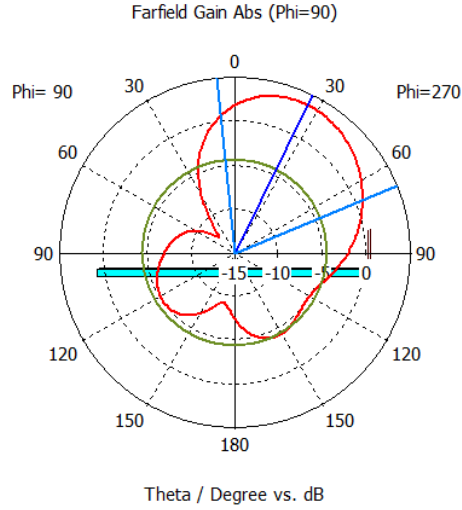


Şekil 5.5. Referans antenin benzetim ile elde edilen kazanç grafiği

Referans anten dizisinin sol tarafında yer alan antenin, rezonans frekansında kazancı 4,136 dB, yönlülük değeri ise 7,543 dBi olarak görülmüştür. Antenin 3,5 GHz'de $\Phi=0^\circ$ ve $\Phi=90^\circ$ uzak alan ışıma benzetim sonuçları Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Referans antenin $\Phi=0^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları



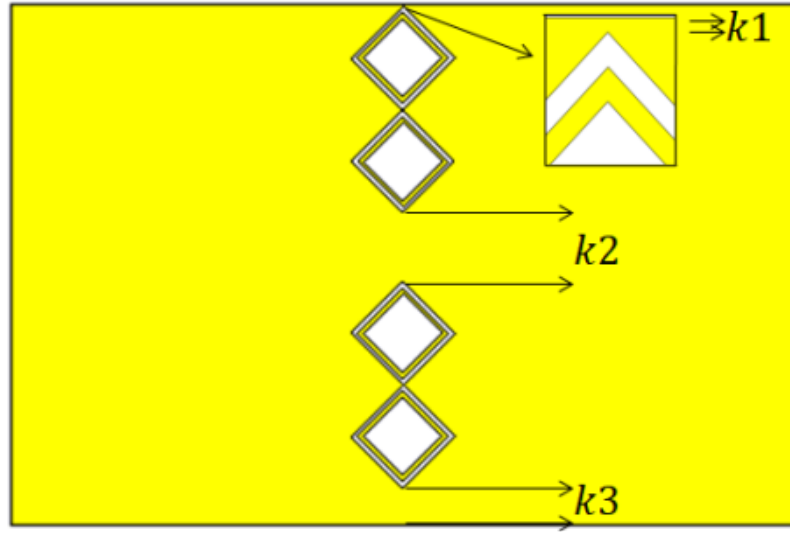
Şekil 5.7. Referans antenin $\Phi=90^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları.

Önerilen RDA yapısının tasarımında iki anten Şekil 5.1'deki gibi aynı düzlemde konumlandırılmış ve CST Studio Suite® benzetim programı kullanılarak anten parametreleri optimize edilmiştir. Tasarım sürecinde, besleme hattı ve anten giriş empedansları arasında oluşan empedans uyumsuzluğunu gidermek için antenlerin her birine girintiler oluşturulmuştur. RDA yapısının benzetim sonucunun, Şekil 5.4'te verilen grafiğe göre 3,5 GHz frekansında $|S_{11}|$ değerinin $-18,50$ dB olduğu görülmüştür. Bu sonuç RDA yapısının empedans uyumunun başarısını açıkça göstermektedir.

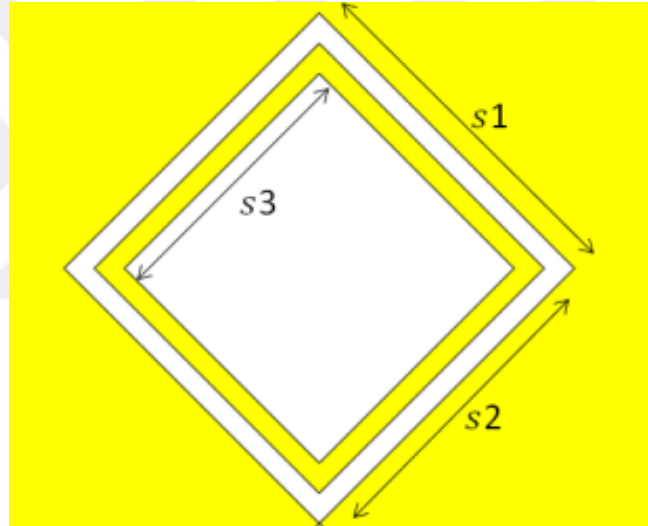
5.1.2. İzolasyon yapıları anten tasarımı

Bu çalışma kapsamında, izolasyon yapıları anten tasarımı için birçok yapı denenmiştir. Çalışmadaki denenmiş yapılar arasında, literatürde yer almayan bir yöntem üzerinde durulmuştur. Bu yöntemde, anten yapısının bozulmamış toprak yüzeyine 4 adet 45° döndürülmüş tamamlayıcı kapalı rezonatör kazınmış ve rezonatör yapısının parametreleri optimize edilerek sonuçların iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Çalışmadaki yöntemlerden bir diğerinde, aynı düzlemdeki antenler arasına metalik bir hat yerleştirilmiş ve toprak yüzeyi bozulmamış şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarımda Çizelge 5.1'de verilen dikdörtgen mikroşerit antenin tasarım parametreleri sabit tutulmuş ve araya yerleştirilen metalik hattın boyutları değiştirilerek sonuçlar gözlemlenmiştir.

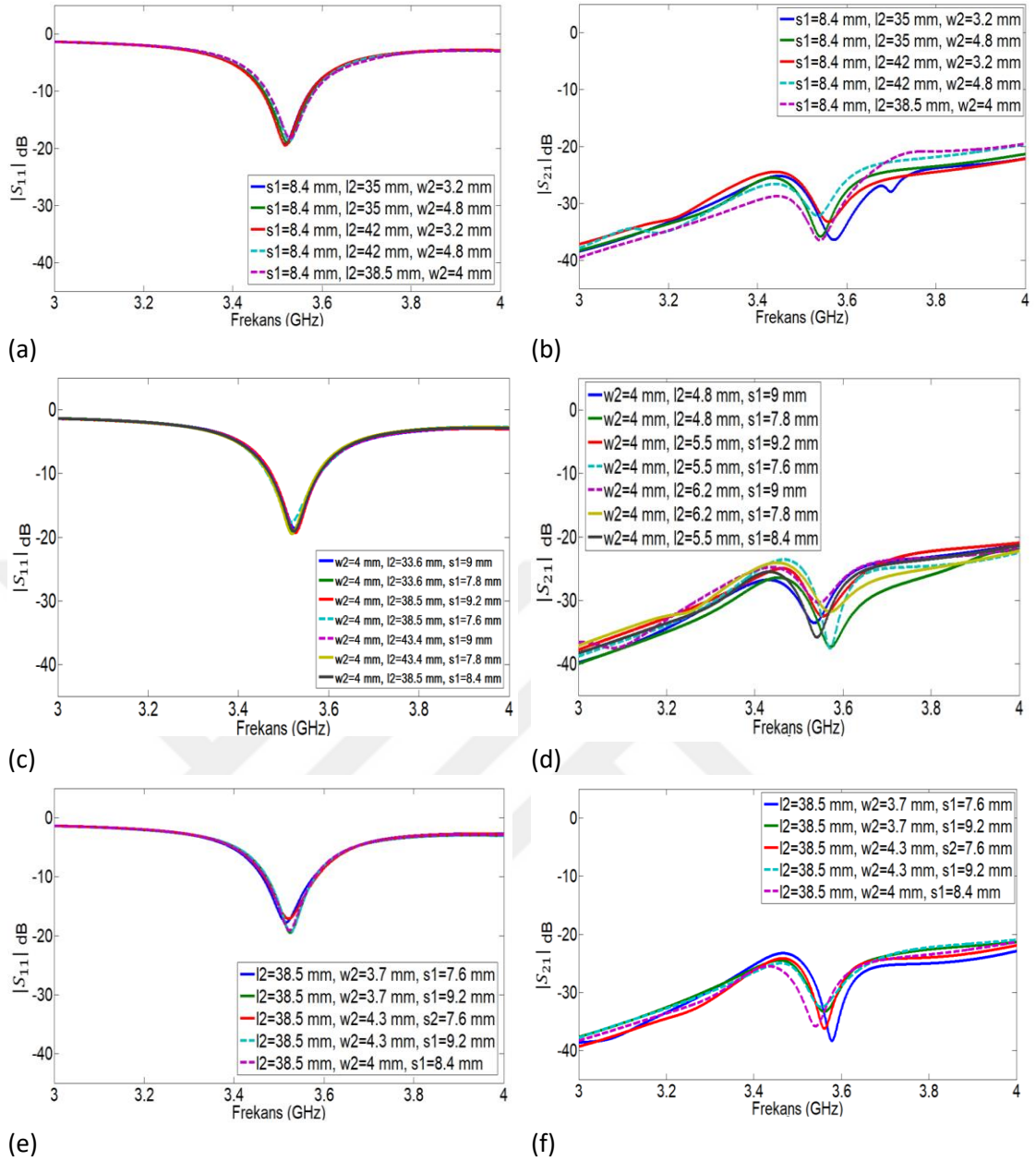


Şekil 5.9. IDA toprak yüzeyi, rezonatör yapısı şematik görünümü ve tasarım parametreleri



Şekil 5.10. Rezonatör yapısı şematik görünümü ve tasarım parametreleri

Önerilen IDA yapısındaki metalik hat ve rezonatörün parametrelerinin değişiminin sonuçlara etkisi benzetim programı aracılığıyla gözlemlenmiştir. Metalik hat ve rezonatör yapının izolasyona etkileri sebebiyle $s1$, $w2$ ve $l2$ parametrelerinin sonuçlara etkisi ayrı ayrı incelenmiş ve bu parametre değişimlerinin sonuçlara etkisi Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Önerilen IDA yapısının (a) s_1 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $|S_{11}|$, (b) s_1 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $|S_{21}|$, (c) w_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $|S_{11}|$, (d) w_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $|S_{21}|$, (e) l_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $|S_{11}|$ ve (f) l_2 parametresi sabit tutularak nümerik olarak elde edilen $|S_{21}|$ grafikleri

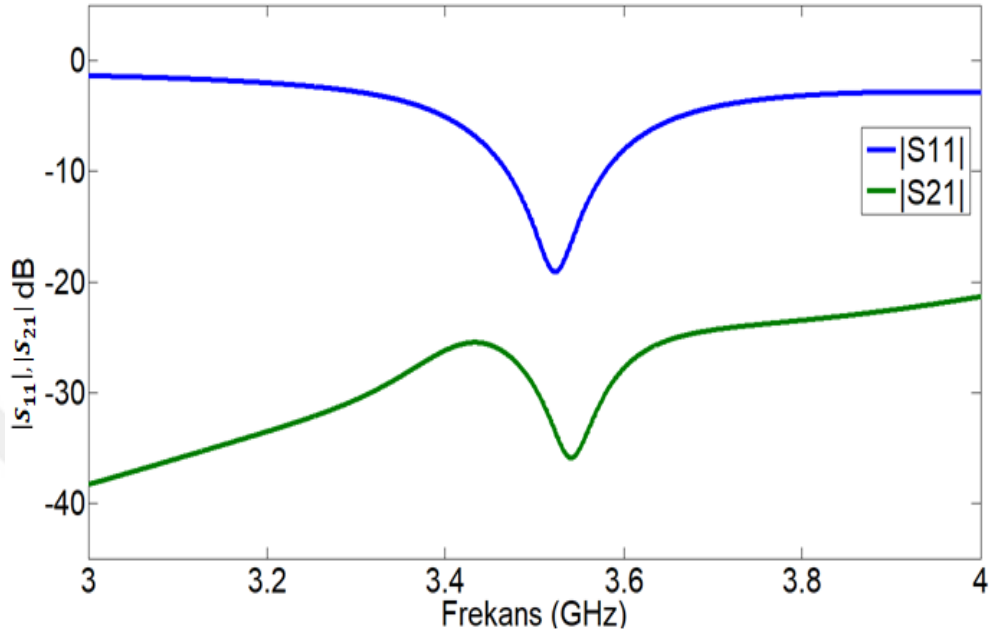
İlk olarak önerilen IDA tasarımıındaki rezonatör yapısının s_1 parametresi sabit tutulurken metalik hat yapısındaki w_2 ve l_2 değerleri değiştirilmiş bu parametrelerin izolasyona etkileri incelenmiştir. w_2 ve l_2 parametrelerinin değişiminin $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafiklerine etkisi sırasıyla Şekil 5.11 (a) ve Şekil 5.11

(b)'de verilmiştir. İkinci olarak önerilen yapıdaki metalik hat yapısının w_2 parametresi sabit tutulurken, tasarımdaki s_1 ve l_2 değerleri değiştirilmiş ve bu parametre değişimlerinin $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafiklerine etkisi sırasıyla Şekil 5.11 (c) ve Şekil 5.11 (d)'de verilmiştir. Son olarak önerilen yapıdaki metalik hat yapısının l_2 parametresi sabit tutulurken, tasarımdaki s_1 ve w_2 değerleri parametrik olarak değiştirilmiş ve bu parametrelerin değişiminin sonuçlara $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafiklerine etkisi sırasıyla Şekil 5.11 (e) ve Şekil 5.11 (f)'de verilmiştir. Şekil 5.11'de verilen tüm grafikler incelendiğinde parametre değişimlerinin $|S_{11}|$ sonuçlarında anlamlı bir farklılık oluşturmadığı, $|S_{21}|$ sonuçlarına bakıldığında çizimlerin daha belirgin değiştiği ve nihayetinde s_1 parametresi 8,4 mm'ye, w_2 parametresi 4 mm'ye ve l_2 parametresi 38,5 mm'ye eşit olduğu durumda izolasyon için en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. En iyi izolasyon sonucunu alınan yapının, 3,523 GHz rezonans frekansında ve -33,46 dB izolasyon sağladığı görülmüştür. Önerilen IDA yapısının tüm parametreleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Metalik hat, rezonatör yapısı ve dikdörtgen mikroşerit antene ait tasarım parametreleri, açıklamaları ve değerleri

Parametre	Açıklaması	Değeri (mm)
w	Alttaş genişliği	90
w_1	Yamanın genişliği	31
l	Alttaş boyu	60
l_1	Yamanın boyu	20,14
w_s	Besleme hattının genişliği	2,85
m	Besleme hattı girintisinin uzunluğu	4
n	Besleme hattı girintisinin eni	4,87
d	Antenler arası mesafe	6
w_2	Metalik hat genişliği	4
l_2	Metalik hat uzunluğu	38,5
k_1	Alttaş üst uç noktası ve rezonatör uç mesafesi	0,3
k_2	İki rezonatör arasındaki mesafe	7,87
k_3	Alttaş alt uç noktası ve rezonatör uç mesafesi	4,3
s_1	Kazınmış büyük kare dış uzunluğu	8,4
s_2	Kazınmış büyük kare iç uzunluğu	7,4
s_3	Kazınmış küçük kare uzunluğu	6,4

Çizelge 5.2’de verilen parametre değerleri kullanılarak yapılan benzetimin, nümerik olarak elde edilen dB cinsinden $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafikleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir.

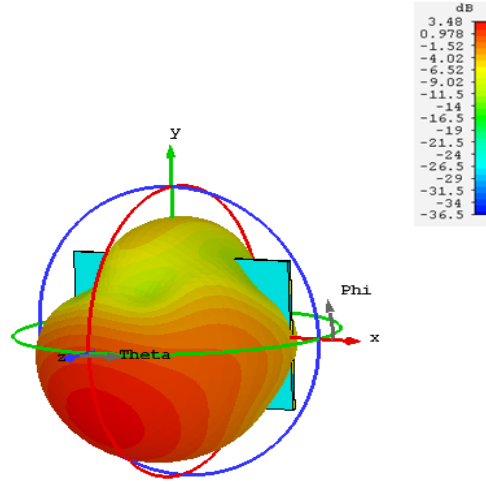


Şekil 5.12. Önerilen IDA yapısının nümerik olarak elde edilen $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ grafikleri

Önerilen IDA yapısının rezonans frekansının, kullanılan metalik hat ve rezonatör yapıların etkisi ile RDA yapısının rezonans frekansından farklı olarak 3,5 GHz’den, 3,523 GHz’e kaydıği görülmüştür. IDA yapısının 3,5 GHz ve 3,523 GHz frekansları için alınan $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ ’nin genlik değerleri desibel (dB) cinsinden Çizelge 5.3’te verilmiştir.

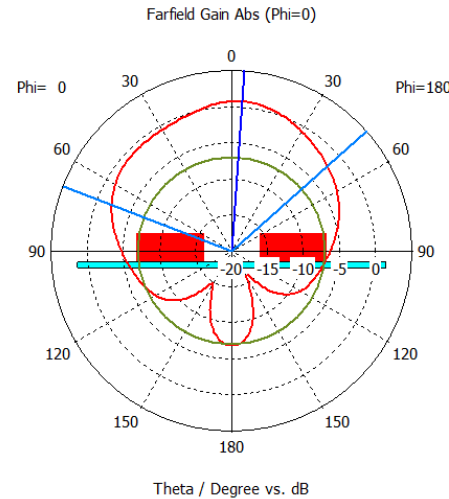
Çizelge 5.3. Önerilen IDA anteninin $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ değerleri

Frekans (GHz)	$ S_{11} $ (dB)	$ S_{21} $ (dB)
3,5	-15,18	-29,47
3,523	-19,10	-33,46

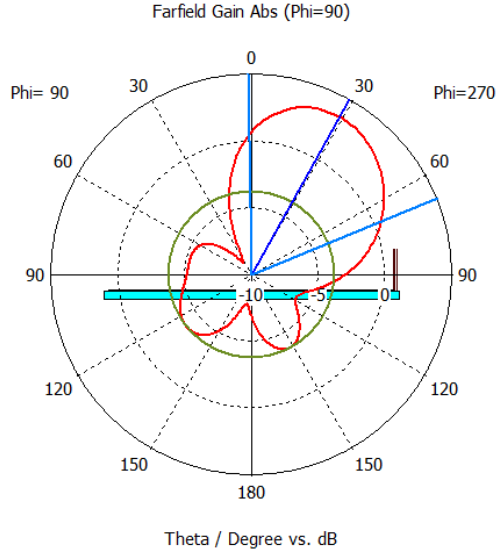


Şekil 5.13. Önerilen IDA yapısının 3,523 GHz için benzetim sonucu elde edilen kazanç grafiği

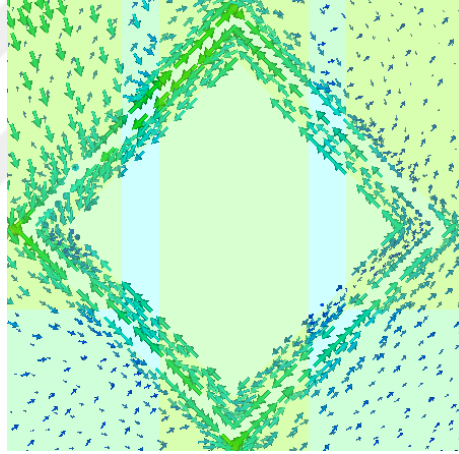
Önerilen IDA tasarımının rezonans oluşturduğu 3,523 GHz için Şekil 5.8'deki birbirine eş olan antenlerden sol tarafta bulunan antenin kazanç grafiği dB cinsinden Şekil 5.13'te verilmektedir. Önerilen IDA antenin yapılan benzetimi sonucunda merkez frekansı için kazancının 3,478 dB, yönlülük değerinin ise 7,206 dBi olduğu görülmüştür. RDA yapısına göre kazanç ve yönlülükte kayda değer bir kayba neden olmamıştır. Antenin 3,523 GHz'de, $\Phi=0^\circ$ ve $\Phi=90^\circ$ uzak alan ışıma benzetim sonuçları Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Önerilen IDA yapısının $\Phi=0^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları



Şekil 5.15. Önerilen IDA yapısının $\Phi=90^\circ$ 'da uzak alan ışıma benzetim sonuçları

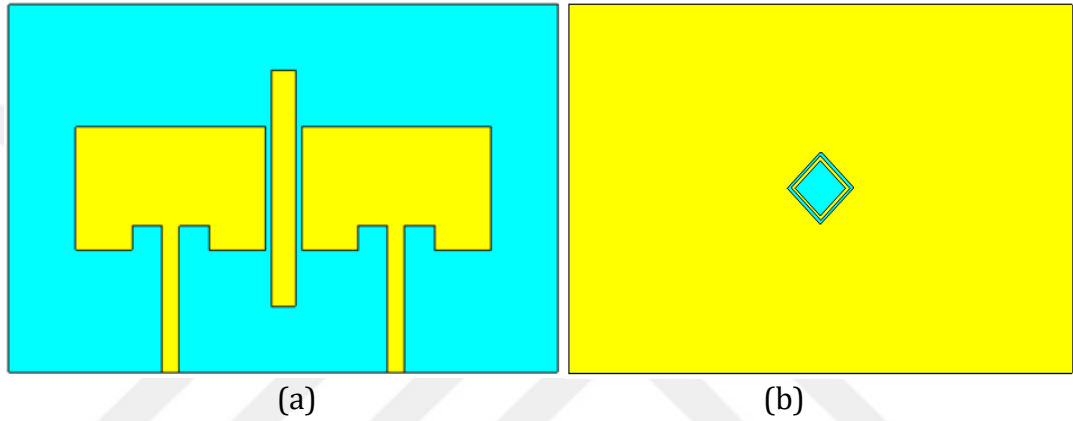


Şekil 5.16. Rezonatör yapısının yüzey akım yoğunluk dağılımı

Rezonatör yapısının yüzey akım yoğunluğu dağılımı Şekil 5.16'da sunulmuştur. Yüzey akım yoğunluğu dağılımına bakıldığında, IDA yapısının toprak yüzeyi ve rezonatörün iç bölümünde bulunan metalik kare yapısında, birbirlerine zıt yönlü akım dağılımları görülmektedir. Bu gözlem, yapının tamamlayıcı kapalı halka rezonatör olarak etki sağladığını göstermektedir.

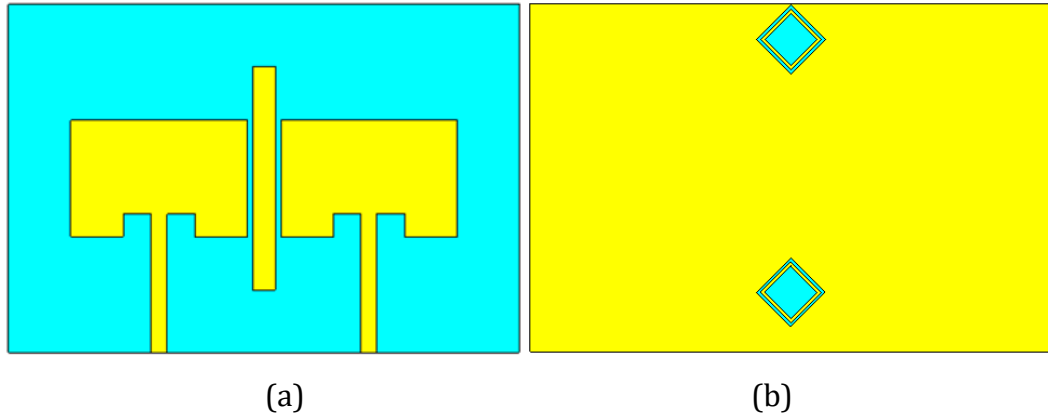
5.1.2.2. Bozulmamış toprak yüzeyde bulunan rezonatörlerin etkilerinin incelenmesi

Tasarlanan IDA yapısında kullanılan 4 adet rezonatörün etkilerini incelemek adına 3 farklı anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten 1 yapısının tasarımında metalik hat ve toprak yüzeyde bir adet rezonatör yapısı bulunmaktadır. Rezonatör yapısının konumu, Anten 1 yapısının arka kısmından tam ortaya gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu yapı Şekil 5.17’de gösterilmektedir.



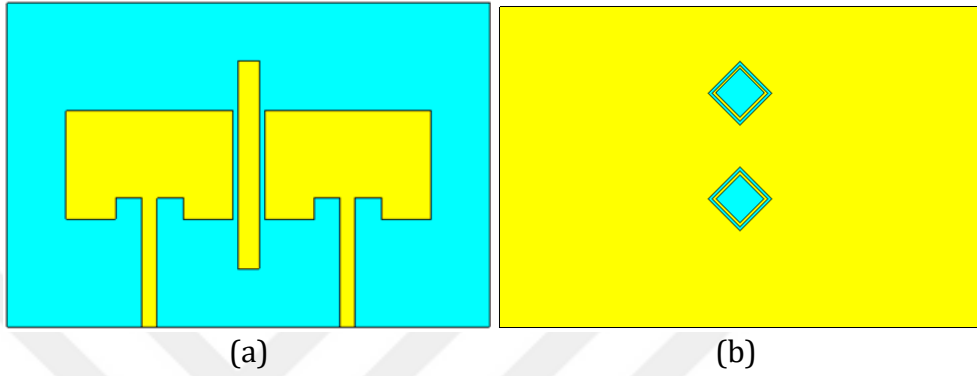
Şekil 5.17. Anten 1 yapısının (a) ön yüzü şematik görünümü (b) toprak yüzeyi şematik görünümü

Anten 2, anten eş düzlemine metalik hat ve antenin toprak yüzeyine iki adet rezonatör yapısı eklenerek tasarlanmıştır. Yerleştirilen 2 rezonatörün konumu Şekil 5.18 (b)’de gösterilmiştir. Tasarlanan yapı, IDA yapısından 2 adet rezonatörün çıkarılması ile oluşturulmuştur ve Şekil 5.18’de gösterilmektedir.

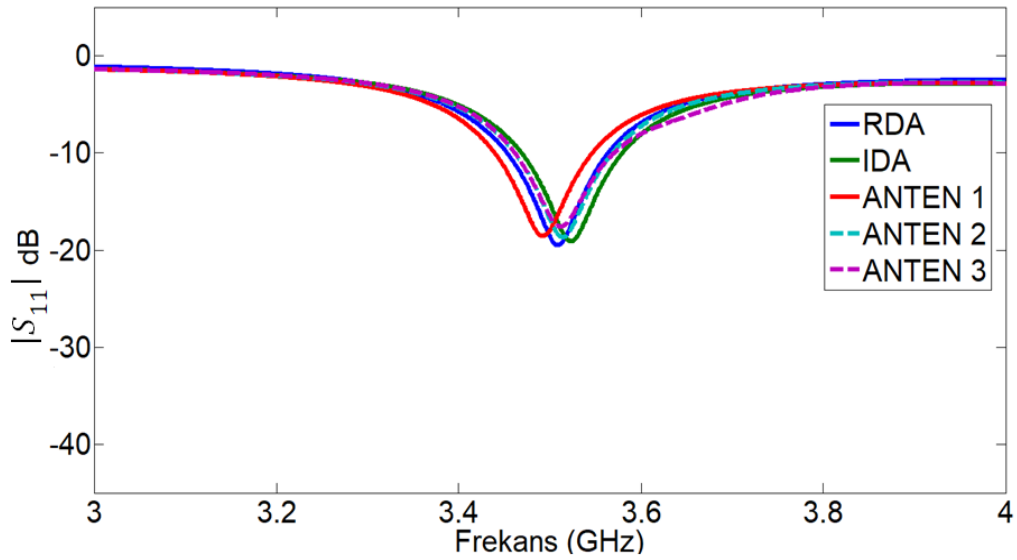


Şekil 5.18. Anten 2 yapısının (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü

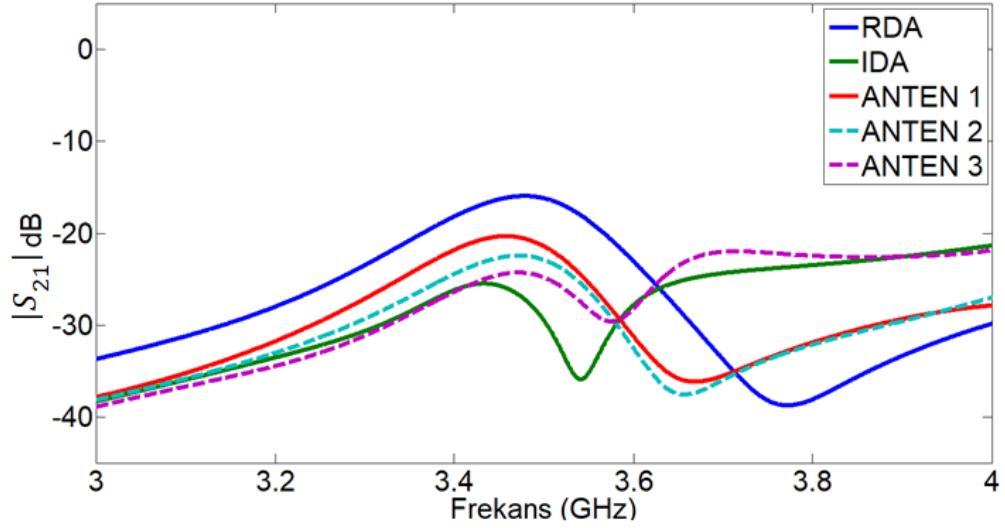
Anten 3 yapısı, Anten 2 yapısına benzer olarak anten eş düzlemine metalik hat ve toprak yüzeye iki adet rezonatör yapısı eklenerek oluşturulmuştur. Bu yapıyı Anten 2 yapısının tasarımından ayıran özellik, yerleştirilen rezonatörlerin konumlarıdır. Anten 2 yapısına benzer olarak IDA yapısından 2 rezonatörün çıkarılması ile oluşturulmuş ve benzetimi yapılmıştır. Bu yapı Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Anten 3 yapısının (a) Ön yüzü şematik görünümü, (b) Toprak yüzeyi şematik görünümü



Şekil 5.20. RDA, IDA, Anten 1, Anten 2 ve Anten 3 yapılarının $|S_{11}|$ grafikleri



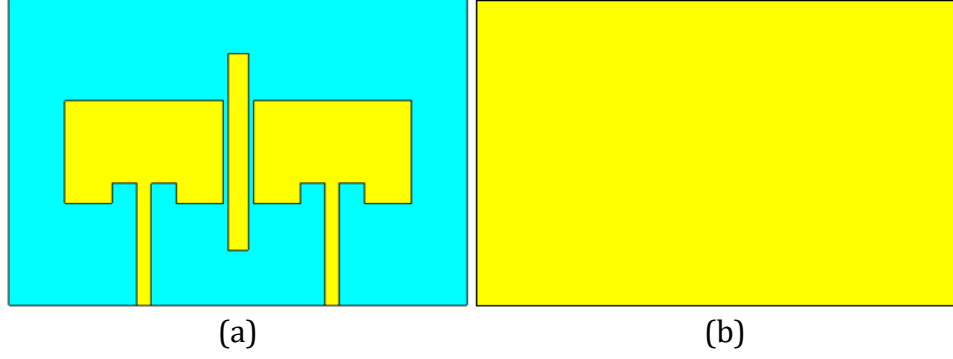
Şekil 5.21. RDA, IDA, Anten 1, Anten 2 ve Anten 3 yapılarının $|S_{21}|$ grafikleri

RDA yapısı, Anten 1 (Şekil 5.17’de verilen tekli rezonatör yapısı), Anten 2 (Şekil 5.18’de verilen 2’li rezonatör yapıları), Anten 3 (Şekil 5.19’da verilen 2’li rezonatör yapıları) ve IDA yapısının (Şekil 5.9’da verilen 4’lü rezonatör yapıları) Yapıların $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir. $|S_{11}|$ değerleri karşılaştırıldığında, yapıların rezonans frekanslarında büyük farklılar görülmemiştir. Ancak, $|S_{21}|$ değerleri karşılaştırıldığında, en iyi izolasyon sonucunun IDA yapısı ile elde edildiği görülmüştür.

5.1.2.3. Antenler arasına metalik hat ve bozulmamış toprak yüzeye rezonatörlerin etkilerinin ayrı ayrı incelenmesi

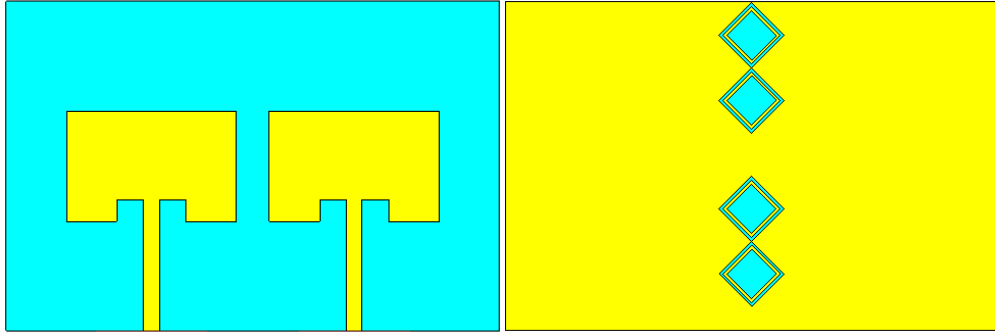
Önceki bölümlerde incelenen anten izolasyonu tasarımları karşılaştırıldığında en iyi izolasyonu elde ettiğimiz yapının, antenler arasına metalik hat ve toprak zemine 4’lü rezonatör yapının birlikte kullanıldığını anten yapısı (IDA yapısı) olduğu görülmüştür. Bu bölümde, eklenen metalik hat ve rezonatör yapılarının anten yapısına etkilerini incelemek için Anten 4 ve Anten 5 olarak adlandırılan tasarımların benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

Anten 4 yapısı, antenler arasına metalik hat yerleştirilerek oluşturulan ve bozulmamış toprak yüzeyinin (Şekil 5.22 (b)) kullanıldığı yapıdır. Bu yapı Şekil 5.22 (a)'da gösterilmektedir.

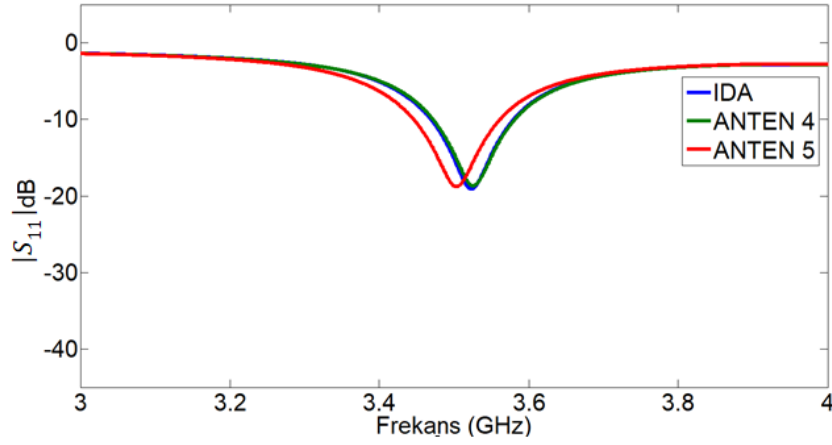


Şekil 5.22. Anten 4 yapısı (a) ön yüzü şematik görünümü (b) toprak yüzeyi şematik görünümü

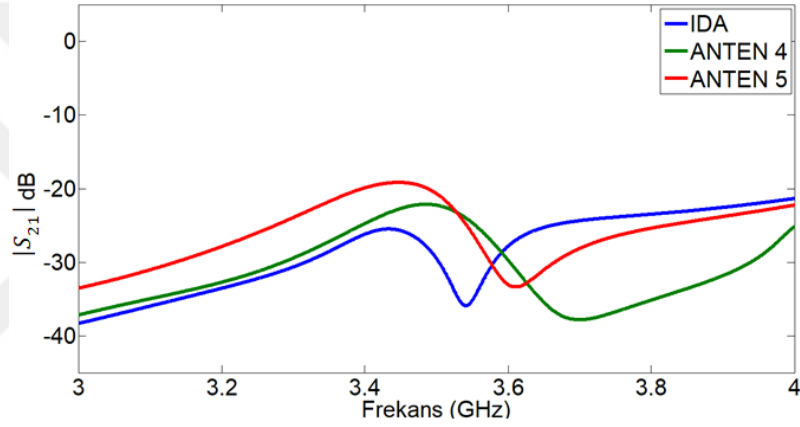
Anten 5 yapısı bozulmamış toprak yüzeyi üzerine, antene göre 45° döndürülerek yerleştirilmiş 4 adet rezonatörün (Şekil 5.23 (b)) yerleştirilerek oluşturulduğu yapıdır. Bu yapı Şekil 5.23'te gösterilmektedir.



Şekil 5.23. Anten 5 yapısı için (a) ön yüzü şematik görünümü (b) toprak yüzeyi şematik görünümü



Şekil 5.24. Önerilen IDA, Anten 4 ve Anten 5 yapılarının $|S_{11}|$ değerlerinin karşılaştırması



Şekil 5.25. Önerilen IDA, Anten 4 ve Anten 5 tasarımlarının $|S_{21}|$ değerlerinin karşılaştırması

Önerilen IDA yapısı, Anten 4 yapısı ve Anten 5 yapısının $|S_{11}|$ değerlerinin karşılaştırmalı benzetim sonuçları Şekil 5.24'te ve $|S_{21}|$ değerlerinin karşılaştırmalı benzetim sonuçları Şekil 5.25'te verilmiştir. Anten 4 yapısının benzetimi sonucunda, rezonans frekansının 3,526 GHz olduğu Şekil 5.24'te görülmüştür. Ancak RDA yapısı ile kıyaslanabilmesi için Anten 4 yapısı ve Anten 5 yapılarının S -parametre genlik sonuçları 3,5 GHz olarak raporlanmıştır. Anten 4 yapısı için $|S_{11}|$ değeri Şekil 5.24'te görüldüğü gibi -17,01 dB ve $|S_{21}|$ değeri Şekil 5.25'te görüldüğü gibi -23,23 dB'dir. Anten 4 yapısının benzetim sonucu, rezonans frekansında kazancı 3,305 dB ve anten yönlülük değeri 7,209 dBi'dir.

Anten 5 için benzetim ile elde edilen sonuçlar Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre, rezonans frekansı 3,5 GHz'de S -parametre $|S_{11}|$

genlik değeri $-18,8$ dB ve $|S_{21}|$ genlik değeri $-20,65$ dB'dir. Bu sonuçlar incelendiğinde Anten 5 yapısının rezonans frekansının, RDA yapısı ile karşılaştırıldığında kayda değer bir şekilde değişim görülmemektedir. RDA ve Anten 5 yapılarının $|S_{21}|$ değerleri karşılaştırıldığında, Anten 5 yapısının $4,48$ dB seviyesinde daha iyi izolasyon iyileştirmesi sağladığı görülmüştür. Ancak $4,48$ dB, izolasyon için yeterli bir iyileştirme değeri olarak kabul görmemektedir. CST Studio Suite® programı ile yapılan benzetim sonucunda, Anten 5 yapısının, rezonans frekansında kazancı $3,715$ dB ve yönlülük değeri ise $7,301$ dBi'dir.

Yapıların rezonans frekansları, anten yüzde bant genişlikleri, anten kazançları, anten yönlülükleri ve yarı güç hüzme genişlikleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Önerilen anten yapıların $3,5$ GHz frekansı için $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ değeri ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Önerilen RDA, Anten 4, Anten 5 ve IDA yapılarının $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ genlik değerleri

	$ S_{11} $ (dB)	$ S_{21} $ (dB)
Referans Anten (RDA)	$-18,50$	$-16,17$
Anten 4	$-16,95$	$-23,26$
Anten 5	$-18,63$	$-20,58$
İzolasyon Yapılı Anten (IDA)	$-15,18$	$-29,47$

Önerilen RDA yapısı $-16,17$ dB, Anten 4 yapısının $-23,26$ dB, Anten 5 yapısının $-20,58$ dB ve IDA yapısının $-29,46$ dB $|S_{21}|$ değerlerine sahiptir. Yapıların $|S_{21}|$ değerleri RDA yapısı ile kıyaslandığında IDA yapısının, Anten 4 ve Anten 5 yapılarına oranla daha iyi bir izolasyona sahip olduğunu göstermektedir. IDA yapısının tasarımında uygulanan izolasyon teknikleri nedeniyle, antenin rezonans frekansı RDA yapısından farklı olarak $3,5$ GHz'den $3,523$ GHz'e kaydığı görülmüştür.

Çizelge 5.5. Önerilen RDA, Anten 4, Anten 5 ve IDA yapılarının rezonans frekansları, anten yüzde bant genişlikleri, anten kazanç, anten yönlülükleri ve yarı güç hüzmeye genişlikleri

	Rezonans Frekansı(GHz)	Yüzde Bant Genişliği	Kazanç (dB)	Yönlülük (dBi)	Yarı Güç Hüzmeye Genişliği
Referans Anten (RDA)	3,5	14,11	4,136	7,543	72,3
Anten 4	3,526	14,79	3,305	7,209	71,6
Anten 5	3,505	15,80	3,715	7,301	72,5
İzolasyon Yapılı Anten (IDA)	3,523	15,04	3,478	7,206	117,1

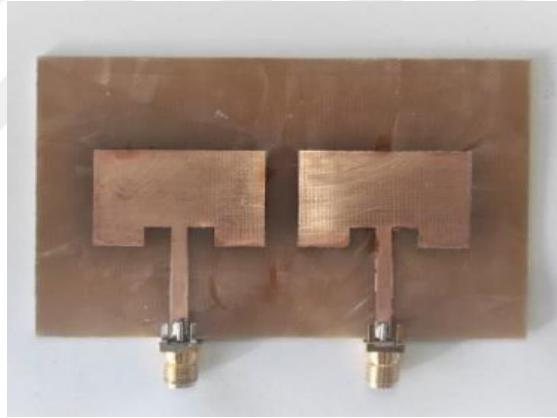
Çizelge 5.4’te verilen benzetim sonuçlarına göre IDA yapısında önerilen yöntem ile yapıların rezonans frekanslarında, hüzmeye genişliği 44,8°’lik bir genişleme ve yüzde bant genişliğinde %0,93 bir artış görülmektedir. Ancak IDA yapısı kazanç değerinde 0,65 dB ve yönlülük değeri olarak 0,33 dBi’lık bir kayba neden olmuştur.

5.2. Referans Anten İle İzolasyon Yapılı Anten Üretimi ve Ölçüm Sonuçları

Önerilen RDA yapısının anten yüzeyine metal hat ve bozulmamış toprak yüzeyine rezonatör yapıları eklenerek IDA yapısı oluşturulmuştur. Anten 4, Anten 5 ve IDA yapılarının benzetim sonuçları karşılaştırıldığında, en iyi izolasyon performansını IDA yapısının verdiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, önerilen RDA ve IDA yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir.

Önerilen yapıların üretimi için $\epsilon_r = 4,38$, $\tan\delta = 0,025$, alttaş yüksekliği 1,6 mm ve alt ve üst tabakanın bakır kalınlığı 0,035 mm değerlerine sahip FR-4 malzemesi kullanılmıştır.

Yapıların FR-4 üzerine işlenmesi PCB prototip makinası ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonrasında anten yapılarının üretim dosyaları oluşturulmuş ve oluşturulan üretim dosyaları PCB prototip makinasında düzenlenmiştir. Prototip makinası, düzenlenen dosyadan alınan verileri FR-4 malzemesi üzerine kazıma yöntemi ile kazıyarak, anten yapılarının üretimini sağlamıştır. Kazıma yöntemi ile anten yapısı, metalik hat ve rezonatör yapılarının sınırları çizilmiştir. Önerilen yapıda bulunmaması gereken bakır bölümler elle soyulmuş ve böylece tasarlanan yapılar ortaya çıkmıştır. Üretilen RDA yapısının önden görünümü Şekil 5.26'da ve arkadan görünümü (toprak düzlemi) ise Şekil 5.27'de verilmiştir.

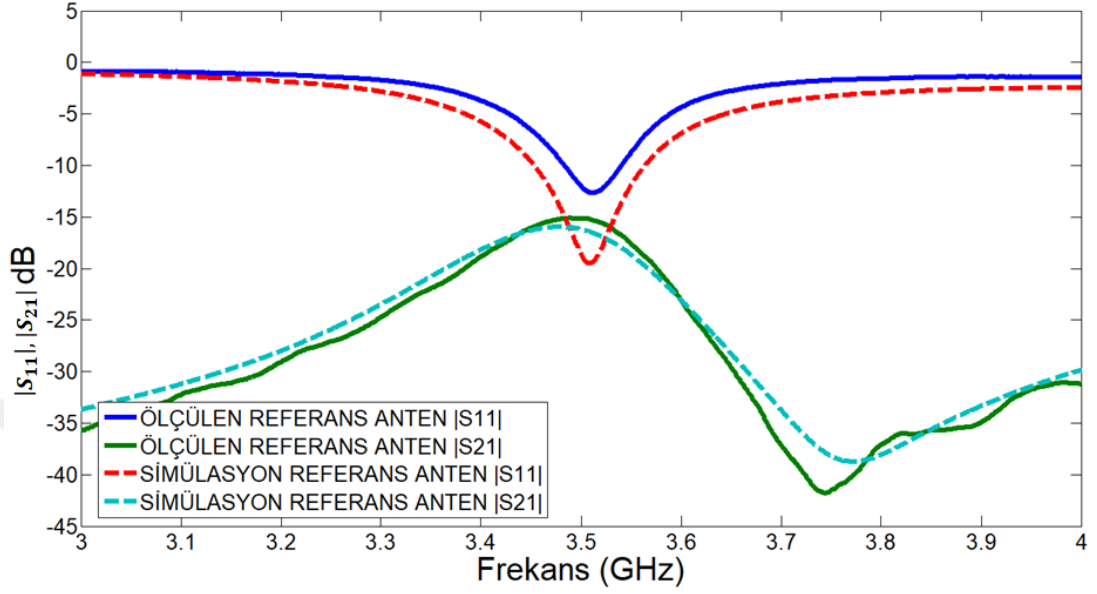


Şekil 5.26. Üretilen RDA yapısının önden görünümü



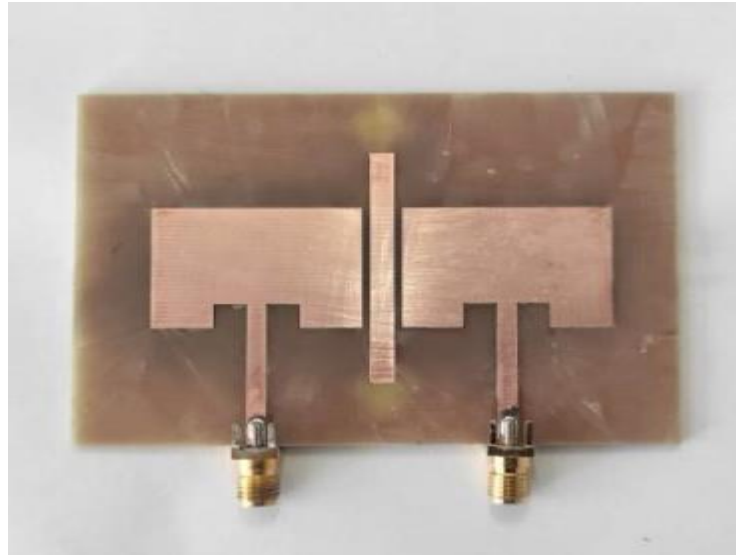
Şekil 5.27. Üretilen RDA yapısının arkadan (toprak yüzey) görünümü

Üretilen yapıların ölçümleri Keysight E5063A vektör ağ analizörü ile yapılmıştır. RDA yapısı için ölçüm ve benzetim yoluyla elde edilen $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Üretilen RDA yapısının ölçüm ve benzetim $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ sonuçlarının karşılaştırılması

Üretilen IDA yapısının önden görünümü Şekil 5.29’da ve arkadan (toprak düzlemi) görünümü ise Şekil 5.30’da verilmiştir.

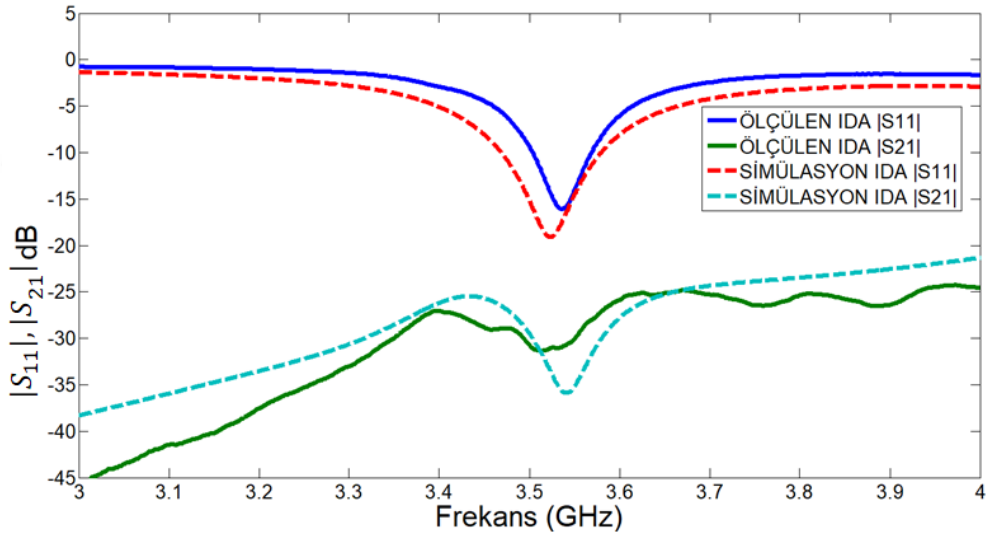


Şekil 5.29. Üretilen IDA yapısının önden görünümü



Şekil 5.30. Üretilen IDA yapısının arkadan görünümü

Önerilen IDA yapısı için ölçüm ve benzetim yoluyla elde edilen $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği Şekil 5.31’de gösterilmiştir.



Şekil 5.31. Üretilen IDA yapısının ölçüm ve benzetim $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.31’de görüldüğü gibi önerilen IDA yapısının benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların oldukça benzer olduğu görülmektedir. Benzetim ve ölçüm değerleri arasındaki genlik ve rezonans frekans farklılıklarının, üretim hatalarından ve/veya malzemenin fiziksel ve elektriksel özelliklerinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir.

3,5 GHz rezonans frekansı için tasarlanan RDA yapısının benzetimi sonucunda 3,508 GHz'de rezonansa girdiği görülmüştür. Tasarlanan RDA yapısının 3,508 GHz'de alınan benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.6. 3,508 GHz frekansında RDA yapısının $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ ölçüm ve benzetim sonuçları.

	$ S_{11} $ (dB)	$ S_{21} $ (dB)
Referans Anten Benzetim	-19,42	-16,41
Referans Anten Ölçüm	-12,62	-15,20

Tasarlanan RDA yapısı ve IDA yapısının rezonans frekansları arasında küçük bir farklılık gözlemlenmiştir. IDA anteninin rezonans frekansı benzetim sonucunda 3,523 GHz olarak elde edilmiştir. 3,523 GHz frekansı için S -parametrelerin benzetim ve ölçüm sonuçları Çizelge 5.6'da listelenmiştir.

Çizelge 5.7. Tasarlanan IDA yapısının 3,523 GHz frekansında benzetim ve ölçümünün $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ sonuçları.

	$ S_{11} $ (dB)	$ S_{21} $ (dB)
IDA Benzetim	-19,10	-33,46
IDA Ölçüm	-14,78	-31,04

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 5G çalışma frekansı olan 3,5 GHz'de, MIMO anten sistemlerinde bulunan iki anten arasındaki izolasyonu iyileştirmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu çalışma için önerilen yöntemin önce benzetimi yapılmış ve sonrasında önerilen yapının üretimi gerçekleştirilerek sonuçların karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu çalışmada özetle;

Tezin 1. bölümünde, 5G ve MIMO antenin neden kullanıldığı sorularına kısaca yanıtlar verilmiş ve antenler arasındaki izolasyonun gerekliliği vurgulanmıştır.

Tezin 2. bölümünde anten teorisi, anten tipleri ve mikroşerit antenler hakkında temel bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ayrıca genel olarak anten tasarımına değinilmiştir.

Tezin 3. bölümünde bu tezin amacı olan dizi antenlerin arasında kullanılan izolasyon iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde ayrıca tezde kullanılması planlanan yöntem hakkında temel bilgiler verilmiştir.

Tezin 4. bölümünde bu tez kapsamında, literatürde bulunan benzer çalışmalar derlenmiş ve bu çalışmaların uygulama yöntemlerine kısaca değinilmiştir.

Tezin 5. bölümünde tez kapsamında yapılan çalışmalar adım adım gösterilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen tasarımların üretim ve ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

Bu tezin sonuçlarını tartışmak gerekirse;

Bu çalışmada öncelikle 5G için 1×2 düzeninde bir dizi mikroşerit anten tasarımları incelenmiş, önerilen anten yapılarının çalışma mantığını anlamak adına rapor edilmiştir. Anten yapılarının birbirleri arasındaki mesafe, empedans uyumu, kazanç ve yönlülüğünün etkileri ortaya konulmuştur. Antenlerin birbirleri ile aynı rezonans frekansında çalışabilmesi adına yapılacak

hesaplamaların, temel mikroşerit anten hesaplamaları ile elde edilemeyeceği görülmüştür. Bu sebeple, bu çalışmada önerilen anten tasarımının hesaplamaları için üç boyutlu elektromanyetik analiz yapabilen CST Studio Suite® benzetim aracı kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılmak üzere 3,5 GHz frekansında çalışan 1×2 düzeninde RDA yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan RDA yapısının benzetimi yapıldığında 3,5 GHz merkez frekansında $|S_{11}|$ değerinin $-18,50$ dB ve $|S_{21}|$ değerinin $-16,17$ dB olduğu görülmüştür. Benzetim sonucu 4,136 dB kazanç elde edilmiştir.

Referans antenler arasına konulan metalik hat ile oluşturulan Anten 4 yapısının sonuçları, RDA yapısının sonuçları ile karşılaştırıldığında yapıların rezonans frekansları arasında çok az farklılık olduğu görülmüştür. Anten 4 yapısının 3,5 GHz frekansında benzetimi yapıldığında $|S_{11}|$ değerinin $-16,95$ dB ve $|S_{21}|$ değerinin $-23,26$ dB olduğu görülmüştür. Buna göre, RDA yapısı ile karşılaştırıldığında izolasyon seviyesinde 7 dB kadar iyileştirme sağlanmıştır.

Bozulmamış toprak düzlemine kazınan 4 adet rezonatör yapısı ile tasarlanan Anten 5 yapısı, istenen rezonans frekansında izolasyonunun iyileştirilmesi için toprak bölümünde bulunan rezonatör yapısının antenlerle olan bağıl açısı 45° ayarlanarak, uzunluk ve kalınlık değerlerinin benzetim programı ile optimizasyonu sağlanmıştır. Anten 5 yapısı için 3,5 GHz'de $|S_{11}|$ genlik değeri $-18,8$ dB ve $|S_{21}|$ genlik değeri $-20,65$ dB'dir. Bu yapı 3,5 GHz frekansında RDA yapısı ile karşılaştırıldığında 4,41 dB seviyesinde izolasyon iyileşmesi sağlamıştır. Fakat Anten 5 yapısının rezonans frekansı olan 3,505 GHz'de 3,715 dB kazanç sağladığı görülmüştür. Bu sonuç, RDA yapısının rezonans frekansında elde edilen kazanca göre 0,421 dB seviyesinde düşüş olduğunu göstermektedir, empedans uyumlamaları karşılaştırıldığında ise kayda değer bir değişiklik görülmemiştir. Akım yoğunluk dağılımlarına bakıldığında, rezonatörlerin iç bölümündeki kare halkadan geçen akımlar ile toprak bölümünde oluşan akımların birbirleriyle zıt yönlü hareket ettiği ve birbirini etkilediği görülmüştür. Bu durum rezonatörün, yapıya etkisini göstermektedir.

Önerilen IDA yapısının tasarım aşamalarının son kısmında, RDA yapısındaki antenler arasına metalik hat ve toprak yüzeyine rezonatör yapılar eklenerek anten dizi yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan yapının parametre değerleri optimize edilerek nihai sonuç elde edilmiştir. Bu dizi yapısı ile rezonans frekansı 3,5 GHz'den 3,523 GHz'e kaydığı görülmüştür. IDA yapısının benzetimi yapıldığında merkez frekansında $|S_{21}|$ genlik değeri $-33,46$ dB olarak bulunmuştur.

IDA yapısının merkez frekansındaki elde edilen $|S_{21}|$ genlik değeri, RDA yapısının merkez frekansındaki elde edilen $|S_{21}|$ genlik değeri ile karşılaştırıldığında 17,05 dB seviyesinde bir izolasyon iyileştirilmesi olduğu görülmüştür.

Önerilen RDA yapısı ve IDA yapısının üretimi gerçekleştirilmiştir.

3,5 GHz rezonans frekansı için tasarlanan RDA yapısının benzetimi sonucunda edilen 3,508 GHz merkez frekansında $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ genlik değerleri sırasıyla $-19,42$ dB ve $-16,41$ dB olduğu, üretimi yapılan RDA yapısının Keysight E5063A vektör ağ analizörü ile ölçümü alındığında ise $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ genlik değerleri sırasıyla $-12,62$ dB ve $-15,20$ dB olduğu görülmüştür. Elde edilen ölçüm ve benzetim sonuçlarının birbirleri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Tasarlanan IDA yapısının benzetimi sonucunda edilen 3,523 GHz merkez frekansında $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ genlik değerleri sırasıyla $-19,10$ dB ve $-33,46$ dB olduğu, üretilen IDA yapısının ölçüm ile elde edilen $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ genlik değerleri sırasıyla $-14,78$ dB ve $-31,04$ dB olduğu görülmüştür. Burada da yine ölçüm ve benzetim sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak oluşan rezonans frekansında meydana gelen kaymaların, kullanılan malzeme veya ölçüm kaynaklı dış sebeplerle olduğu ön görülmektedir.

Çalışmada önerilen RDA yapısının 3,5 GHz frekansı için benzetimi yapıldığında, kazanç değerinin yaklaşık 4,136 dB ve yönlülük değerinin 7,543 dBi olduğu görülmüştür. Önerilen IDA yapısının 3,523 GHz'de benzetim sonuçlarının kazanç değeri yaklaşık 3,478 dB ve yönlülük değerinin 7,206 dBi olarak

görülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında, önerilen yapının kazanç ve yönlülüğü olumsuz olarak etkilemekte fakat genel olarak kazanç ve yönlülük değerleri açısından kayda değer bir fark görülmemektedir. Hüzme genişliği 44,8°'lik bir genişleme ve yüzde bant genişliğinde %0,93 bir artış görülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar göstermektedir ki, anten düzlemine yerleştirilen şerit hat ve toprak düzlemine yerleştirilen 45° açıyla konumlandırılmış 4 adet kapalı halka rezonatörün birlikte kullanımı, azalan antenler arası mesafeye karşın benzetim ve ölçümlerde -30 dB'nin altında izolasyon değeri vermektedir. Bu yöntem geliştirilerek ilerleyen çalışmalarda antenlerin daha da yakın mesafelerde daha iyi izolasyon değerleri elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada tasarlanan izolasyon yöntemleri bu tez ile sınırlı olmayıp, ileriki çalışmalarda izolasyon iyileştirme çalışmalarına devam edilecektir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, P., & Bailey, M., 1977. An analysis technique for microstrip antennas. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 25(6), 756-759.
- Ai, H., Wu, C., & Zhou, S., 2020. Design and Simulation of Rectangular Microstrip Patch Antenna with 5Gmm-wave Coaxial Line Back-Feed and Microstrip Line Side-Feeds. In 2020 5th International Conference on Information Science, Computer Technology and Transportation (ISCTT) (pp. 179-182). IEEE.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., & Zhang, J. C., 2014. What will 5G be?. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 32(6), 1065-1082.
- Arun, H., Sarma, A. K., Kanagasabai, M., Velan, S., Raviteja, C., & Alsath, M. G. N., 2014. Deployment of modified serpentine structure for mutual coupling reduction in MIMO antennas. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 13, 277-280.
- Ayvacı, K. C. ve Ekmekçi, E., 2022. Bir 5G MIMO Anten Tasarımı için Antenler Arası İzolasyonun Sağlanması, *ELECO 2022, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, 24-26 Kasım, Bursa.
- Bait-Suwailam, M. M., Siddiqui, O. F., & Ramahi, O. M., 2010. Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9, 876-878.
- Balanis, C. A., 2005. *Antenna theory: analysis and design (Vol. 1)*: John Wiley & Sons.
- Balanis, C. A., 1989 *Advanced Engineering Electromagnetics (Vol. 2)*: John Wiley & Sons.
- Bhattacharjee, S., Mandal, S., Ghosh, C. K., & Banerjee, S., 2022. Reduction of mutual coupling and cross-polarization of microstrip MIMO antenna using electromagnetic soft surface (EMSS). *Radio Science*, 57(5), 1-10.
- Bisht, S., Saini, S., Prakash, V., & 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.
- Buriak, I. A., Zhurba, V. O., Vorobjov, G. S., Kulizhko, V. R., Kononov, O. K., & Rybalko, O., 2016. Metamaterials: Theory, classification and application strategies. *Journal of Nano-and electronic Physics*, 8(4), 4088-1.

- Chen, P., Yang, X. D., Chen, C. Y., & Zhao, Y. N., 2014. A novel uni-planar compact EBG structure. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 45, 31-34.
- Dash, J. C., Kharche, S., & Reddy, G. S., 2022. MIMO Antenna Mutual Coupling Reduction Using Modified Inverted-Fork Shaped Structure Réduction du couplage mutuel des antennes MIMO à l'aide d'une structure modifiée en forme de fourche inversée. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*.
- Emadeddin, A., Shad, S., Rahimian, Z., & Hassani, H. R., 2017. High mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using novel structure. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 71, 152-156.
- European Commission., 2016. 5G for Europe: An action plan. Communication from the commission to the european parliament, the Council, the european economic and social committee and the committee of the regions. COM (2016) 588 Final.
- Fang, J., Li, J., Xiao, P., Dong, J., Li, G., Du, S., ve Joines, W. T., 2022. Coupling Mode Transformation based Dielectric Surface and Metasurface for Antenna Decoupler. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Farahani, H. S., Veysi, M., Kamyab, M., ve Tadjalli, A., 2010. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC-EBG superstrate. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 9, 57-59.
- Ghannad, A. A., Khalily, M., Xiao, P., Tafazolli, R., ve Kishk, A. A., 2019. Enhanced matching and vialess decoupling of nearby patch antennas for MIMO system. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(6), 1066-1070.
- Ghatak, R., Gorai, A., 2021. *Metamaterials: Engineered Materials and its Applications in High Frequency Electronics*.
- Hammerstad, E. O., 1975. Equations for microstrip circuit design. In 1975 5th European Microwave conference (pp. 268-272). IEEE.
- Iqbal, A., A Saraereh, O., Bouazizi, A., & Basir, A., 2018. Metamaterial-based highly isolated MIMO antenna for portable wireless applications. *Electronics*, 7(10), 267.
- Jiang, T., Jiao, T., Li, Y., 2016. Array mutual coupling reduction using L-loading E-shaped electromagnetic band gap structures. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016.
- Krowne, C., 1983. Cylindrical-rectangular microstrip antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31(1), 194-199.

- Kumar, A., Kaur, J., & Singh, R., 2013. Performance analysis of different feeding techniques. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 3(3), 884-890.
- Kumar, A., Ansari, A. Q., Kanaujia, B. K., & Kishor, J., 2018. High isolation compact four-port MIMO antenna loaded with CSRR for multiband applications. *Frequenz*, 72(9-10), 415-427.
- Kumar, G., ve Ray, K. P., 2002. *Broadband microstrip antennas*. Artech house, MA. 7(6).
- Kumar, N., ve Kommuri, U. K., 2019. MIMO Antenna H-Plane Isolation Enhancement using UC-EBG Structure and Metal Line Strip for WLAN Applications. *Radioengineering*, 29(2).
- Kumar, P., Pathan, S., Vincent, S., Kumar, O. P., Yashwanth, N., Kumar, P., ... ve Ali, T., 2022. A Compact Quad-Port UWB MIMO Antenna with Improved Isolation Using a Novel Mesh-Like Decoupling Structure and Unique DGS. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*.
- Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. L., 2014. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE communications magazine*, 52(2), 186-195.
- Lee, J. Y., Kim, S. H., & Jang, J. H., 2015. Reduction of mutual coupling in planar multiple antenna by using 1-D EBG and SRR structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(9), 4194-4198.
- Liu, L., Cheung, S. W., & Yuk, T. I., 2013. Compact MIMO antenna for portable devices in UWB applications. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 61(8), 4257-4264.
- Liu, Z., Wang, J., Qu, S., Zhang, J., Ma, H., Xu, Z., & Zhang, A., 2016. Enhancing isolation of antenna arrays by simultaneously blocking and guiding magnetic field lines using magnetic metamaterials. *Applied Physics Letters*, 109(15), 153505.
- Lo, Y., Solomon, D., ve Richards, W., 1979. Theory and experiment on microstrip antennas. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 27(2), 137-145.
- Luo, S., Li, Y., Xia, Y., & Zhang, L., 2018. A low mutual coupling antenna array with gain enhancement using metamaterial loading and neutralization line structure. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 411-418.
- Luo, S., Li, Y., Xia, Y., Yang, G., Sun, L., & Zhao, L., 2019. Mutual coupling reduction of a dual-band antenna array using dual-frequency metamaterial structure. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 403-410.

- Mao, S., Yu, Y., & He, D., 2021. Compact Dual-frequency MIMO antenna with High Port Isolation. In 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI) (pp. 1145-1146). IEEE.
- Ming-Chun, T., Shao-Qiu, X., Jian, G., Yan-Ying, B., Shan-Shan, G., & Bing-Zhong, W., 2010. Composite metamaterial enabled excellent performance of microstrip antenna array. Chinese Physics B, 19(7), 074214.
- Pozar, D.M., 2011. Microwave Engineering. 4th Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Qamar, Z., & Park, H. C., 2014. Compact waveguided metamaterials for suppression of mutual coupling in microstrip array. Progress In Electromagnetics Research, 149, 183-192.
- Qian, Y., Coccioli, R., Sievenpiper, D., Radisic, V., Yablonovitch, E., & Itoh, T., 1999. A microstrip patch antenna using novel photonic band-gap structures. Microwave Journal, 42(1), 66-72.
- Richards, W. F. Y. T., Lo, Y., & Harrison, D., 1981. An improved theory for microstrip antennas and applications. IEEE Transactions on antennas and propagation, 29(1), 38-46.
- Rusek, F., Persson, D., Lau, B. K., Larsson, E. G., Marzetta, T. L., Edfors, O., & Tufvesson, F., 2012. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. IEEE signal processing magazine, 30(1), 40-60.
- Salah, A., Alkhambashi, M., & Jan, N., 2020. Isolation Enhancement of Compact Dual-Band Printed MIMO Antenna for WLAN and 5G Applications. In Proceedings of the 1st International Multi-Disciplinary Conference Theme: Sustainable Development and Smart Planning, IMDC-SDSP 2020, Cyperspace, 28-30 June 2020.
- Si, L., Jiang, H., Lv, X., & Ding, J., 2019. Broadband extremely close-spaced 5G MIMO antenna with mutual coupling reduction using metamaterial-inspired superstrate. Optics express, 27(3), 3472-3482.
- Singh, M., & Parihar, M. S., 2022. Gain Improvement of Vivaldi MIMO Antenna with Pattern Diversity Using Bi-axial Anisotropic Metasurface for millimeter-Wave Band Application. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.
- Sushmeetha, R. R., & Natarajamani, S., 2018. Edge-Open Split Ring Resonator Based Dual-band Bandpass Filter. In 2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) (pp. 706-709). IEEE.
- Stutzman, W. L., & Thiele, G. A., 2012. Antenna theory and design. John Wiley & Sons.

- Vishvakshenan, K. S., Mithra, K., Kalaiarasan, R., & Raj, K. S., 2017. Mutual coupling reduction in microstrip patch antenna arrays using parallel coupled-line resonators. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2146-2149.
- Yang, F., & Rahmat-Samii, Y., 2003. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 51(10), 2936-2946.
- Yang, X., Liu, Y., Xu, Y. X., & Gong, S. X., 2017. Isolation enhancement in patch antenna array with fractal UC-EBG structure and cross slot. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2175-2178.
- Yu, K., Li, Y., & Liu, X., 2018. Mutual coupling reduction of a MIMO antenna array using 3-D novel meta-material structures. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 758-763.