

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**KUSURLU ZEMİN YÜZEYİNDE KARE YARIK HALKA REZONATÖRÜ
KULLANILAN METAMALZEME MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE
PERFORMANS İNCELEMESİ**

HAZIRLAYAN

SELİN ÖNEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**KUSURLU ZEMİN YÜZEYİNDE KARE YARIK HALKA REZONATÖRÜ
KULLANILAN METAMALZEME MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE
PERFORMANS İNCELEMESİ**

HAZIRLAYAN

SELİN ÖNEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

PROF. DR. SEDAT NAZLIBİLEK

ANKARA - 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Selin ÖNEY tarafından hazırlanan bu
çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak Kabul edilmiştir

Tez Savunma Tarihi: 23 / 08 / 2022

Tez Adı: Kusurlu Zemin Yüzeyinde Kare Yarık Halka Rezonatörü Kullanılan Metamalzeme
Mikroşerit Anten Tasarımı ve Performans İncelemesi

Tez Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK	(Danışman)	
Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE	(Üye)	
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ	(Üye)	

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih: / / 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 2022

Öğrencinin Adı, Soyadı : Selin ÖNEY

Öğrencinin Numarası : 21910168

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK

Tez Başlığı : Kusurlu Zemin Yüzeyinde Kare Yarık Halka Rezonatörü Kullanılan

Metamalzeme Mikroşerit Anten Tasarımı Ve Performans İncelemesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 48 sayfalık kısmına ilişkin, 21/08/2022 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9'dur. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 2022

Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK

.....

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanması sürecinde gösterdiği anlayış ve desteği için değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK'e, metamatizeme hücre tasarımı ve anten optimizasyon alanında ihtiyaç duyduğum tecrübesini ve bilgi birikimini benimle paylaşan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Alparslan Çağrı YAPICI'ya, değerli arkadaşarımdan yoğun tez çalışma sürecim boyunca manevi desteğini esirgemeyen, raporlama sürecinde her zaman yanımda olan ve tecrübeleriyle yol gösteren Alper KARAKOÇ'a, tezimin yazılım kısmında karşıma çıkan problemleri aşarken değerli bilgilerini esirgemeyen Umut KURUCUOĞLU'na, çalışma sürecim boyunca bana ümit veren ve her zaman yanımda olan Selcan BOZKURT ve Nedim Ekin COŞKUN'a ve son olarak hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Selin ÖNEY

**Kusurlu Zemin Yüzeyinde Kare Yarık Halka Rezonatörü Kullanılan
Metamalzeme Mikroşerit Anten Tasarımı ve Performans İncelemesi**

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2022

Yapılan bu tez çalışmasında ilk olarak 5.8 GHz frekansında çalışan gömme beslemeli (inset fed) mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan anten için altta Rogers RT Duroid 5880 malzemesine dayanarak dielektrik katsayısı 2.2, kalınlığı 0.9 mm belirlenmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Zemin yüzeyi geometrisi olarak kare yarık halka rezonatörü şekli tercih edilmiş olup birçok kusurlu zemin yüzeyi tasarlanmış ve anten parametreleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Kare yarık halka rezonatörü tasarımı (Square Split Ring Resonator, S-SRR) MATLAB ve CST programlarının birlikte çalıştırılmasıyla geliştirilmiş ve optimize edilmiştir. Yapılan tasarımlarda antenin yama pozisyonu, besleme hattı uzunluğu ve kare yarık halka rezonatörleri arasındaki mesafenin anten parametrelerini ne yönde değiştirdiği ele alınmıştır. Tez çalışmasının son aşamasında tek frekans bandında ve birden fazla frekans bandında çalışan antenler elde edilmiştir. Advanced Design Systems (ADS) programında yapılan simülasyonlardan elde edilen bulgulara göre tek frekans bandında çalışan anten tasarımlarında bant genişliği, geri dönüş kaybı, kazanç ve radyasyon verimliliği parametrelerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Çok bantlı anten özelliği geliştiren tasarımlarda kazanç değeri 5.8 GHz için düşmüş olsa da antenin yama şekli değiştirilmeden birden fazla frekans aralığında çalışma özelliği kazandığı gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Metamalzeme, metamalzeme anten, kare yarık halka rezonatörü, gömülü beslemeli mikroşerit yama anten, bozulmuş zemin yüzeyi

Danışman: Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK Başkent Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

Selin ÖNEY

Design and Performance Exploration of a DGS Metamaterial Microstrip Patch Antenna by Etching Square Split Ring Resonator Shaped Defects on the Ground Plane

Başkent University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

2022

In this thesis, an inset fed microstrip patch antenna designed operating at a frequency of 5.8 GHz was first performed. The substrate for the designed antenna is based on Rogers RT Duroid 5880 material with a dielectric coefficient of 2.2 was designed, and its thickness was determined to be 0.9 mm. A square split ring resonator shape has been preferred as the ground surface geometry, and many defected ground surfaces have been designed and their effects on antenna parameters have been studied. The square split ring resonator (S-SRR) design has been improved and optimized by running MATLAB and CST programs together. In the designs made, in which way the patch position of the antenna, the length of the feed line and the distance between the square split ring resonators changes the antenna parameters were considered. Antennas operating in one frequency band and in more than one frequency band were obtained at the final stage of the study. According to findings from simulations of antenna designs done in Advanced design systems (ADS) program, antennas which operating in a single frequency band improvement in the parameters of bandwidth, return loss, gain, and radiation efficiency has been observed. Although the gain value has decreased for 5.8 GHz operating frequency in designs that have developed a multi-band antenna feature, it has been observed that the antenna has gained the ability to work in multiple frequency ranges without changing the patch shape.

KEYWORDS: Metamaterial, Metamaterial Antenna, Square Split Ring Resonator, Inset-fed Microstrip Patch Antenna, Defected Ground Structure (DGS)

Advisor: Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK, Başkent University Department of Electrical and Electronics Engineering

İçindekiler

	Sayfa
TEŞEKKÜR	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Temel Kavramlar	1
1.1.1. Baskı antenler	1
1.1.2. Mikroşerit yama antenler.....	1
1.1.3. Anten parametreleri	3
1.1.3.1 Çalışma frekansı.....	3
1.1.3.2. Giriş empedansı.....	4
1.1.3.3. Yansıma katsayısı.....	5
1.1.3.4. Geri dönüş kaybı	5
1.1.3.5. Gerilim durağan dalga oranı	5
1.1.3.6. Kazanç.....	6
1.1.3.7. Polarizasyon.....	6
1.1.3.8. Radyasyon Verimliliği	6
1.1.2. Literatür Taraması	6
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	10
2. FREKANS BANTLARI.....	12
3. METAMALZEME	15
3.1 Metamalzeme nedir?	15

3.2. Metamalzemelerin temel özellikleri	16
3.2.1. Metamalzeme türleri.....	17
3.2.2. Bozulmuş Zemin Yapısı (Defected Ground Structure / DGS).....	18
3.3. Metamalzemelerin Anten Çalışmalarındaki Uygulamaları.....	18
4. NICHOLSON-ROSS-WEIR YÖNTEMİ.....	19
5. TASARIM	20
5.1. Anten Tasarımı	20
5.2. Metamalzeme S-SRR Hücre tasarımı.....	22
5.3. Metamalzeme Anten Tasarımları.....	24
5.3.1 Anten 1'den Anten 16 ya kadar S_{11} Parametreleri	24
5.3.1.1 Anten 1 S_{11} Parametreleri	24
5.3.1.2 Anten 2 S_{11} Parametreleri	26
5.3.1.3 Anten 3 S_{11} Parametreleri	26
5.3.1.4 Anten 4 S_{11} Parametreleri	27
5.3.1.5 Anten 5 S_{11} Parametreleri	27
5.3.1.6 Anten 6 S_{11} Parametreleri	28
5.3.1.7 Anten 7 S_{11} Parametreleri	29
5.3.1.8 Anten 8 S_{11} Parametreleri	29
5.3.1.9 Anten 9 S_{11} Parametreleri	31
5.3.1.10 Anten 10 S_{11} Parametreleri	31
5.3.1.11 Anten 11 S_{11} Parametreleri	32
5.3.1.12 Anten 12 S_{11} Parametreleri	32
5.3.1.13 Anten 13 S_{11} Parametreleri	34
5.3.1.14 Anten 14 S_{11} Parametreleri	35
5.3.1.15 Anten 15 S_{11} Parametreleri	36
5.3.1.16 Anten 16 S_{11} Parametreleri	37
5.3.2 Kazanç Grafikleri.....	39

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
Sonuçlar	47
Öneriler	48
KAYNAKLAR.....	49



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. ITU Radyo Frekans Bantları	12
Tablo 2.2. IEEE Radar Bantları.....	13
Tablo 5.1. Tasarlanan Mikroyama Anten Ölçüleri.....	22
Tablo 5.2. Tasarlanan S-SRR Hücresi Ölçüleri.....	22
Tablo 5.3. Anten 13'ün çalışma frekanslarında elde edilen geri dönüş kayıp kazanç ve radyasyon verimliliği değerleri.....	41
Tablo 5.4. Anten 14'ün çalışma frekanslarında elde edilen geri dönüş kayıp kazanç ve radyasyon verimliliği değerleri.....	44

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Mikroşerit Yama Anten Yapısı	2
Şekil 1.2. Uyarılmış Antenin Işıma Gösterimi	3
Şekil 1.3. Geri Dönüş Kaybı Bant Genişliği	4
Şekil 2.1. Çeşitli Radyo Frekanslarının Kullanım Alanları	12
Şekil 2.2. Radyo Frekans Spektrumu	13
Şekil 3.1. İlk Çift Negatif Malzeme	14
Şekil 3.2. Materyallerin Dielektrik Ve Manyetik Geçirgenliklerine Göre Sınıflandırılması	15
Şekil 3.3. Metamalzemelerin sınıflandırılması	17
Şekil 3.4. Rezonatör Geometrilere	19
Şekil 5.1. Gömme Beslemeli Mikroşerit Yama Anten Tasarımı	20
Şekil 5.2. Antenin Devre Karşılığı	21
Şekil 5.3. Birim Hücre SS-R	22
Şekil 5.4. Tasarlanan S-SRR hücreleri için sınır yüzey gösterimleri	23
Şekil 5.5. S-SRR için birim hücre iletim (S_{21}) ve yansıma (S_{11}) genlikleri	23
Şekil 5.6. S-SRR için ϵ ve μ grafiği	24
Şekil 5.7. Anten 1'in ADS programında görünümü	24
Şekil 5.8. Anten 1: Antenin S_{11} grafiği	25
Şekil 5.9. Anten 2: Antenin S_{11} grafiği (a) ve tasarımın ADS programında görüntüsü (b)	26
Şekil 5.10. Anten 3: Antenin S_{11} grafiği (a) ve tasarımın ADS programında görüntüsü (b)	26
Şekil 5.11. Anten 4: Antenin S_{11} grafiği	27
Şekil 5.12. Anten 5: Antenin S_{11} grafiği	28
Şekil 5.13. Anten 6: Antenin S_{11} grafiği	29

Şekil 5.14. Anten 7: Antenin S_{11} grafiği	29
Şekil 5.15. Anten 8: Antenin S_{11} grafiği (a) ve ADS ortamında görüntüsü (b).....	30
Şekil 5.16. Anten 9: Antenin S_{11} grafiği	31
Şekil 5.17. Anten 10: Antenin S_{11} grafiği.....	31
Şekil 5.18. Anten 11: Antenin S_{11} grafiği.....	32
Şekil 5.19. Anten 12: Antenin ADS ortamındaki görüntüsü	33
Şekil 5.20. Anten 12: Antenin S_{11} grafiği.....	33
Şekil 5.21. Anten 13: Antenin ADS programındaki görüntüsü (a) ve S_{11} grafiği (b)	34
Şekil 5.22. Anten 14: S_{11} grafiği	35
Şekil 5.23. Anten 14: ADS ortamında antenin görüntüsü.....	36
Şekil 5.24. Anten 15: Antenin ADS programında görüntüsü (a) ve S_{11} grafiği (b)	37
Şekil 5.25. Anten 16: Antenin ADS programında görüntüsü (a) ve S_{11} grafiği (b)	38
Şekil 5.26. Anten 1: 5.8 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	39
Şekil 5.27. Anten 13: 5.15 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	39
Şekil 5.28. Anten 13: 5.77 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	40
Şekil 5.29. Anten 13: 6.6 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	40
Şekil 5.30. Anten 13: 8.20 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	41
Şekil 5.31. Anten 14: 5.12 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	42
Şekil 5.32. Anten 14: 5.75 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	42
Şekil 5.33. Anten 14: 6.48 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0 (a) Phi=90 (b)	43

Şekil 5.34. Anten 14: 7.13 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde	
kazanç gösterimi $\Phi=0$ (a) $\Phi=90$ (b)	43
Şekil 5.35. Anten 14: 8.15 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde	
kazanç gösterimi $\Phi=0$ (a) $\Phi=90$ (b)	44
Şekil 5.36. Anten 15: 5.75 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde	
kazanç gösterimi $\Phi=0$ (a) $\Phi=90$ (b)	45
Şekil 5.37. Anten 16: 5.93 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde	
kazanç gösterimi $\Phi=0$ (a) $\Phi=90$ (b)	45



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

5G	Beşinci Nesil Mobil Haberleşme
AMC	Yapay manyetik iletkenler
BW	Bant Genişliği (Bandwidth)
c_0	Boş uzaydaki ışık hızı
D	Anten yönlülüğü
D_0	Antenin en büyük yönlülüğü
DGS	Kusurlu toprak yapısı
E	Elektrik alan şiddeti
e_0	Toplam anten verimliliği
EBG	Elektromanyetik bant boşluğu
e_{cd}	Anten ışıma verimliliği
EMD	Elektromanyetik Dalga
ENG	Epsilon negative
e_r	Anten yansıma verimliliği
f_r	Rezonans frekansı
FSS	Frekans seçici yüzey
G	Anten kazancı
GDDO	Gerilim durağan dalga oranı
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
H	Manyetik alan şiddeti
HIES	Yüksek empedanslı elektromanyetik yüzey
k_0	Dalga sayısı
MNG	Mu negatif
MYA	Mikroyama anten
n	Kırılma indisi
NRW Yöntemi	Nicholson -Ross-Weir Yöntemi
P	Poynting vektörü
PBG	Fotonik bant aralığı
PEC	Mükemmel Elektrik İletken
PCB	Baskılı devre kartı
PMC	Mükemmel manyetik iletken
RL	Geri dönüş kaybı
S-SRR	Karesel Yarık Halka Rezonatör (Square Split Ring Resonator)
T	İletim katsayısı
U	Anten ışıma şiddeti
U_0	İzotropik anten ışıma şiddeti
U-EBG	Tek düzlemli elektromanyetik bant boşluğu yapıları
UHF	Ultra yüksek frekans (Ultra high frequency)
Z_0	İletim hattı empedansı
Z_{in}	Giriş hattı empedansı
β	Faz sabiti
Γ	Yansıma kat sayısı
ε	Elektriksel geçirgenlik
ε_0	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
ε_r	Bağıl elektriksel geçirgenlik (Dielektrik sabit)
ε_{reff}	Etkin elektriksel geçirgenlik
λ	Dalga boyu

λ_0	Serbest uzayda dalga boyu
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
μ_{reff}	Etkin manyetik geçirgenlik
ω	Açısal frekans
Ω	Ohm



1. GİRİŞ

1.1. Temel Kavramlar

1.1.1. Baskı antenler

Antenler kablosuz haberleşmenin en temel ve önemli elemanlarından biridir. Anten kısaca elektriksel sinyali elektromanyetik dalgaya, elektromanyetik dalgayı ise elektriksel sinyale dönüştüren bir çeşit dönüştürücüdür [1]. Kablosuz haberleşme sistemlerin devamlı gelişmesi ve bu sistemleri kullanan cihazlarda küçülmeye gidilmesi ile daha küçük boyutlarda ancak güçlü antenlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaca cevap olarak baskı antenler (printed antennas) geliştirilmiştir.

Bu antenlerin diğer anten türleriyle karşılaştırıldığında öne çıkan bazı özellikleri bulunmaktadır. Bunlar ;

- Hafiflik
- Üretim kolaylığı
- Yüksek performans
- Düşük maliyet
- Kompakt tasarım

Baskı antenler savunma, radar, telekomünikasyon, Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), kablosuz haberleşme, uydu haberleşmesi, uzay endüstrisi ve medikal uygulamalar gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu antenler milimetrik dalgalardan Ultra Yüksek Frekans (UHF) bandına kadar geniş bir frekans aralığında çalışabilmektedir [1-2].

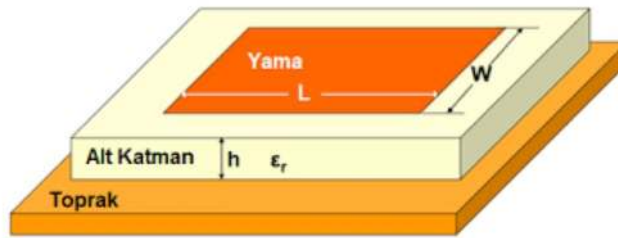
1.1.2. Mikroşerit yama antenler

Düşük maliyetli, hafif ve küçük boyutlara sahip olması ve kolay imal edilebilirliği sebebiyle mikroşerit yama antenler kare, dikdörtgen, E ve H şekli gibi bir çok yama şekline sahip olabilmektedir. Mikroyama anten (MYA) Deschamps tarafından ilk kez 1953 yılında ortaya atıldı. Bilinen ilk patent kaydı Gutton ve Baissinot tarafına Fransada 1955 yılında tescil edildi. 20 yıl geçtikten sonra Mikroşerit antenlerin üretimi alttaş malzemelerinin geliştirilmesiyle 1970’lerde gerçekleştirilebildi. İlk endüstriyel mikroşerit antenler Howell ve Munson tarafından gerçekleştirilmiştir. MYA için sonraki süreçlerde yapılan çalışmalar

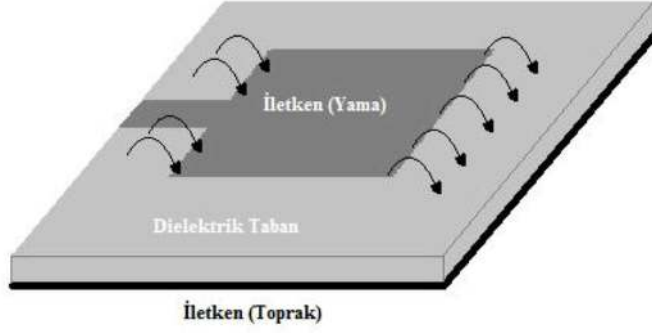
düşük hacim, hafiflik ve uyumluluk gibi özelliklerin iyileştirmesi sağlanarak MYA'ların mikrodalga uygulamalarında kullanılabilmesinin önünü açmıştır [2]. Bir çeşit dahili anten olan mikroşerit anten (basılı anten olarak da bilinir) baskılı bir devre kartı (PCB) üzerinde mikroşerit teknikleri kullanılarak üretilen bir anten türüdür. Çoğunlukla mikrodalga frekanslarında kullanılırlar. Mikroşerit antenler, bir PCB'nin (baskılı devre kartı) yüzeyinde metal bir plakadan farklı şekillere sahip bir yamadan ve kartın diğer yüzünde ise metal plakadan bir zemin yüzeyine sahiptir (Şekil 1.1). Anten genellikle vericiye veya alıcıya mikroşerit iletim hatları (transmission line) üzerinden bağlanır. Mikroşerit antenler, elektronik tüketici ürünleri, uçak ve füzelerin yüzeylerine dahil edilebilecek kadar ince düzlemsel profilleri nedeniyle son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir; baskılı devre teknikleri kullanarak üretilmesi, anteni, kullanılacağı sisteme ait aynı devre kartına devrenin geri kalanıyla entegre etme imkânı sunmaktadır. Yama antenler dar bantlı, geniş ışınlı bir antendir. Yaygın mikroşerit anten şekilleri kare, dikdörtgen, dairesel ve eliptiktir, ancak herhangi bir şekilde olması mümkündür. Bazı yama antenleri bir dielektrik alttaş kullanmaz ve bunun yerine dielektrik aralayıcılar kullanılarak bir zemin düzleminin üzerine monte edilmiş metal bir yamadan yapılır; elde edilen yapı daha az sağlamdır, ancak daha geniş bir bant genişliğine sahiptir. Bu tür antenler çok düşük bir profile sahip olduğundan, mekanik olarak sağlam olduğundan ve bir aracın kıvrımlı cildine uyacak şekilde şekillendirilebildiğinden, genellikle uçakların ve uzay araçlarının dışına monte edilir veya mobil radyo iletişim cihazlarına dahil edilirler [3].

Mikroşerit yama antenin üzerinde bulunan yama ve altında kalan zemin yüzeyi altın veya bakır gibi iletken bir malzemeden üretilmektedir. Yamanın şekli antenin kullanım alanına göre değişebilmekle beraber en sık kullanılan şekiller dikdörtgen ve karedir.

Yamanın uyarılması için antenin beslenmesi gerekir. İletim hattı beslemesi, eşksenel (koaksiyel) besleme veya kuplaj açıklı besleme türleri antenin tasarımına ve kullanım alanına bağlı olarak seçilmektedir.



Şekil 1.1. Mikroşerit Yama Anten Yapısı



Şekil 1.2. Uyarılmış Antenin Işıma Gösterimi [3]

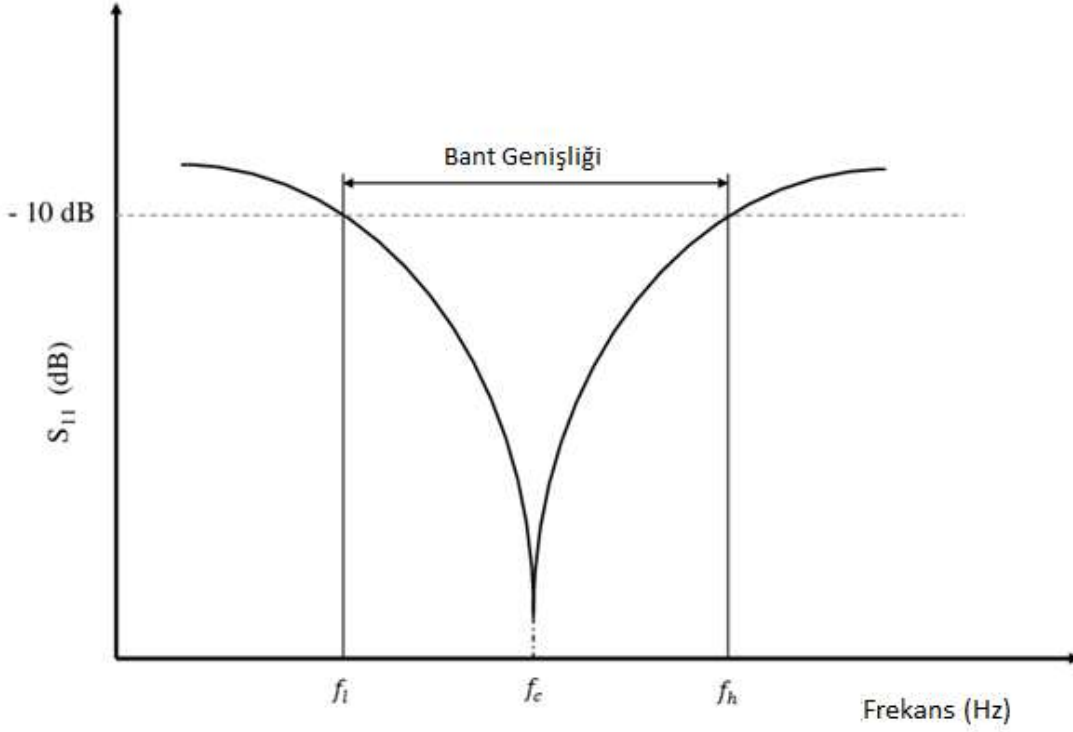
Anten üzerindeki yama uyarılmasıyla birlikte yamanın kenarlarından yer düzlemine doğru elektromanyetik dalga iletimi oluşur. Yamaya dik gelen dalgalar birbirini sönümler ve yamanın köşelerinden saçılan dalgalar ışıma yapar. Bu olaya *fringing effect* denir. Şekil 1.2. de bu ışımanın nasıl gerçekleştiği gösterilmektedir.

İşımanın performansı antende kullanılan alt taşın dielektrik sabitiyle (ϵ_r) ters orantılıdır. Dielektrik sabiti düştükçe anten daha fazla ışıma yapmaktadır. Genel olarak anten tasarımında alttaş olarak kullanılan maddenin dielektrik katsayısı $2.2 < \epsilon_r < 12$ aralığında tercih edilmektedir.

1.1.3. Anten parametreleri

1.1.3.1 Çalışma frekansı

500 MHz - 50 GHz arasında kullanılabilen mikroşerit yama antenlerin bu aralıkta seçilen çalışma frekansı ve belirlenen bant genişliği çerçevesinde çalışır. Bu aralığın dışında kalan elektromanyetik dalgalar yakalanamaz. Bu sebeple anten tasarımında tasarlanan antenin kullanım alanına göre hangi frekans aralığında iletim sağlayacağını belirlemek tasarımın ilk adımlarından biridir.



Şekil 1.3. Geri Dönüş Kaybı Bant Genişliği

Şekil 1.3 de anten bant aralığı diagramı ve antenin karşılık geldiği direnç modeli gösterilmiştir. Burada, bant genişliği aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$Bant\ Genişliği\ (BW) = f_h - f_l \quad (1)$$

$$Bant\ Genişliği\ (\%) = \left(\frac{f_h - f_l}{f_c} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$f_c = \left(\frac{f_l + f_h}{2} \right) \quad (3)$$

Denklemlerde yer alan, f frekansı ifade ederken h , l ve c alt indisleri sırasıyla yüksek, alçak ve merkez değerlerini ifade etmektedir.

1.1.3.2. Giriş empedansı

Antenin giriş empedansı Z_{in} olarak ifade edilmektedir. Antenin giriş noktasındaki empedansı temsil eden bu parametrenin gerçel (reel) ve sanal kısımları bulunmaktadır. Giriş empedansının indüktif ve kapasitif bileşenleri frekansa bağlı olarak değişebilmektedir.

1.1.3.3. Yansımaya katsayısı

Antenden çıkan dalgaların yansımaya oranı Γ ile ifade edilir ve aşağıda verilen Denklem (4) ile gösterilmektedir.

$$\Gamma = \frac{Z_{giriş} - Z_{çıkış}}{Z_{çıkış} + Z_{giriş}} \quad (4)$$

Denklemde yer alan Z empedans değerlerini ifade ederken, alt indis olarak yer alan giriş ve çıkış sırasıyla giriş ve çıkış empedansını ifade etmektedir.

1.1.3.4. Geri dönüş kaybı

Teoride bir ideal anten tasarlandığı varsayılırsa bu antenin %100 verimle çalışması beklenir. Bu antenden çıkan tüm dalgaların alıcı birime kayıpsız ulaştığı anlamına gelmektedir. Ancak pratikte bu mümkün değildir. Geri dönüş kaybı (Return Loss-RL), antene gönderilen enerjinin ne kadarının geri döndüğünü temsil etmektedir. İyi tasarlanmış bir anten için bu değer 10 dB'den yüksek olmalıdır ve geri dönüş kaybının formülü Denklem (5) ile gösterilmektedir.

$$RL = 20 \log |\Gamma| \quad (5)$$

1.1.3.5. Gerilim durağan dalga oranı-GDDO (Voltage Standing Wave Ratio-VSWR)

İletim hattı üzerinde oluşan maksimum ve minimum gerilimlerinin birbirine oranı olan gerilim durağan dalga oranı, geri dönüş kaybı ile bağlantılıdır. Gerilim durağan dalga oranı kaynaktan yansıyan gücü ifade eder. İyi tasarlanmış bir anten için bu değer 2'nin altında olması beklenmektedir. Denklem (6) da gerilim durağan dalga oranı ifade edilmektedir.

$$VSWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (6)$$

Burada yer alan, $VSWR$ gerilim durağan dalga oranını

V_{max} iletim hattı üzerindeki maksimum gerilimi

V_{min} iletim hattı üzerindeki minimum gerilimi ifade etmektedir.

1.1.3.6. Kazanç

Kazanç, antenin ışımasının ideal antenin aynı miktarda enerji verildiğinde yaptığı ışıma oranıdır. Bir antenin kazancı ne kadar yüksekse anten o kadar ideale yakındır. Kazanç ışıma şiddeti ve yönüne bağlıdır. Denklem (7)'deki eşitlikte kazanç denklemi gösterilmektedir.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (7)$$

Denklemde yer alan, $G(\theta, \phi)$ e_{cd} , P_{rad} , $U(\theta, \phi)$ ve $D(\theta, \phi)$ sırasıyla kazanç, anten ışıma verimliliği, antenden ışıyan toplam gücü, ışıma şiddetini ve yönlülüğü ifade etmektedir.

1.1.3.7. Polarizasyon

Bir antenin polarizasyonu, anten tarafından üretilen elektromanyetik alanların, enerji ondan uzaklaştıkça, yönü olarak tanımlanır. Polarizasyon, enerjinin bir anten tarafından hangi yöne uzaklaştığı veya hangi yönden alındığını belirler.

1.1.3.8. Radyasyon Verimliliği

Radyasyon verimliliği, bir anten tarafından yayılan toplam gücün, bağlı vericiden anten tarafından kabul edilen net güce oranı olarak tanımlanır. Bir antenin radyasyon verimi, anten tarafından dışarıya yayılan gücün, giriş gücüne oranıdır. Frekansa bağlı olan radyasyon verimliliği yüzde veya desibel olarak gösterilebilir. İdeal bir anten için radyasyon verimliliği %100 değerindedir [4].

1.1.2. Literatür Taraması

Bu tez çalışmasına temel teşkil etmek üzere, bir literatür araştırması yapılmıştır. Çalışmada Metamalzeme davranışı sergileyen EBG yapıları, mikroşerit antenlerin uygulanmasında yoğun olarak araştırılmıştır. Geniş bantlı anten uygulamalarında, anten boşluğuna genellikle geri yansıyan radyasyonu ortadan kaldırmak için soğurucu yapılar yerleştirilir, ancak bunu yaparken antenin radyasyon verimliliği düşer. Bu tür antenlerin radyasyon verimliliğini artırmak için, EBG (Electromagnetic Band Gap-Elektromanyetik bant boşluğu) yapıları kullanılır. Metamalzemeler, antenlerin verimliliğini artırır, ancak doğada bulunmaz. Bu sebeple istenilen frekans bandında manyetik iletken gibi elektriksel

özelliklere sahip olan periyodik yapılar tasarlanmıştır. Bu yapılara bir örnek olan EBG yapısı, elektromanyetik dalgalarla etkileşime girdiğinde farklı frekanslarda farklı elektriksel özellikler gösterir. Periyodik yapılar belirli frekans bantlarını geçirir, bazı frekans bantlarını reddeder ve bant aralığı olarak bilinen bir frekans bandında manyetik bir iletken gibi davranır. Antenlerde bu yapılar çalışma bandını arttırmak, harmonikleri bastırmak, geri dönüş kaybı, radyasyon verimliliği, yönlülük ve kazanç değerlerini yükseltmek, antenin boyutunu küçültmek üzere özellikle son dönemlerde oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde iletişim sistemleri mühendisliğindeki gelişme, geniş bir frekans yelpazesinde yüksek performans sağlayabilen düşük profilli antenlerin geliştirilmesini gerektirmektedir.

1972'de USAFR Araştırma ve Geliştirme Programı'nın Yirmi İkinci Yıllık Sempozyumu'nda sunulan bir makalede Munson, anten topluluğunun dikkatini hızla çeken ve hızla popüleritesi ve kullanışlılığı artan mikroşerit antenin ilk düzenlemesini tanımladı. Bernhard, Mayes, Schaubert ve Mailloux'un hazırladığı [5] mikroşerit antenlerin gelişimi ve yönelebileceği yeni yollarını hedef alan inceleme makalesi temel parametreler, anten türleri, çalışma, temel kavramlar ve özellikler ile besleme teknikleri ve simülasyonu ve mikroşerit yama anteninin sonuçlarını içermektedir.

Kerr [6], bir inç karelik bölgenin kaldırılmasının yamanın rezonans frekansını 1370 MHz'den 1250 MHz'e düşürdüğünü ve bu da yamayı çalışma frekansında elektriksel olarak daha küçük hale getirdiğini kaydetti. Üç yıl sonra, Mink [7], Kerr'in gözlemlerini açıklayan ve bu kavramı Bell antenlerini içerecek şekilde genişleten bir teori sundu.

Mikroşerit antenler tek bir hücre olarak kullanılabildiği gibi dizi şeklinde yerleştirildiğinde tek bir anten gibi çalışırlar. Dizi antenlerin kazancı tekil hücre halinden fazla olabilmektedir. Pradeep ve Kalaigamal'ın [8] geliştirdiği 10 GHz çalışma frekansına sahip 4x1 ve 4x2 mikroşerit anten dizilerinin kıyaslanmasını gözler önüne sunmuştur

Singh [9] tarafından yapılan çalışmada dahili besleme mikroşerit yama anteninin bant genişliğini ve geri dönüş kaybını artırmak hedeflenmiştir. Bu anten, ISM (Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal) frekans bandına giren 2.4 GHz frekansı için kullanışlıdır. Tasarlanan antenin, 80 MHz bant genişliği ile 2.4 GHz frekansında -40,5 dB geri dönüş kaybı ve 6.69 dBi kazanç değeri bulunmaktadır. Dahili beslemenin empedans eşleme ve geri dönüş kaybı parametrelerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Abdelaziz ve Hamad ise 3 bant aralığında çalışan mikroşerit yama anteni tasarımı gerçekleştirmiştir. Dikdörtgen şekline sahip anten yaması üzerinde T şeklinde iki boşluk oluşturarak antenin 10.28 ve 38 GHz frekanslarında çalıştığı bant genişliği ve geri dönüş kaybı değerlerinin iyileştiği görülmüştür [10].

Çok bantlı anten tasarımına ayrı bir örnek olarak Armağan ve Kahrımanın yaptığı çalışmada ise dikdörtgen yama anten üzerine bir dikdörtgen ve bir eşkenar dörtgen yerleştirilmiş ve köşelerinin kesilmesiyle elde edilmiş bir geometriye sahiptir. Antenin yama şekli üzerine yapılan bu müdahaleler sonucu 2.45 GHz, 3.7 GHz ve 5.8 GHz frekans bantlarında çalışan bir anten elde edilmiştir [11].

Gopi ve diğerleri tarafından kazancı ve bant aralığı oldukça düşük olan dairesel yamaya sahip mikroşerit antenin besleme hattında kalan zemin yüzeyine H şeklinde boşluklar oluşturarak bu parametrelerin iyileştirilmesi yapılmıştır [12].

Demirci'nin yaptığı çalışmada 5G teknolojisi için 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında birçok Dikdörtgen Mikroşerit Anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Besleme tipi olarak çeriden temassız ve yakınlık kuplajlı besleme yöntemi kullanılarak ve zemin yüzeyine Halka, Çubuk, Halka/Çubuk şeklinde boşlukların kombinasyonu ile yapılan birçok tasarımın sonucunda bant genişliği, kazanç, geri dönüş kaybı gibi anten parametrelerinin iyileştirildiği gözlemlenmiştir [13].

EKKE ve Zade'nin [14] yaptığı çalışmada çeyrek dalga dönüştürücüsü (transformatörü) kullanan 2x2 mikroşerit dizi anten üçgen ve kare yama ayrı ayrı kullanılarak yama şeklinin parametrelere etkisini kıyaslamıştır. Üçgen yamanın geri dönüş kaybı ve kazanç parametrelerinde kare yama kullanılan anten dizisine göre daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. Üçgen yama kullanılan antende bant genişliğinde gözlemlenen düşüş antenler arası boşluğu arttırarak ve besleme pozisyonunu ayararak düzeltilmiştir.

Yılmaz tarafından yapılan çalışmada 5.8 GHz Doppler radar sisteminde kullanılmak üzere metmalzeme tabanlı verici ve alıcı anten tasarlanmış ve üretilmiştir. Antenin sisteme entegre edilmiş halinin iç/dış ortam ve duvar arkası radar performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçları ışığında elde edilen antenin gücünün çoğunu daha dar bir açıda ortama yaydığı gözlemlenmiştir [15].

Metamalzemeler hızla ilerleyen teknoloji ile birçok alanda kendini göstermiştir. Çıngı mikrodalga uygulamaları için sinyal emici olarak metmalzeme tasarımı yapmış olup 12.227

GHz frekansında %99,98 oranında verimle sinyal emebilen bir metamalzeme tasarımı gerçekleştirmiştir [16].

Shav ve Mitra'nın yaptığı çalışmada, anten yönlülüğünün artırılması için slot anten üzerine 2×2 SRR birim hücre dizisine sahip dört plaka yerleştirilmiştir. Yaklaşık 6 dB'lik yön artışının yanı sıra % 11,4'lük anten minyatürleşmesi de elde edilmiştir [17].

Doğan'ın yaptığı çalışmada metamalzeme olarak 1x4 dizi SSR hücreleri 7 adet plaka olarak anten yamasının üzerine dik konumlandırılmıştır. Klasik yama anten üzerinde yapılan bu değişiklik antenin kazanç ve geri dönüş kaybı parametrelerini iyileştirmiştir [18].

Küçüköner ve diğerlerinin yaptığı çalışmalarda SRR hücresi antenin zemin yüzeyine boşluk olarak yerleştirilmiş ve bozunmuş zemin yüzeyi kullanılarak anten boyutlarında %70'e varan elektriksel boyut küçültmesi sağladığını gözlemlemişlerdir [19].

Dairesel yama anten altına Dairesel SSR hücresi şeklinde zemin yüzeyinde boşluk oluşturan Raval ve diğerleri 5.04 dB kazancasahip ve daha kompakt bir anten elde etmişlerdir [20].

Paul ve diğerleri metamalzeme deseni olarak iç içe geçen üçgen tasarımı tercih etmiş ve yaptıkları çalışmada bu deseni 2x2'lik dizi olarak antenin zemin yüzeyinde boşluk olarak yerleştirmiştir. Bunun sonucunda kazanç, geri dönüş kaybı, VSWR parametrelerinde büyük ölçüde iyileşme elde etmişlerdir [21].

Yıldız ve diğerleri tarafından yapılan bir başka çalışmada ise dikdörtgen yarık halka rezonatör diziler haline getirilerek oluşturulan metamalzeme yapısı kullanılarak lens anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar ışığında metamalzeme yapısının çalışılan frekans aralığında bir süper lens (mercek) anten gibi davrandığı görülmüştür [22].

Metamalzemenin özellikle savunma alanına yaptığı en büyük katkı belirli frekans aralığında görünmezlik sağlamasıdır. Gizleme, bir nesne tarafından üretilen elektrik ve manyetik alanın iptal edilmesiyle veya elektromıknatıs dalgasının nesnenin etrafında yönlendirilmesiyle sağlanabilir. Dalgayı yönlendirmek, koordinat sistemini, içi boş pelerin içindeki elektromanyetik alanın sıfır olacağı şekilde dönüştürmek anlamına gelir, bu da kabuğun içindeki bölgenin kaybolmasına neden olur. Koordinat dönüşümü kavramına dayalı metamalzeme pelerini Adnan Noor tarafından tanımlanmıştır [23].

Anten çalışmalarında metamalzemenin kullanım şekillerine devam edecek olursak Li, Zhang, Kuang, Chen, Xiao ve J. Zhang [24] ekibi tarafından oluşturulan antenin yama

elementinde 2x4 dizilik dairesel yarık halka rezonatör, kullanılmış 3.5 GHz çalışma frekansında 100 MHz bant genişliği elde edilmiştir.

Arora Pattnaik ve Baral [25], 5.8 GHz çalışma frekansına sahip bir mikroşerit anten dizisini yarık halka rezonatörlerle buluşturarak çalışma bandı ve kazançta kayda değer değişimler gözlemlemiştir.

Raval, Kosta, Makwana ve Patelin [26] tasarladığı mikroşerit yama antende metamalzeme S-SRR tekil hücresi yamanın altına gelecek şekilde zemin düzleminde boşluklar oluşturularak konumlandırılmış ve bu sayede 10 GHz çalışma frekansına sahip daha küçük boyutlarda bir anten gerçekleştirilmiştir.

Ali ve Jasim [27] geliştirdikleri antenin yama ve zemin yüzeyinde simetrik boşluklar oluşturarak 2.4 GHz ve 3.5 GHz rezonans frekanslarında 1768 MHz değerinde bant genişliği elde etmişlerdir.

Lima, Cunha ve Silva [28] metamalzeme hücrelerinin mikroşerit yama antenler üzerindeki etkisini araştırmak adına mikroşerit yama antenin altına gömülü bir metamalzeme dizisi oluşturularak antenin parametrelerinin hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarını karşılaştırmış ve metamalzemelerin mikroşerit antenlerin performansı üzerine olumlu bir etkisi olduğunu gözler önüne sermiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında, yukarıdaki çalışmalara ilaveten, bozunmuş zemin yüzeyinde S-SRR hücrelerinin konumları ve birbirine olan mesafelerinin anten parametrelerine etkilerinin nasıl olacağı konusuna ağırlık vererek, avantaj ve dezavantajlarını ele alınmıştır.

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

Geçmişten günümüze kadar haberleşme teknolojileri insanların iletişim biçimlerini büyük ölçüde şekillendirmektedir. Mektuplardan mesaj ve maile, mobil bir cihazdan yapılan bir çağrı ile anında haberleşme imkanına gelişen bu süreç ileride belki de tamamen farklı yöntemlerle sağlanacaktır. Kablosuz haberleşme sistemlerinin en önemli yapıtaşı olan antenler günümüzde hızla gelişmeye devam etmektedir. Antenler kullanım alanına bağlı olarak belirlenmiş bir frekans aralığında iki sistem arasında(verici-alıcı) veri gönderimine olanak sağlar. Özellikle son dönemlerde popülerliği artan kompakt yapıdaki baskı antenler geleneksel çanak antenlerin yapamayacağı bir şekilde telefon ve bilgisayarlar gibi ince ve

ufak boyutlu elektronik cihazların içinde yer edinmeyi başarmıştır. Devrim niteliği taşıyan metamalzemelerin bulunmasıyla anten üzerine yapılan çalışmalar ayrı bir boyut kazanmıştır. Metamalzemeler antenlerin çeşitli parametrelerini iyileştirmek ve antenin merkez çalışma frekansı değiştirilmemesine rağmen zaten boyutları küçük olan baskı antenlerin daha da kompakt bir tasarıma sahip olmasını sağlamaktadır. Doğada bulunmayan, ters kırılma indisine sahip olan metamalzemeler (solak malzemeler) bu özelliği sayesinde antenlerin kendine has parametrelerini iyileştirmesinin yanı sıra elektromanyetik dalga emiciliği yüksek olması sebebiyle çeşitli anten çalışmalarında antenlerin etrafında soğurucu yapı olarak boy göstermektedir.

Yapılan tez çalışmasında 4-8 GHz aralığını kapsayan C bandında 5.8 GHz merkez çalışma frekansına sahip gömülü beslemeli mikroşerit yama anteni tasarımı yapılmış olup bu yapı, metamalzeme alt sınıflarından biri olan EBG yapılarının Bozulmuş Zemin Yapısı (Defected Ground Structure- DGS) ile buluşturulmasıyla anten parametrelerinde olumlu yönde bir değişim geliştirmek amaçlanmıştır. Tasarlanan anten için alttaş olarak Rogers RT Duroid 5880 malzemesinin parametreleri esas alınarak, dielektrik katsayısı 2.2, kalınlığı 0.9 mm olan bir alttaş üzerine simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bozulmuş Zemin yüzeyinde kullanılmak üzere Karesel Halka Yarık Rezonatör (S-SRR) şekli seçilmiştir. Zemin yüzeyine S-SRR şekli periyodik olarak yerleştirilmiş ve bu şekiller zemin yüzeyinde boşluk olarak ayrılmış daha sonraki aşamalarda ise bu şekiller dışında kalan zemin yüzeyinin boşluk olarak bırakılmasıyla Bozulmuş Zemin Yapısı oluşturulmuştur. Bozulmuş Zemin yapısında farklı versiyonlar denenerek anten parametrelerindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Metamalzeme S-SRR yapısı tek hücreli olarak CST Microwave Studio-MATLAB haberleşmesiyle CST Microwave Studio’da da tasarlanmış, Nicholson-Ross-Weir (NRW) Algoritması ile S-Parametrelerine bağlı manyetik geçirgenlik μ ve elektriksel geçirgenlik ϵ değer grafikleri MATLAB’da yazılan kod sayesinde CST Microwave Studio’da incelenerek söz konusu antenin çalışma frekansları arasında negatif değer almasıyla metamalzeme olduğu kanıtlanmıştır. Daha sonra tasarlanan ve optimize edilen S-SRR hücresi ADS programında tasarımı gerçekleştirilen yama antenin zemin yüzeyine periyodik olarak yerleştirilip zemin yüzeyi deforme edilmiş ve parametrelerdeki değişimler incelenmiştir.

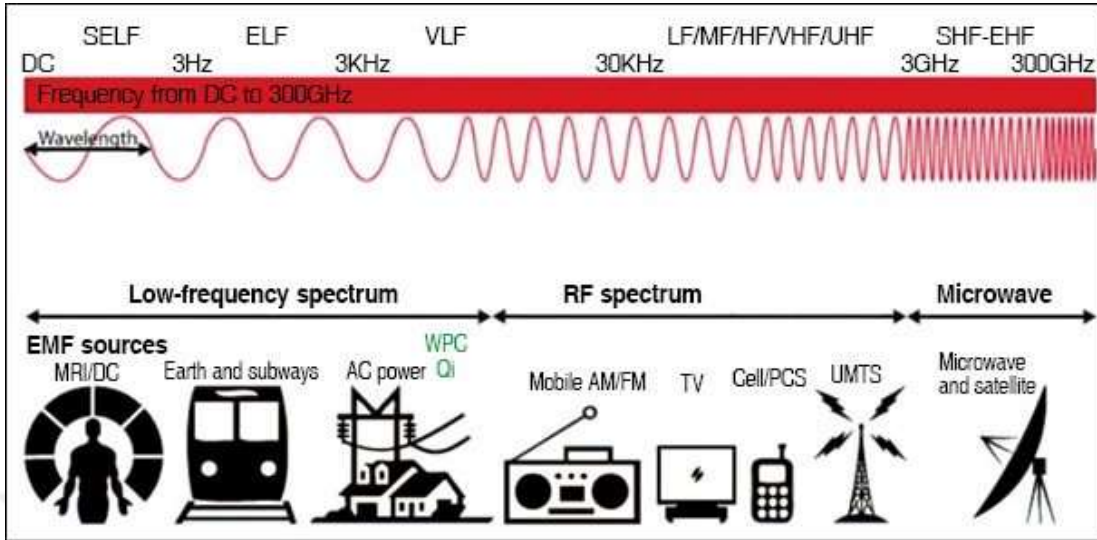
2. FREKANS BANTLARI

Radyo frekans bantları yüksek frekanslarda çalışan sistemlerin sınıflandırılabilmesi için oluşturulmuştur. Farklı kuruluşların farklı tanımları olsa da International Telecommunication Union (ITU), IEEE ve NATO standartları sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda IEEE'nin dünya çapında büyümesi ve etkinleşmesi sebebi ile akademik çalışmalar başta olmak üzere ticari ürünlerin sınıflandırılmasında da sıklıkla tercih edilen bir standart olmuştur. Tablo 2.1'de ITU radyo frekans bantları gösterilmektedir.

HF bant aralığı (3-30MHz), Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisinde, kısa dalga telsiz haberleşmesi için sıklıkla kullanılan bir bant aralığıdır. VHF bant aralığı (30-300MHz), FM radyo yayınlarında ve kara-hava-deniz telsiz haberleşme sistemlerinde kullanılırken UHF (300-3000MHz) günlük kullanımda en sık kullanılan bant aralığıdır. Mikrodalga fırınlar, modern telsiz iletişim sistemleri (cep telefonu, bluetooth, WiFi), yön bulma sistemleri ve uydu radyo yayınları UHF bandı dahilindedir. Beşinci Nesil Mobil Telekomünikasyon teknolojisi (5G) bu bandın içerisinde yer almasından dolayı öne çıkan SHF bandı (3-30 GHz), uydudan televizyon yayıncılığına, modern radarlardan ve telsiz iletimine kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Tablo 2.1. ITU Radyo Frekans Bantları

Bant Kısaltması	Tanım	Frekans Aralığı
MF	Orta Frekans (Medium Frequency)	300-3000 kHz
HF	Yüksek Frekans (High Frequency)	3-30 MHz
VHF	Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)	30-300 MHz
UHF	Ultra Yüksek Frekans (Ultra High Frequency)	300-3000 MHz
SHF	Süper Yüksek Frekans (Super High Frequency)	3-30 GHz
EHF	Son Derece Yüksek Frekans (Extremely High Frequency)	30-300 GHz

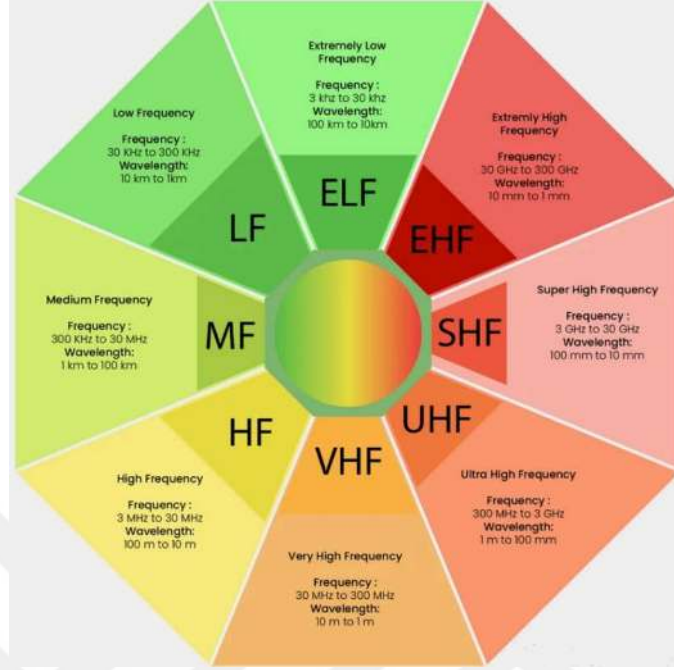


Şekil 2.1. Çeşitli Radyo Frekanslarının Kullanım Alanları [29]

IEEE standartlarının en önemli özelliği son zamanlarda sıklıkla kullanılan 1-20 GHz bant aralığı için ayrı bir sınıflandırma sunmasıdır. Asıl amacı radar bantlarını tanımlamak olsa da haberleşme sistemlerinin tanımlanmasında da sık sık kullanılmaktadır. Şekil 2.2 de Radyo Frekans Spekturumu ile söz konusu bantların her birinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. IEEE Radar Bantları [30]

Bant Kısaltması	Tanım	Frekans Aralığı
HF	Yüksek Frekans (High Frequency)	0,003-0,03 GHz
VHF	Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)	0,03-0,3 GHz
UHF	Ultra Yüksek Frekans (Ultra High Frequency)	0,3-1 GHz
L	Uzun Dalga (Long Wave)	1-2 GHz
S	Kısa Dalga (Short Wave)	2-4 GHz
C	Ortayol (Compromise)	4-8 GHz
X	X	8-12 GHz
K_u	Kurz-altı (Kurz-under)	12-18 GHz
K	Kurz	18-27 GHz
K_a	Kurz-üstü (Kurz-above)	27-40 GHz
V		40-75 GHz
W		75-110 GHz



Şekil 2.2. Radyo Frekans Spektrumu [31]

Radyo Frekans Spektrumu Şekil 2.2 de gösterildiği gibi 8 bölüme ayrılmıştır. Aşırı Düşük Frekans 3 kHz-30 kHz aralığını kapsar. Bu aralık kablosuz kalp atış hızı takip monitörleri, jeofizik alanında ve denizaltılarda iletişim sistemlerinde kullanılmaktadır. 30 kHz-300kHz aralığı Düşük Frekans olarak adlandırılır. Zaman sinyallerinde, RFID ve amatör radyo yayınlarında bu aralık tercih edilmektedir. Orta Frekans bölgesi 300 kHz-30 MHz bant aralığını kapsar ve bu frekans bölgesi amatör radyolar, AM orta dalga yayınlarının yapılmasında kullanılmaktadır. Yüksek Frekansın kapsadığı 3 MHz-30 MHz radyo, havacılık, deniz ve mobil telefonu ve bazı radar sistemlerinde tercih edilmektedir. Çok Yüksek Frekans spektrumunda 30 MHz-300 MHz frekans aralığını kapsamaktadır. Televizyon yayınları, FM radyo, uçaklarla iletişim, kara ve deniz iletişim sistemleri bu frekans aralığında çalışmaktadır. Ultra Yüksek Frekans 300 MHz-3 GHz frekans aralığını kapsar ve uydu radyosu, uzaktan kumanda, GPS gibi sistemler bu frekans aralığında çalışmaktadır. 3 GHz-30 GHz aralığını kapsayan Süper Yüksek Frekans Kablosuz LAN, uydu sistemleri, kablo ve uydu televizyon yayını, bazı modern radar sistemlerinin çalıştığı frekans aralığıdır. Aşırı Yüksek Frekans radyo frekans spektrumundaki en yüksek frekans bölgesini kapsar ve bu bölgede tercihe ve tasarıma bağlı olarak diğer frekans bölgelerinde bahsi geçen sistemlerin de çalışabilmesinin yanı sıra yönlendirilmiş enerji silahı ve milimetre dalga tarayıcısı gibi sistemlerin çalıştığı frekans aralığıdır.

3. METAMALZEME

3.1 Metamalzeme nedir?



Şekil 3.1. İlk Çift Negatif Malzeme [32]

Metamalzemelerin yapılarında, hesaplanarak yapılan değişiklikler sayesinde doğada bulunan malzemelerde bulunmayan negatif kırılma indeksi ve elektromanyetik perdeleme özellikleri elde edilmiştir. Metamalzemeler bu sıradışı özellikleri sebebiyle sağ el kuralı yerine sol el kuralını kullanmaktadır bu sebeple aynı zamanda “solak madde” olarak anılmaktadır.

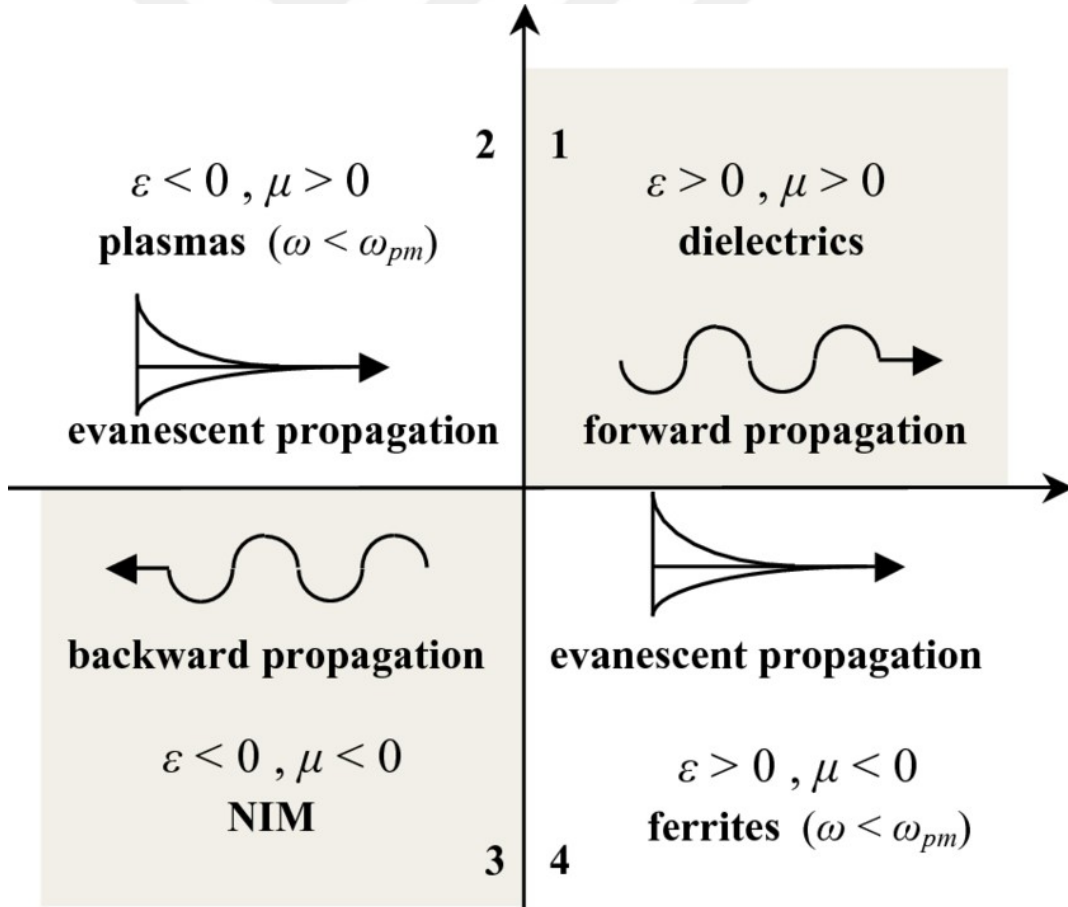
Metamalzemelerin ilk ortaya çıkışı 1989 yılına dayanmaktadır. Hintli bilim insanı Dr. Jagdish Chandra Bose'nin günümüzdeki metamalzemelere oldukça benzeyen yapıları incelemesiyle başlayan metamalzemenin gelişim süreci, 1948'de AT&TBell Laboratuvarları'nda W.E Kock tarafından geliştirilen malzeme ile ilk kez hayata geçmiştir. 1960'lı yıllarda Rus Fizikçi Victor Veselago ilk defa metamalzemelerin teorik özelliklerini Maxwell Denklemlerine dayandırarak açıklamıştır. Metamalzeme ismi ise ilk kez 1999'da Roger Waalser ortaya atmıştır. İki fizikçi John Pendry ve David Smith, ekibiyle beraber ışığın bükülmesine izin verebileceği düşünülen mühendislik malzemesini elde etmişlerdir. Bu, bilimkurgu filmlerinde sıkça karşımıza çıkan görünmezlik kavramının temeli olabilecek bir buluştur.

Doğada bulunan bir cisme ışık vurduğunda üç durum meydana gelmektedir. Bunlar ışığın yoluna devam etmesi, ışığın bir miktar veya tamamen yansması olarak gözlemlenir.

Ancak metamalzeme teknolojisiyle beraber ters kırılma indisi özelliği sebebiyle ışık negatif yönde saptırılabilir. Metamalzeme kaplanan bir cisim için bu özellik, ışığın cismin etrafına hareket ettirilmesiyle görünmez olabileceği anlamına gelmektedir.

3.2. Metamalzemelerin temel özellikleri

Aşağıda yer alan figürde birinci bölge çoğu dielektrik materyali kapsamaktadır. Bu bölgede yer alan manyetik ve dielektrik katsayılarının her ikisi de pozitifdir. İkinci bölgede metaller, ferroelektrik metaller, dışsal yarı iletkenler bulunmaktadır. Bu bölgedeki malzemelerin dielektrik katsayıları pozitif bölgede kalırken manyetik geçirgenlik katsayıları negatif bölgededir. Üçüncü bölgede ise metamalzemeler yer almaktadır. Yapay olmayan hiçbir malzeme bu bölgede bulunmaz. Bu bölgede hem dielektrik hem de manyetik geçirgenlik katsayıları negatiftir. Dördüncü bölge ferrit malzemeleri içinde bulundurmakla beraber dielektrik geçirgenlik katsayısı pozitif, manyetik geçirgenlik katsayısı negatiftir.



Şekil 3.2. Materyallerin Dielektrik Ve Manyetik Geçirgenliklerine Göre Sınıflandırılması

[3]

Kırılma indisi n ile dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayıları arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$\eta = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (8)$$

Bu Denklemden;

η kırılma indisi

ϵ dielektrik geçirgenlik katsayısı

μ manyetik geçirgenlik katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

Sağ el kuralının geçerli olduğu malzemeler için n pozitif iken sol el kuralının uygulandığı metamalzemeler için n negatif değer alır. Elektromanyetik dalganın güç yoğunluğunu ifade eden Poynting Vektörü elektrik alan ve manyetik alan şiddet vektörlerinin çarpılmasıyla elde edilir. Poynting Vektörü aşağıdaki eşitlik ile izah edilmektedir.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (9)$$

Burada yer alan;

$\vec{P}$ Poynting vektörü

$\vec{E}$ elektrik alan şiddeti vektörü

$\vec{H}$ manyetik alan şiddeti vektörünü ifade etmektedir.

Sol el kuralının geçerli olduğu durum için aşağıdaki elektrik alan E ve manyetik alan M Denklemleri incelendiğinde elektromanyetik dalganın ilerleme vektörü k ile Poynting Vektörü birbirine zıt yöndedir. 10 ve 11 numaralı eşitlikte söz konusu ifadeler denklem olarak ifade edilmektedir.

$$\vec{k} \times E = -\omega \mu H \quad (10)$$

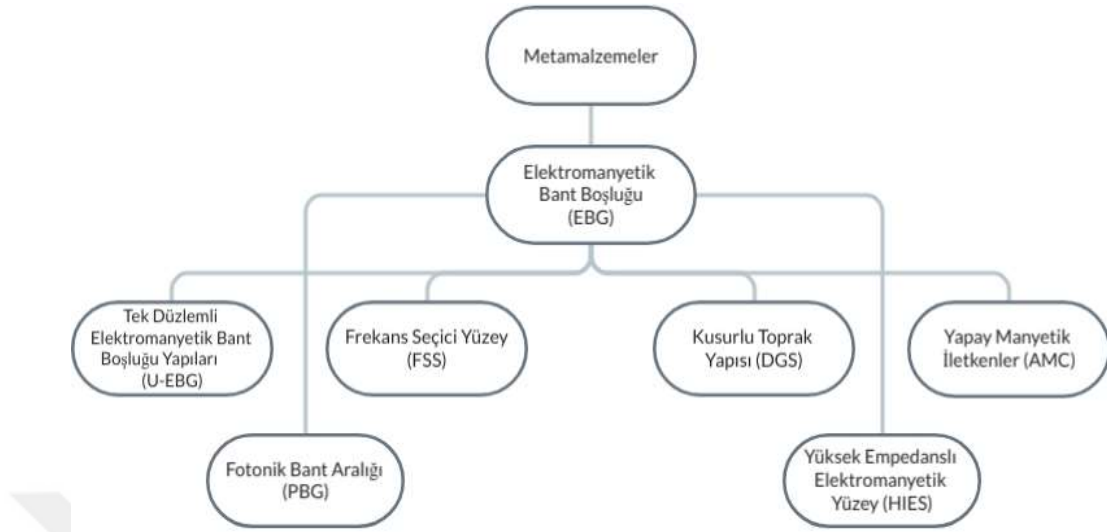
$$\vec{k} \times H = +\omega \epsilon E \quad (11)$$

ω açısal frekans

$\vec{k}$ elektromanyetik alanın ilerleme vektörü

3.2.1. Metamalzeme türleri

Elektromanyetik band boşluğu (EBG) çatısı altında metamalzemeler altı sınıfa ayrılmaktadırlar. Tez çalışmasında tek düzlemlili EBG ve Kusurlu Zemin Yapısı (DGS) üzerine çalışmalar yapılmıştır.



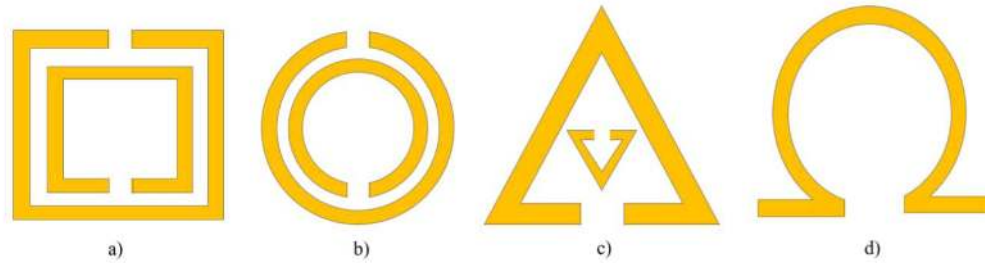
Şekil 3.3. Metamalzemelerin sınıflandırılması

3.2.2. Bozulmuş Zemin Yapısı (Defected Ground Structure / DGS)

Kusurlu Zemin yapısı baskı antenlerde zemin plakasında istenilerek kusur oluşturulması şeklinde tanımlanabilir. EBG yapılarının basitleştirilmesi ile ortaya çıkan DGS, elektronik uygulamalarında ve mikroşerit iletim hatlarında genellikle bant durdurma özelliği için kullanılmaktadır.

3.3. Metamalzemelerin Anten Çalışmalarındaki Uygulamaları

Metamalzemeler baskı antenlerde daha kompakt tasarım, bant genişliği ve kazanç gibi parametrelerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. EBG yapıları karşımıza birçok şekil ve desen ile çıkmasına karşın, anten çalışmalarında en sık kullanılan yapılardan biri yarık halka rezonatörlerdir. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4. Rezonatör Geometrileri: A) Karesel Yarık Halka Rezonatör B) Dairesel Yarık Halka Rezonatör C) Üçgensel Yarık Halka Rezonatör D) Omega Rezonatör [35]

4. NICHOLSON-ROSS-WEIR YÖNTEMİ

Nicholson-Ross-Weir yöntemi bir malzemenin yansıma ve iletim parametrelerinden elektriksel ve manyetik geçirgenliğinin bulunmasını sağlayan bir yöntemdir. S-parametrelerinden elde edilen malzeme değerlerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem kırk yıldan daha uzun bir süredir malzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenliğinin bulunmasında kullanılan standart bir tekniktir.

Nicolson-Ross-Weir yöntemi sayesinde malzemenin elektriksel ve manyetik geçirgenliği, kırılma indisi S-parametre koşulları ile açıklanmaktadır. Özellikle, metamalzemeler için negatif olan bu değerlerin bulunmasında bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır.

$$\Gamma = \left(\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \right)^2 - 1} \quad (12)$$

İletim katsayısı T ile sembolize edilmektedir. S parametreleri ve yansıma katsayısı ile doğrudan ilişkilidir.

$$T = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (13)$$

Manyetik geçirgenlik;

$$\mu = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (14)$$

Elektriksel geçirgenlik;

$$\varepsilon = \frac{\lambda_0^2}{\mu \left[\frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\Lambda^2} \right]} \quad (15)$$

Lambda λ_0 ve λ_c sırasıyla serbest uzayda dalga boyu ve kesim frekanslı dalga boyunu temsil etmektedir.

Denklemin içinde kolaylık amacı ile tanımlanan Λ^2 aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

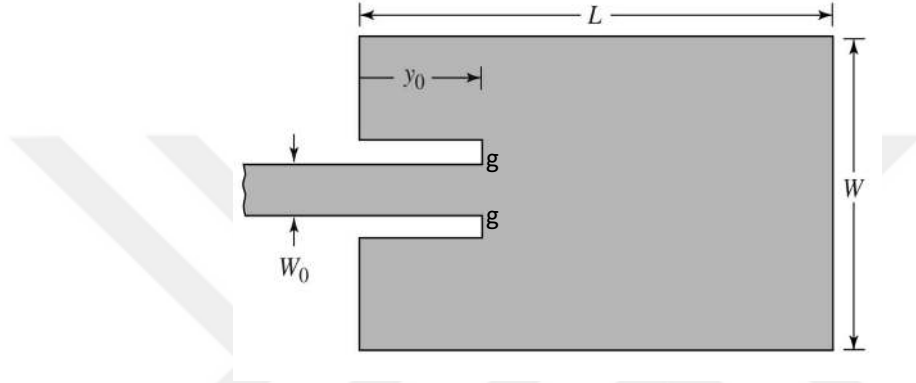
$$\Lambda^2 = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^{-2} \quad (16)$$

Denklemden yer alan L malzeme kalınlığını ifade etmektedir.

5. TASARIM

5.1. Anten Tasarımı

Bu tez çalışmasında 5.8 GHz rezonans frekansının dahil olduğu C bandında (4-8 GHz) çalışan mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan anten için besleme tekniği gömme besleme tercih edilmiştir (Şekil 5.1.).



Şekil 5.1. Gömme Beslemeli Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Antenin yama genişliği (W) ve uzunluğu (L) hesaplamalarında kullanılan Denklemler Denklem 17 ve Denklem 18 ile gösterilmektedir [3].

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (17)$$

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}} - 2\Delta L \quad (18)$$

Burada, f_r rezonans frekansını temsil etmektedir.

Etkin dielektrik sabiti (ϵ_{reff}) formülü Denklem 19’da gösterilmektedir.

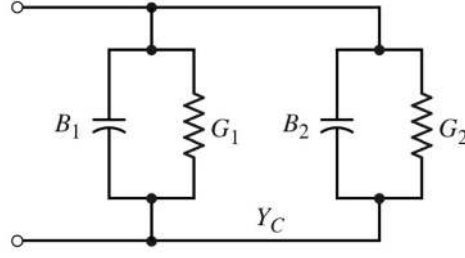
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (19)$$

Burada h alttaşın uzunluğunu ifade etmektedir.

Gömme beslemesi ile yama arasındaki boşluk (g) Denklem 20 ile hesaplanmaktadır.

$$g = \frac{v_0}{\sqrt{2\epsilon_{eff}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f} \quad (20)$$

Antenin devre karşılığı Şekil 5.2 de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Antenin Devre Karşılığı

Burada, G_1 değeri Denklem 21 ile hesaplanmaktadır.

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (21)$$

G_{12} parametresi iletkenliği (conductance) ifade eder ve karşılıklı iletkenlik (mutual conductance) G_{12} değeri Denklem 21 deki formüle göre bulunmasıyla, Denklem 22 ile R_{in} değeri hesaplanır.

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \quad (22)$$

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \quad (23)$$

R_{in} değeri (y_0) gömülü besleme hattının girinti uzunluğunun bulunması için kullanılmaktadır.

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \arccos\left(\sqrt{\frac{Z_c}{R_{in}}}\right) \quad (24)$$

Rezonans frekansı $f_r = 5.8$ GHz olan anten için öncelikle alttaş(substrate) malzemesi seçilmiştir. Alttaş parametreleri için kalınlık 0.9 mm ve dielektrik katsayısı 2.2 ($\epsilon_r = 2.2$) olarak seçilmiştir. Alttaş dielektrik katsayısı ϵ_r 'nin 2.2-12 arasında olması tasarım kriteri olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple tasarlanan antenin alttaşı için dielektrik katsayısı en tasarım kriteri için küçük değer olan 2.2 tercih edilmiştir. Dielektrik katsayısı ne kadar küçük olursa antenin ışıma performansı o kadar yükselir. Alttaş kalınlığı ise yamayı olabildiğince kareye yaklaştırarak optimizasyon kolaylığı sağlaması için yukarıda verilen denklemlere

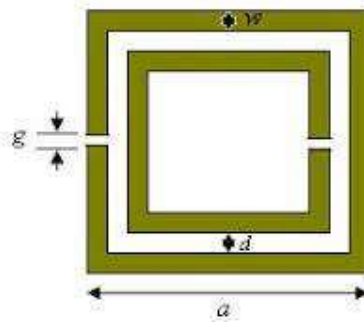
göre 0.9 mm olması uygun görülmüştür. Mikroşerit yama antenin simülasyonları ADS programında gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda verilen denklemler ve tasarım kriterlerine göre Mathcad ile yapılan hesaplamalar sonucu gömme beslemeli mikroşerit yama anten için elde edilen uzunluklar aşağıda verilmiştir.

Tasarlanan Mikroyama Anten Ölçüleri

Anten Genişliği (W)	Anten Uzunluğu (L)	y_0	g	Besleme Kalınlığı (W_0)
20.43 mm	16.95 mm	5 mm	1 mm	2.57 mm

5.2. Metamalzeme S-SRR Hücre tasarımı



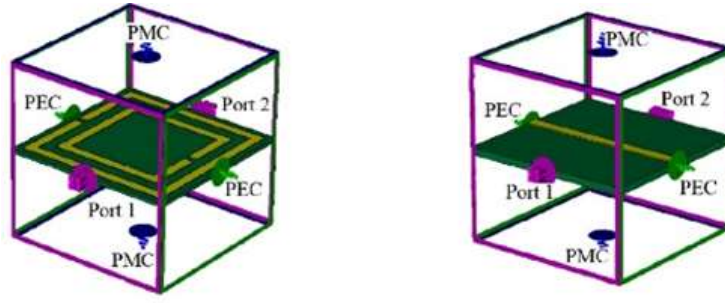
Şekil 5.3 birim hücre S-SRR

Tez çalışmasında tasarlanan ve anten tasarımlarına entegre edilen S-SRR hücresi (Şekil 5.3) için uzunluk değerleri aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Tasarlanan S-SRR Hücresi Ölçüleri

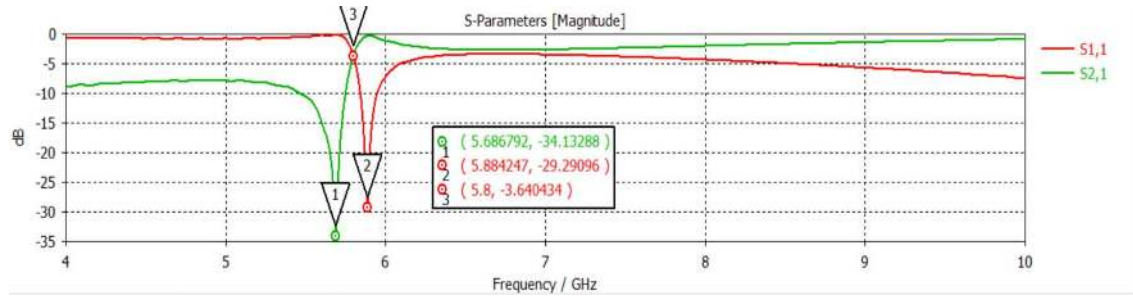
S-SRR1	g	A	W	D
	0.13 mm	3.145 mm	0.13 mm	0.115 mm

S-SRR1 için elde edilen grafikler MATLAB'da hazırlanan program ve CST Microwave Studio haberleşmesi ile çizilerek S-parametrelerine dair grafikleri aşağıda verilmiştir. Elde edilen iletim ve yansıma parametrelerine (S parametrelerine) NRW algoritması uygulanarak göstermesi ϵ ve μ değeri değerleri elde edilmiştir. Tasarlanan S-SRR hücreleri için sınır yüzey gösterimleri Şekil 5.4 de verilmiştir.



Şekil 5.4. Tasarlanan S-SRR hücreleri için sınır yüzey gösterimleri

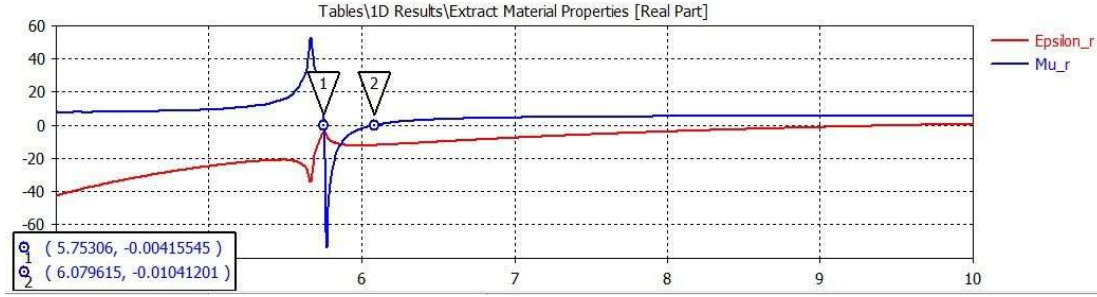
Sınır belirlemede Şekil 5.4. de görüldüğü üzere S-SRR Hücresine paralel olan yüzeyler PMC süper manyetik iletken ($\mu \rightarrow \infty$), portların bulunduğu yüzeyler harici hücreye dik olan yüzeyler ise PEC süper elektrik iletken ($\epsilon \rightarrow \infty$) olarak atanmıştır. Şekil 5.5. de S-SRR için birim hücre iletim (S_{21}) ve yansıma (S_{11}) genlikleri gösterilmiştir. S_{11} grafiği port 1'e geri yansıyan sinyali ifade eder. S_{21} ise port 1 den besleme yapıldığında port 2 ye yansıyan sinyali ifade etmektedir. S-SRR hücresi tasarım aşamasında port 1 ve port 2'nin konumları yukarıda verilen şekilde gösterilmektedir. (Şekil 5.5) Anten ile kullanılacak olan bir metamatzenin, hem iletim ve yansıma parametrelerinin antenin frekans bandında bulunması hem de antenin çalışma frekans bandı arasında ϵ ve μ değerlerinin negatif değer alması gerekmektedir.



Şekil 5.5. S-SRR için birim hücre iletim (S_{21}) ve yansıma (S_{11}) genlikleri

S-SRR birim hücresinin yapılan anten çalışmasında kullanılabilmesi için antenin çalıştığı frekans bandında ϵ ve μ değerlerinin negatif olması gerekmektedir. Aşağıda verilen grafikte (Şekil 5.6) tasarlanan hücrenin hangi frekans aralıklarında metamatzeme özelliği sergilediğini göstermektedir. μ değeri 5.75 GHz ile 6.08 GHz aralığında negatif değer alırken ϵ değeri 5.75 GHz den başlayarak yaklaşık 9 GHz'e kadar negatif olduğu grafikte görülmektedir. Her iki parametrenin de negatif değer aldığı bant aralığı 5.75-6.08 GHz aralığıdır. Tasarlanan S-SRR hücresi bu aralıkta metamatzeme özellik gösterdiği ve bu

aralığın antenin çalışma frekans aralığını da kapsıyor olması S-SRR hücresinin anten tasarımına metamatlze olarak entegre edilmeye uygun olduğunu göstermektedir.



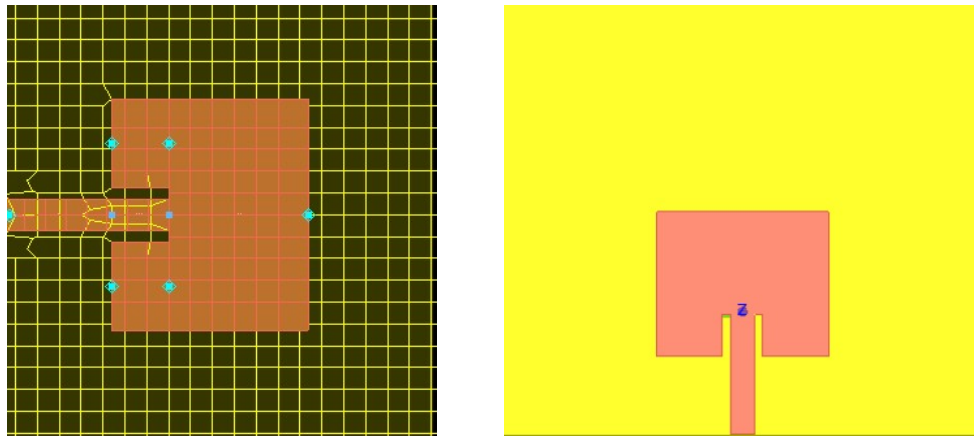
Şekil 5.6. S-SRR için ϵ ve μ grafiği

5.3. Metamatlze Anten Tasarımları

Tasarlanan S-SRR hücresi için, zemin yüzeyinde boşluk şeklinde periyodik olarak yerleştirilerek ve S-SRR hücreleri metal yüzey olup zemin yüzeyinin kalanı boşluk olmak üzere, S-SRR hücreleri konumlarının farklı kombinasyonları ile toplamda 15 adet tasarlanan antenler aşağıda verilmiştir Tez çalışması çerçevesi içinde tasarlanan antenler arasında ideal olmayan parametrelere sahip antenler de bulunmaktadır. Aşağıda verilen antenlerin grafiklerinin her biri sonuçlarına göre yorumlanmış olup yapılan tasarımlardan en iyi sonuçların elde edildiği antenler Anten 12, Anten 13, Anten 14 Anten 15 ve Anten 16 modelleri olduğu görülmüştür.

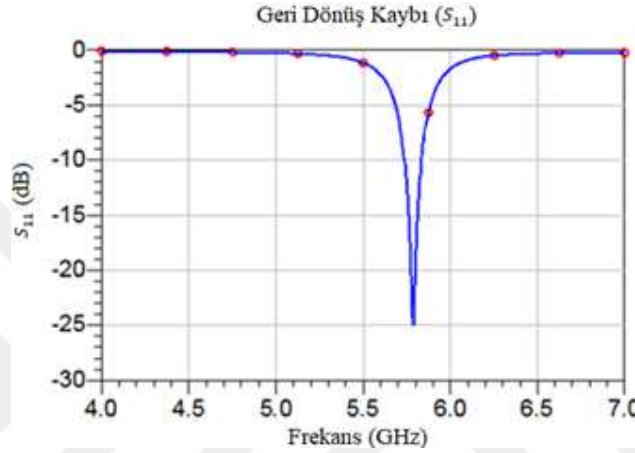
5.3.1 Anten 1’den Anten 16 ya kadar S_{11} Parametreleri

5.3.1.1 Anten 1 S_{11} Parametreleri



Şekil 5.7. Anten 1’in ADS programında görünümü

Anten tasarım adımlarından yola çıkılarak merkez çalışma frekansı 5.8 GHz olan mikroşerit yama antenin (Anten 1) ADS programındaki görüntüsü yukarıda Şekil 5.7 de gösterilmektedir. Anten 1'in S_{11} parametreleri aşağıdaki grafikte görülmekte olup (Şekil 5.8) 5.8 GHz de görüntülenen geri dönüş kaybı 24.328 dB olarak gözlemlenmiştir. Özellikle dikdörtgen yamalı antenler dar bantlı antenlerdir. Bu tasarımdaki antenin bant genişliği Denklem 2 ile %1.6 olarak hesaplanmıştır.

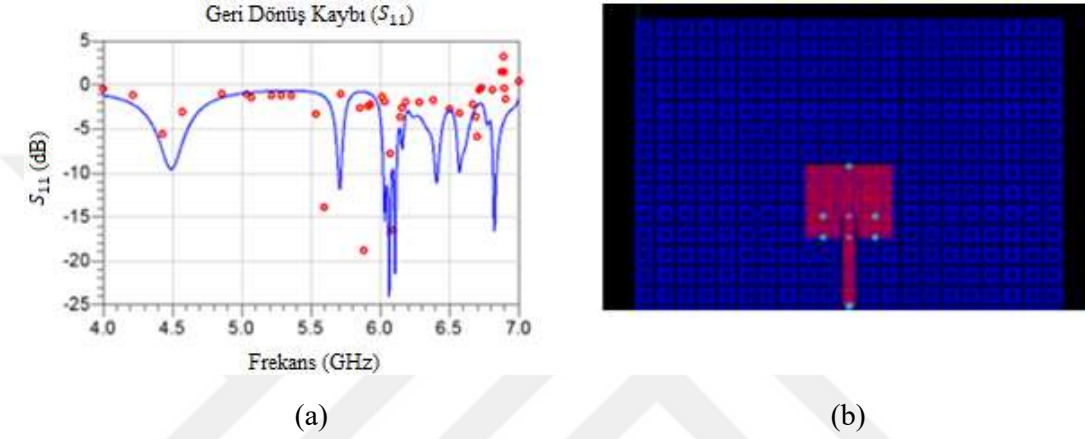


Şekil 5.8. Anten 1: Antenin S_{11} grafiği

Yapılan tasarımlarda ve optimizasyonlarında zemin plakasına yerleştirilen S-SRR hücrelerinin boyutlarıyla oynanmamıştır. Yapılan literatür araştırmasında metamalzeme hücresi için ideal boyutların çalışma frekansına ait dalga boyunun 1/10 undan daha küçük tercih edildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple tasarlanan metamalzeme hücreleri çok küçük olmakla beraber boyutlarındaki en ufak değişikliğin, hücrenin metamalzeme özelliği gösterdiği frekans aralığını ciddi düzeyde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Antenlerle yapılan çalışmalarda seçilen metamalzemelerin, antenin çalışma frekans aralığında metamalzeme özelliği göstermesi (ϵ ve μ değeri sıfırdan küçük olmalıdır) gerekmektedir. Önceki yapılan çalışmalarda tasarım optimizasyonu yapılırken metamalzeme desenlerinin boyutlarına yapılan müdahaleler sonrasında kullanılan desenlerin hala metamalzeme olup olmadığı tartışma konusudur. Bu sebep ile bu çalışmada tasarımların hiçbir aşamasında metamalzeme hücrelerinin boyutlarına müdahalede bulunulmamıştır. Yapılan simülasyonlarda değiştirilen parametreler; metamalzeme hücreler arasındaki mesafe, antenin alttaş (substrate) üzerindeki pozisyonu, besleme hattı uzunluğu, hücrelerin dizilimi, hücre şeklinde zemin plakasında boşluklar oluşturulması ve son aşama olarak zemin plakasında hücrelerin kendisi dışında boşluklar oluşturulması ile farklı tasarım kombinasyonları elde edilmiştir.

5.3.1.2 Anten 2 S_{11} Parametreleri

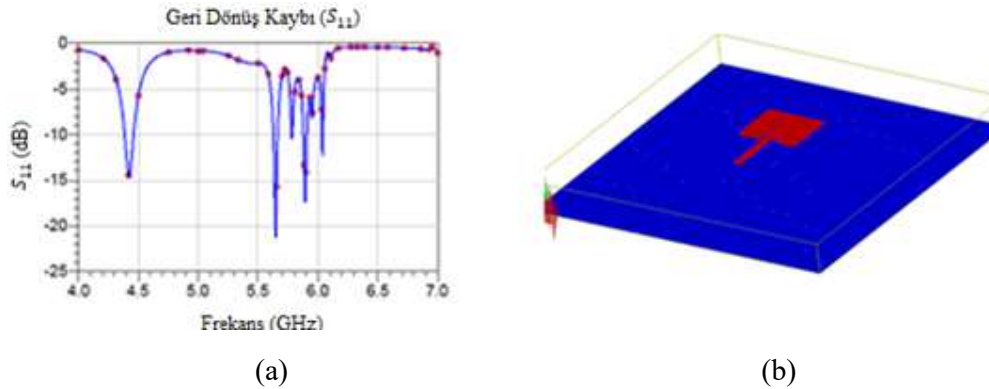
Aşağıda Şekil 5.9 da S-SRR hücreleri arası mesafe 2.5 mm belirlenmiş ve Anten 2 ile ilgili yapılan tasarımların ADS programında elde edilen S_{11} parametre grafiklerine yer verilmiştir. S_{11} grafiğinde -10 dB nin altında kalan frekanslar 5.7 GHz, 6.08 GHz, 6.4 GHz ve 6.82 GHz frekanslarında olmasına karşın geri dönüş kaybı ve bant genişliği 6.08 GHz frekansı dışında oldukça düşüktür.



Şekil 5.9. Anten 2: Antenin S_{11} grafiği (a) ve tasarımın ADS programında görüntüsü (b)

5.3.1.3 Anten 3 S_{11} Parametreleri

Anten 2 için yapılan tasarımda anten yaması konumu alttaşın tam ortasına getirilerek ve S-SRR hücreleri arası mesafe 2.5 mm değerinden 1.755 mm değerine düşürülerek S_{11} parametrelerinde gerçekleşen değişimler Şekil 5.10 da gösterilmiştir.

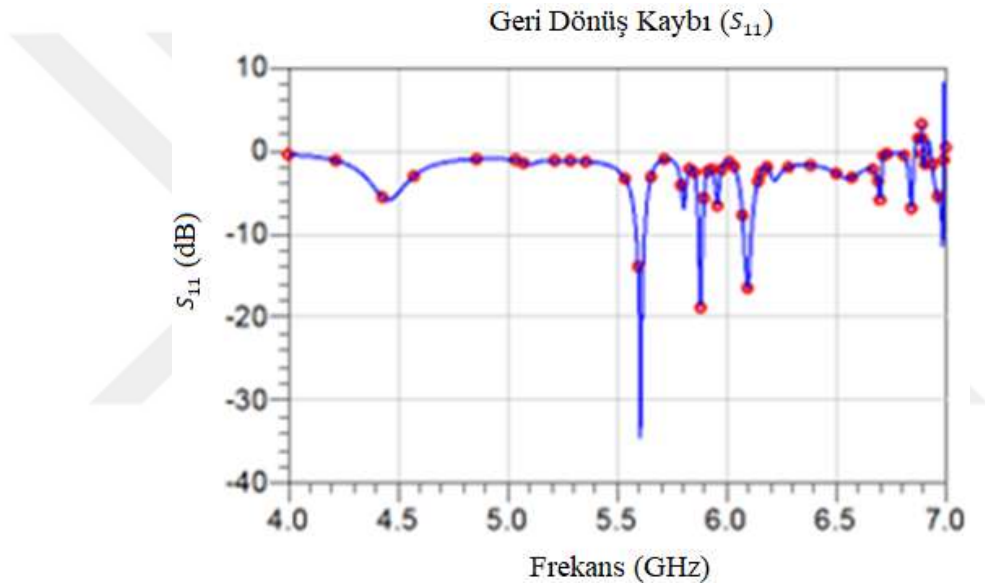


Şekil 5.10. Anten 3: Antenin S_{11} grafiği (a) ve tasarımın ADS programında görüntüsü (b)

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 kıyaslandığında DGS zemin kullanıldığında antenin S_{11} parametrelerinde birden fazla düşüşe (curve) sebep olduğu görülmektedir. S-SRR hücreleri arasındaki mesafenin azaltılması söz konusu düşüşlerin birbirine yaklaşmasına sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir.

5.3.1.4 Anten 4 S_{11} Parametreleri

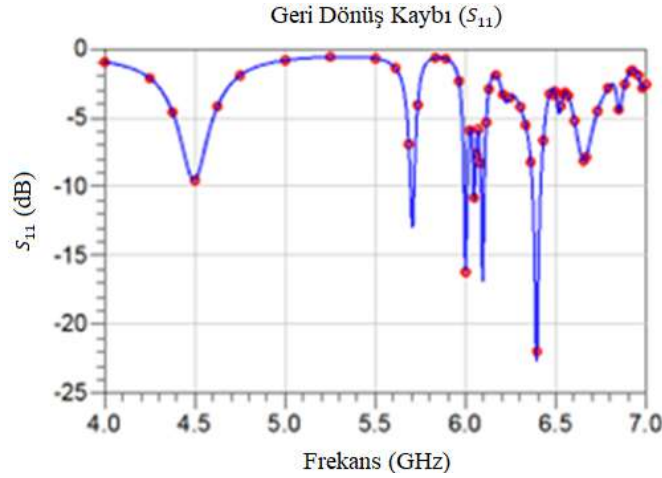
Anten 4 için Anten 3 tasarımındaki yama konumu sabit tutularak S-SRR Hücreleri arası mesafe 1.755 mm değerinden 2 mm değerine yükseltilerek S_{11} parametreleri üzerine etkisi Şekil 5.11 de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Anten 4: Antenin S_{11} grafiği

5.3.1.5 Anten 5 S_{11} Parametreleri

Son olarak anten yaması konumu sabit tutularak S-SRR hücrelerinin arasındaki mesafenin Antenin S_{11} parametrelerine olan etkisini incelemek üzere Anten 4 tasarımındaki S-SRR hücreleri arası mesafe 2 mm'den 1.6 mm değerine düşürülmüş ve S_{11} parametrelerine olan etkisi Şekil 5.13 ile gösterilmiştir.

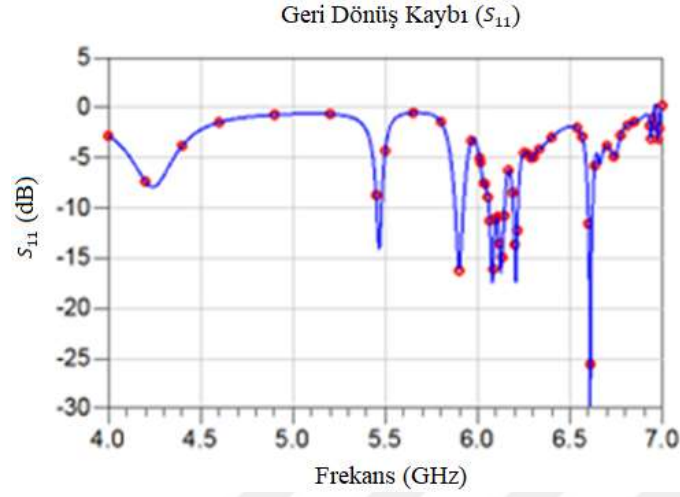


Şekil 5.12. Anten 5: Antenin S_{11} grafiği

S-SRR Hücreleri arası mesafe azaltılırken bazı düşüşlerin birbirleri ile birleştiği gözlemlenmiştir. Bu grafiklerde görülen geri dönüş kaybı metamalzemesiz antende 24.308 dB iken antenin konumu sabit tutulup S-SRR hücreleri arası mesafe daraltıldığında bu değerin 20 db ile 25 dB aralığından 30 ile 40 dB aralığına geldiği gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi olarak antenin altında konumlanan S-SRR hücrelerinin mesafeye bağlı pozisyonlarının değişmesi, patch altında yer alan hücre sayısının artması ve gömme beslemeli hat ile yama arasında bulunan boşlukların S-SRR hücrelerine göre konumlarının değişmesine bağlıdır.

5.3.1.6 Anten 6 S_{11} Parametreleri

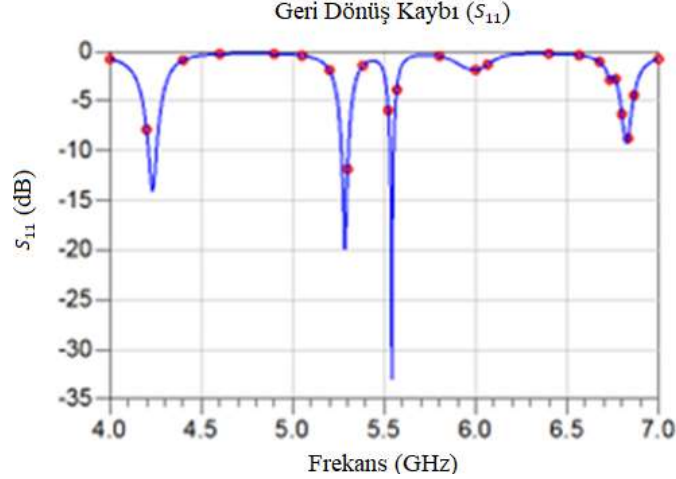
Aşağıda Anten 6 ve Anten 7 ile ilgili yer alan grafiklerde ise S-SRR hücreleri arası sabit tutulup bu değer 1mm alınmıştır. Yama antenin konumu değiştirilerek elde edilen değerler incelendiğinde metamalzeme mesafesi değişmediği halde sadece yama konumlandırılmasının da çalışma frekansları sayısını değiştirdiği ve geri dönüş kaybı değerleri üzerinde etkisinin de oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.13 de Anten 6'ya ait geri dönüş kaybı grafiği antenin besleme hattı ucu toprak yüzeyinin sınırına dayandırılmış iken elde edilmiştir.



Şekil 5.13. Anten 6: Antenin S_{11} grafiği

5.3.1.7 Anten 7 S_{11} Parametreleri

Anten 6 için yapılan tasarımda anten yaması zemin yüzeyinin tam ortasında olacak şekilde konumlandırıldığında elde edilen S_{11} parametreleri Şekil 5.14 de gösterilmiştir.



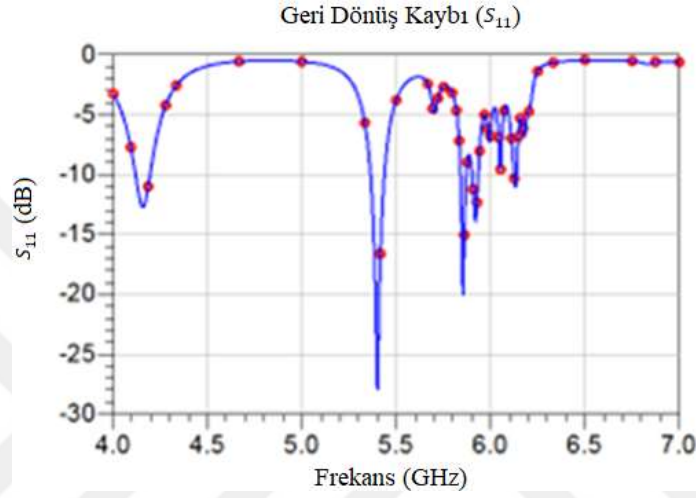
Şekil 5.14. Anten 7: Antenin S_{11} grafiği

5.3.1.8 Anten 8 S_{11} Parametreleri

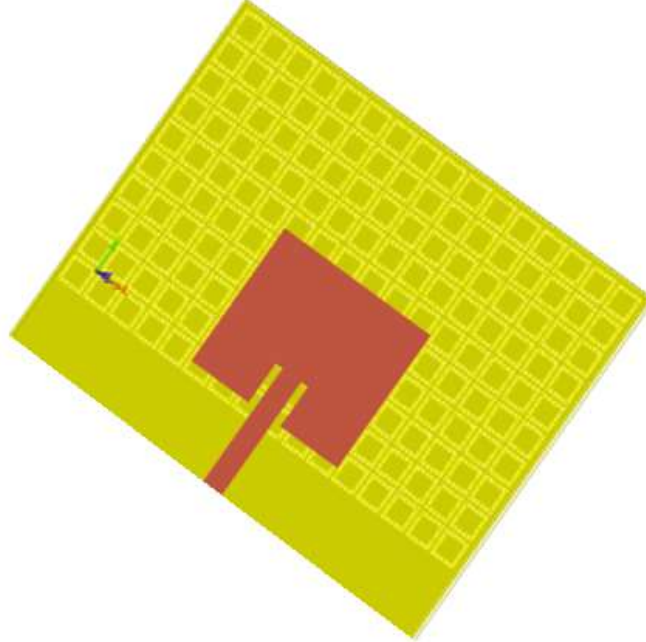
Aşağıda Şekil 5.15 de Anten 8 ile ilgili olarak yer alan tasarımlarda ise S-SRR hücreleri arası mesafe 1.405 mm belirlenmiş ve besleme hattının altında kalan zemin yüzeyi kusursuz

olarak bırakılmıştır. Besleme hattının altında kalan zemin yüzeyi aşındırılmadan bırakılarak giriş enerjisinin iletim tutarlılığını korumak amaçlanmıştır [34].

Tüm zemin yüzeyi S-SRR hücreleri ile kusurlu hale getirilmiş tasarımların S_{11} grafiği sonuçlarıyla kıyaslandığında çalışma frekanslarının birbirleri ile birleşecek düzeyde yakınlaştığı görülmüştür.



(a)

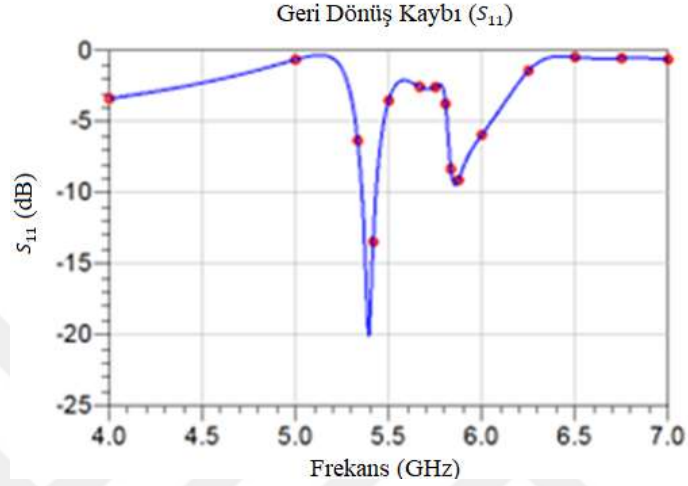


(b)

Şekil 5.15. Anten 8: Antenin S_{11} grafiği (a) ve ADS ortamında görüntüsü (b)

5.3.1.9 Anten 9 S_{11} Parametreleri

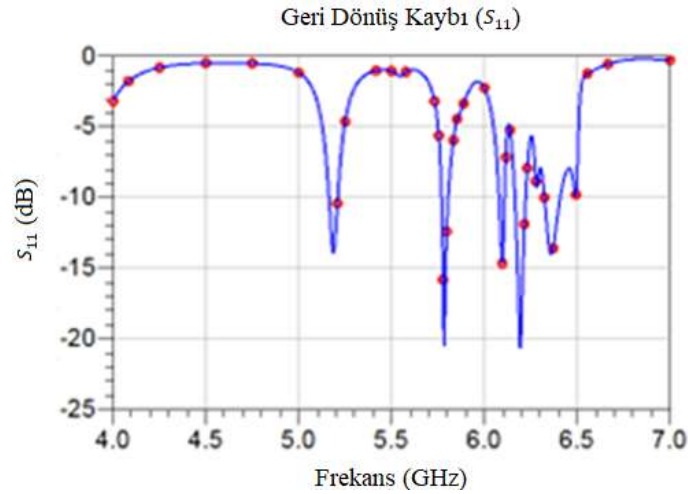
Anten 8 tasarımında sadece S-SRR hücreleri arasındaki mesafe 1.405 mm'den 0.855 mm'ye düşürülmüş ve buna bağlı olarak elde edilen S_{11} parametreleri Şekil 5.16 da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Anten 9: Antenin S_{11} grafiği

5.3.1.10 Anten 10 S_{11} Parametreleri

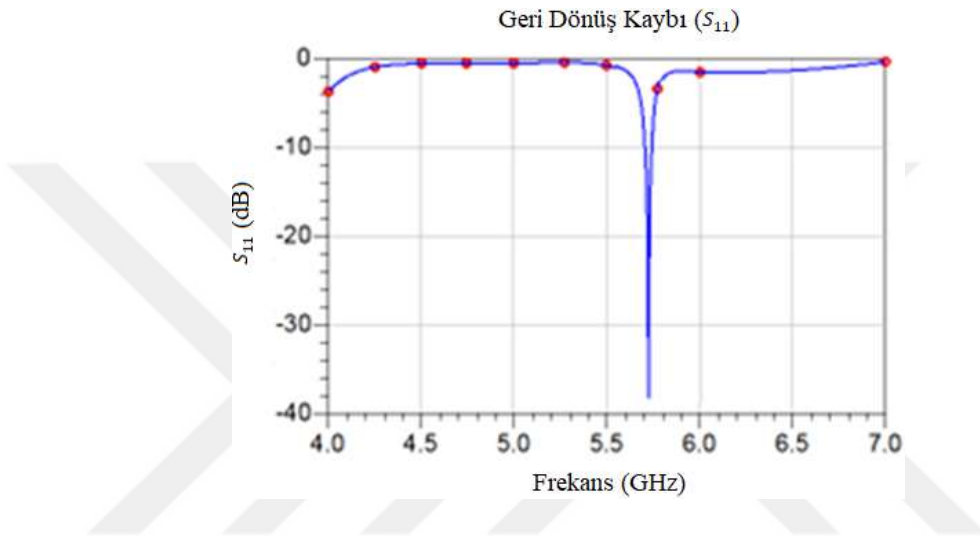
Besleme hattı kusursuz olarak yapılan tasarımlarda son olarak S-SRR hücreleri arası mesafe 0.855 mm değerinden 0.355 değerine düşürülmüş ve elde edilen S_{11} grafiği Şekil 5.17 de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Anten 10: Antenin S_{11} grafiği

Şek.5.17 de S_{11} parametreleri gösterilen Anten 10 için S-SRR hücreleri arası mesafe 0.355 mm belirlenmiştir. Antenin besleme hattının altında kalan zemin yüzeyi kusursuz iken zemin yüzeyinin tamamı kusurlu hale getirilmiş durumuna göre daha verimli bir şekilde birleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum ilk başta optimizasyon ile bu düşüşleri birleştirerek bant aralığının iyileştirilebileceğini düşündürmüştür.

5.3.1.11 Anten 11 S_{11} Parametreleri

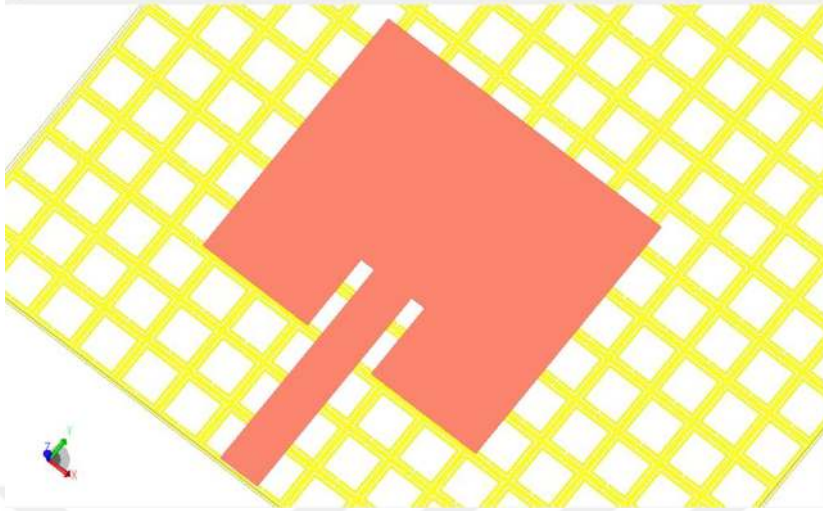


Şekil 5.18. Anten 11 için S_{11} grafiği

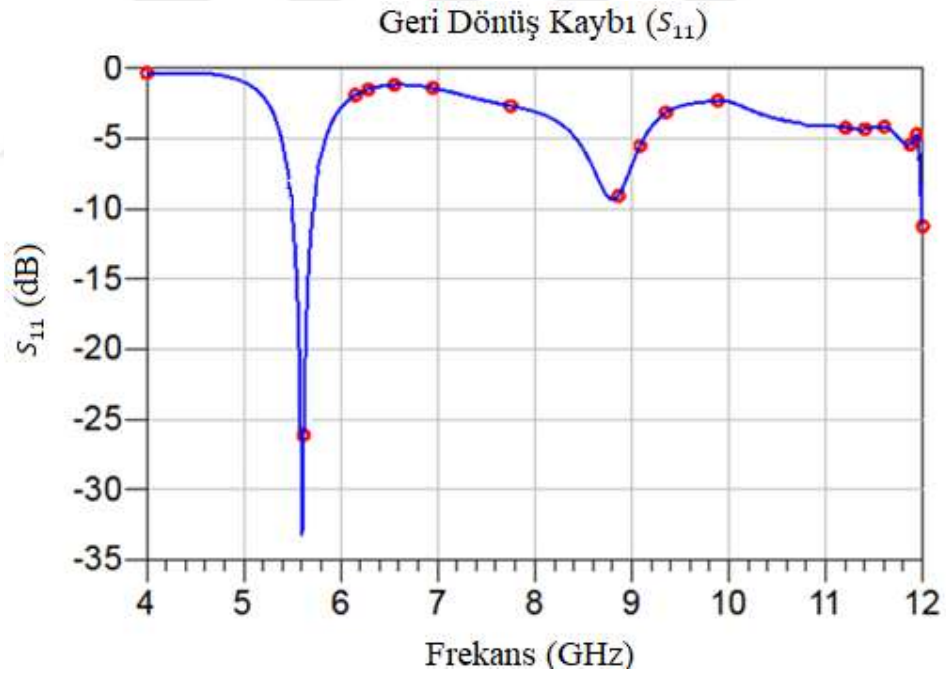
Yukarıda Şekil 5.18 de S_{11} parametreleri gösterilen tasarımda ise besleme hattı altında kalan toprak yüzeyi kusursuz bırakılmış, S-SRR Hücreleri arası mesafe 0.405 mm tercih edilmişken, besleme hattı uzunluğu 9.38 den 12.3 mm ye artırılmış ve antenin yama boyutlarında optimizasyon ile küçülmeye gidilerek 5.8 GHz çalışma frekansına oldukça yakın bir merkez frekansı olan boyutları daha küçük ve geri dönüş kaybı 39 dB olan bir anten elde edilse de antenin bant genişliği oldukça daraldığı için tasarımların farklı varyasyonları üzerine çalışmalara devam edilmiştir.

5.3.1.12 Anten 12 S_{11} Parametreleri

Anıl Pandey'in kitabında yer alan [3] DGS örneğinde bir EBG deseni zeminde boşluk olarak bırakılması yerine bakır olan bölge olarak desenlerin kendisi seçilmiştir. Bu örnekten esinlenilerek tez çalışmasında hem yanyana (Şekil 5.19) ve S-SRR hücreleri arası mesafe 0 mm belirlenerek ground düzleminde metal olarak sadece S-SRR hücreleri olacak şekilde Anten 12 tasarımı gerçekleştirilmiş ve orijinal antenin parametreleri üzerine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Anten 12: Antenin ADS ortamındaki görüntüsü

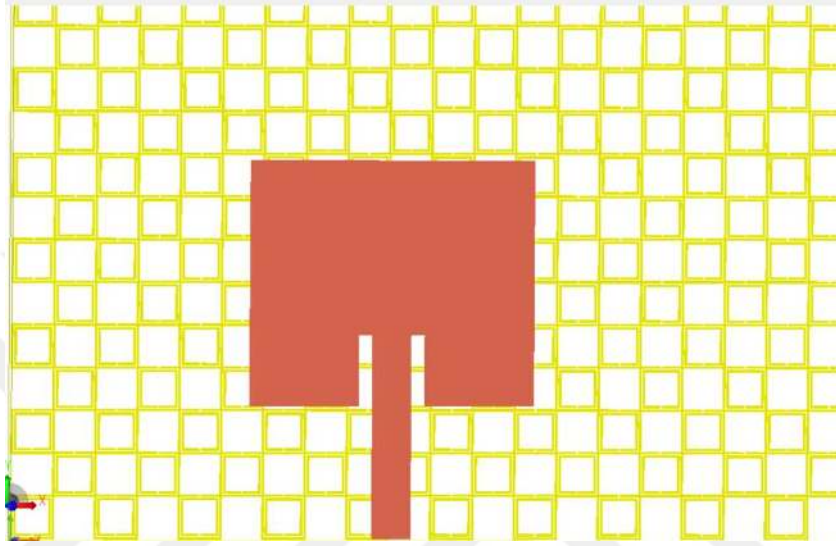


Şekil 5.20. Anten 12: Antenin S_{11} grafiği

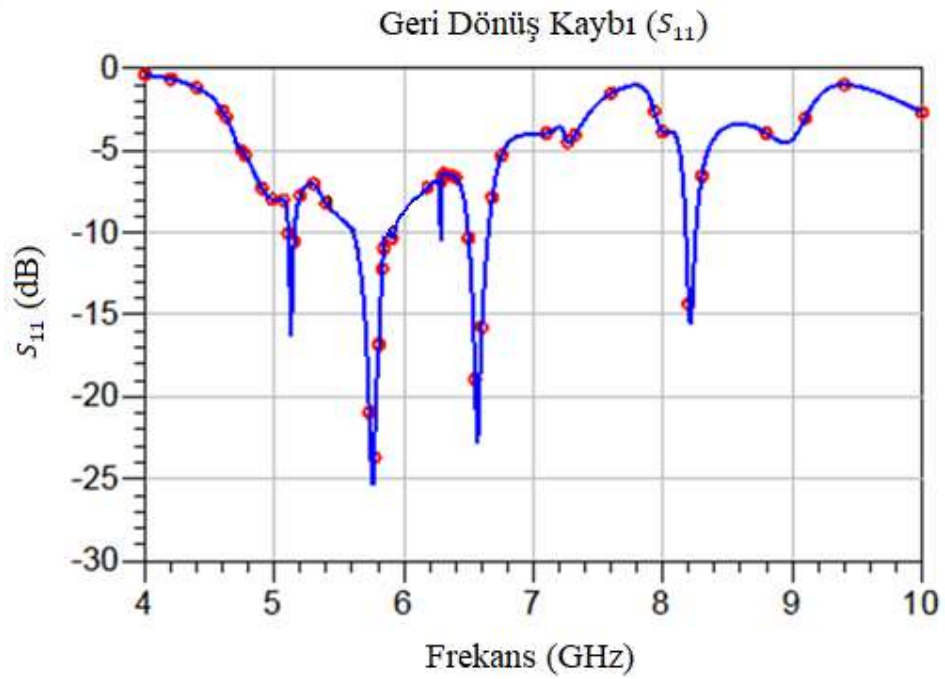
Anten 12 için merkez frekansı 5.6 GHz değerine düşerek, bant genişliği Anten 1 ile aynı %1.6 değerinde bulunmuş ve geri dönüş kaybı 24.328 dB değerinden 33 dB değerine yükseldiği gözlemlenmiştir.

5.3.1.13 Anten 13 S_{11} Parametreleri

S-SRR hücrelerinin aralarında boşluklar bırakarak oluşturulmuş zemin yüzeyi için anten pozisyonunun etkisi Anten 13, Anten 14, Anten 15 ve Anten 16 tasarımlarında incelenmiştir.



(a)



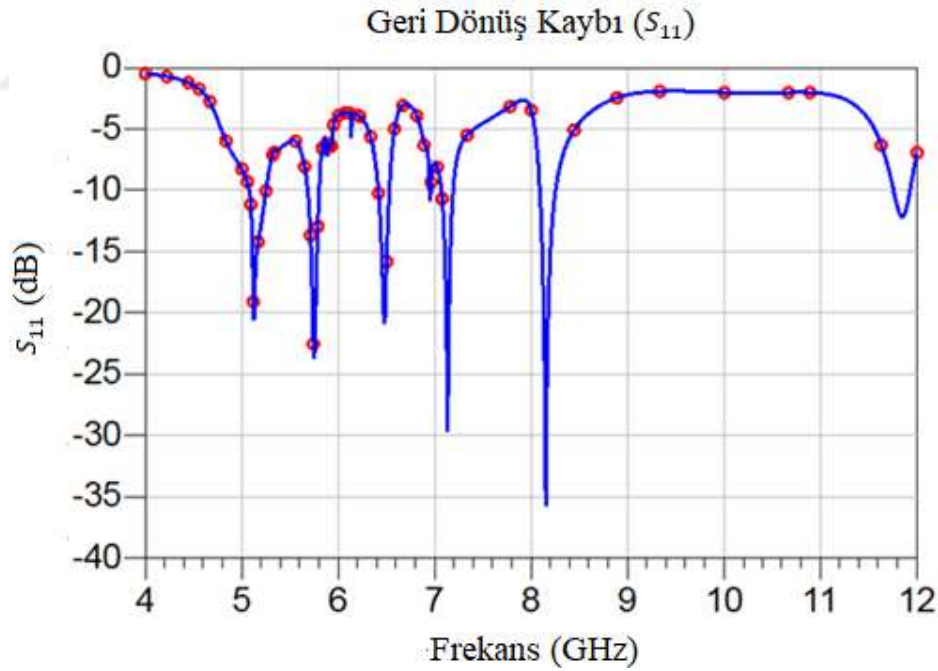
(b)

Şekil 5.21. Anten 13: Antenin ADS programında görüntüsü (a) ve S_{11} grafiği (b)

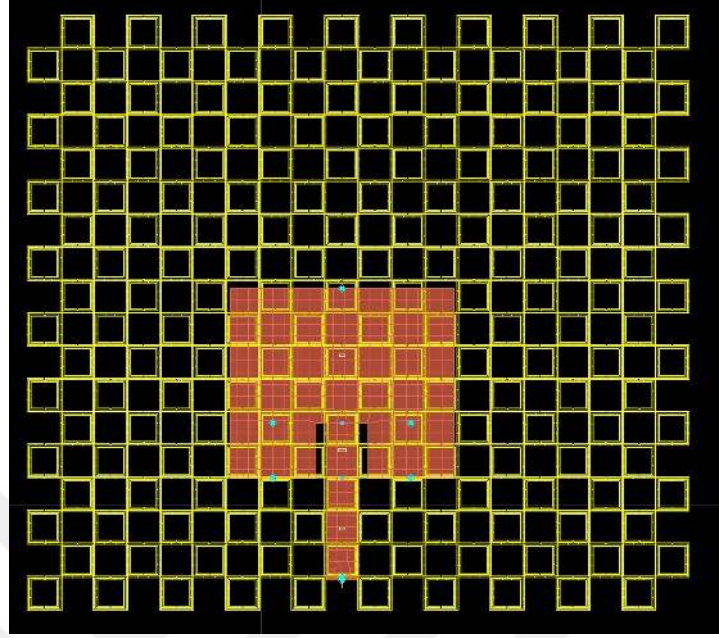
Anten 13 tasarımı için geri dönüş kaybında önemli ölçüde bir fark oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bant genişliği Anten 1 tasarımında %1.6 iken Anten 13 için 5.75 GHz merkez frekansında %4.4 değerine yükseldiği hesaplanmıştır. Geri dönüş kaybı 5.75 GHz merkez çalışma frekansında 25 dB geri dönüş kaybı değeri haricinde 5.13 GHz, 6.575 GHz ve 8.225 GHz merkez frekanslarında sırasıyla 15.625 dB, 22.1 dB ve 14.438 dB olmak üzere toplamda 4 ayrı frekans bandında çalışarak çok bantlı anten gibi faaliyet gösterdiği gözlemlenmiştir.

5.3.1.14 Anten 14 S_{11} Parametreleri

Anten 13 için yapılan tasarımda antenin pozisyonu 1.5 mm sağ yöne ötelenerek elde edilen Anten 14 için (Şekil 5.22) S_{11} parametrelerindeki değişim aşağıdaki grafikte verilmiştir (Şekil 5.23). Anten 14 tasarımının 5.12 GHz, 5.75 GHz, 6.48 GHz, 7.13 GHz ve 8.15 GHz frekanslarında sırasıyla 20.18 dB, 23.52 dB, 20.17 dB, 29.73 dB ve 35.80 dB geri dönüş kaybına sahip olarak toplamda 5 farklı frekans bandında çalışarak çok bantlı anten özelliğini koruduğu gözlemlenmiştir.



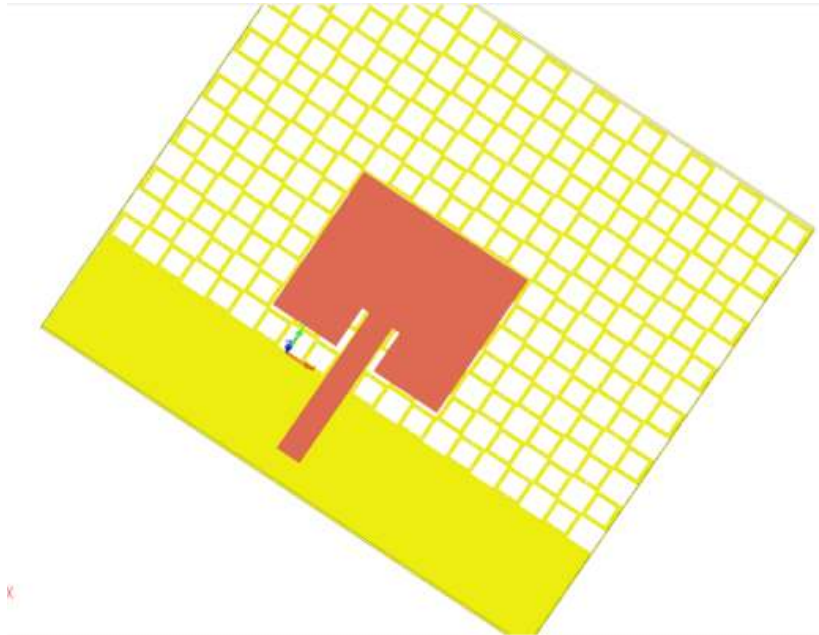
Şekil 5.22. Anten 14: S_{11} grafiği



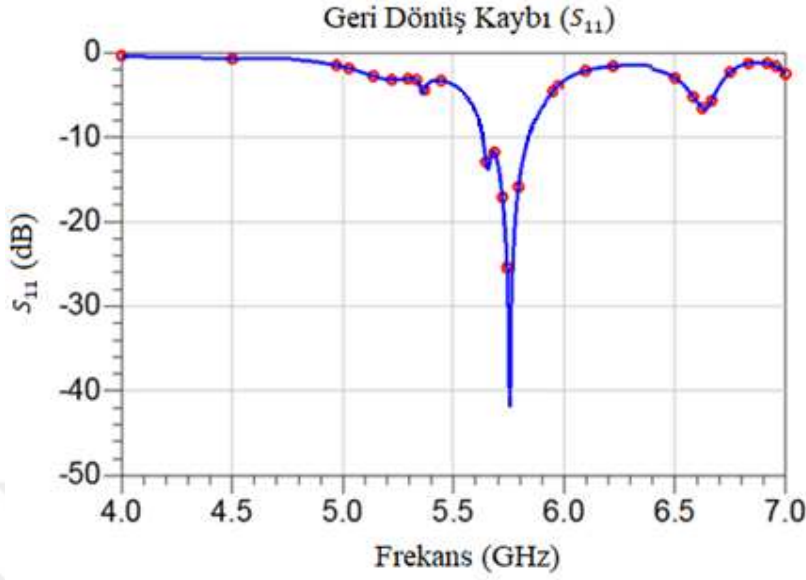
Şekil 5.23. Anten 14: ADS ortamında antenin görüntüsü

5.4.1.15 Anten 15 S_{11} Parametreleri

Besleme hattının altında kalan zemin yüzeyi kusursuz olan anten tasarımı aşağıda Şekil 5.24 de verilmiştir.



(a)



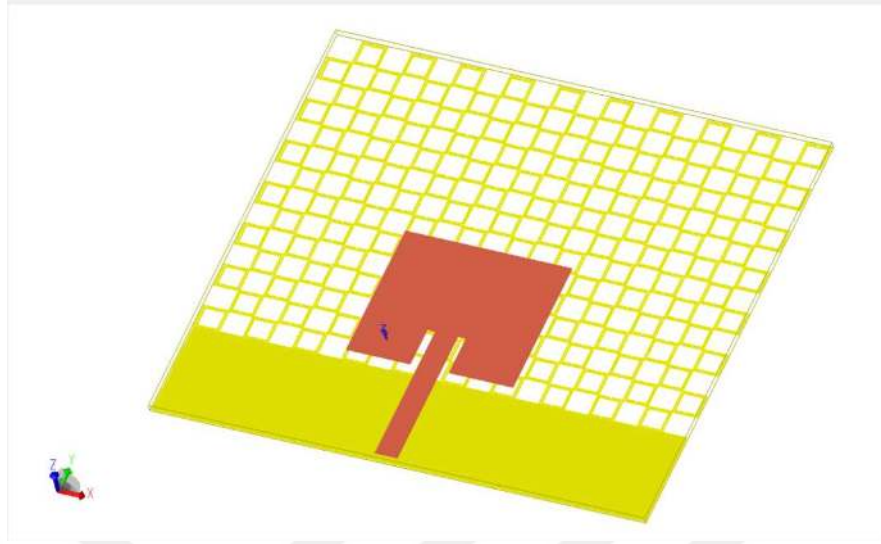
(b)

Şekil 5.24. Anten 15: Antenin ADS programında görüntüsü (a) ve S_{11} grafiği (b)

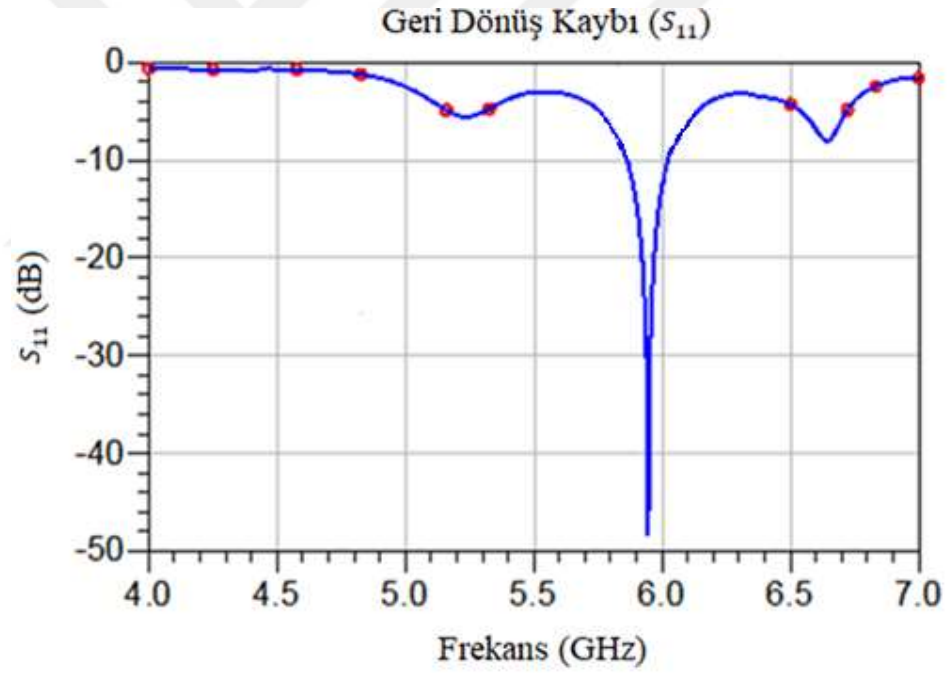
Anten 15 de besleme hattı uzunluğu Anten 1'e göre 9.38 mm değerinden 12.3 mm değerine yükseltilerek (Şekil 5.24) besleme hattı altında kalan zemin yüzeyi kusursuz bırakıldığında S_{11} parametrelerinde Anten 1'e kıyasla iyileşme gözlemlenmiştir. Antenin hem bant genişliği %1.6 dan %3.87 yükseldiği hem de geri dönüş kaybı 24.328 dB den 41.903 dB ye yükseldiği gözlemlenmiştir.

5.3.1.16 Anten 16 S_{11} Parametreleri

Anten 16, Anten 15'in yama pozisyonu 2.82 mm aşağıya kaydırılarak besleme hattı ucu zemin yüzeyinin sınırına dayandırılmış halidir. Anten 16 tasarımının Anten 1 tasarımına göre hem bant genişliği %1.6 dan %3.2 yükseldiği hem de geri dönüş kaybı 24.328 dB den 48.389 dB ye yükseldiği gözlemlenmiştir. (Şekil 5.25)



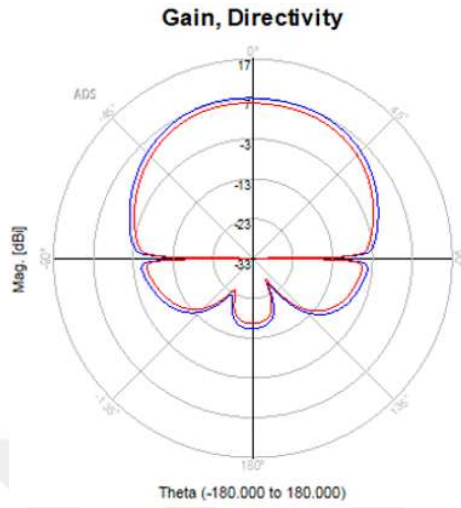
(a)



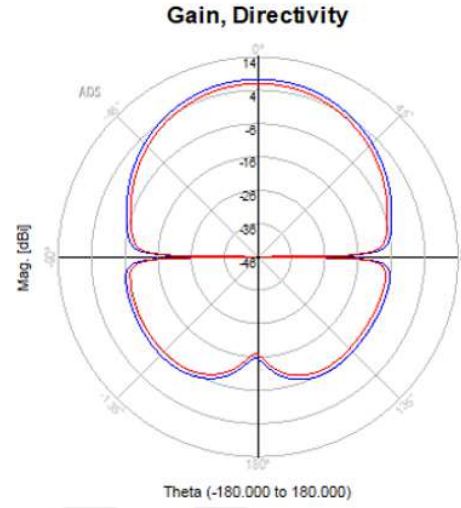
(b)

Şekil 5.25. Anten 16: Antenin ADS programında görüntüsü (a) ve S_{11} grafiği (b)

5.3.2 Kazanç Grafikleri



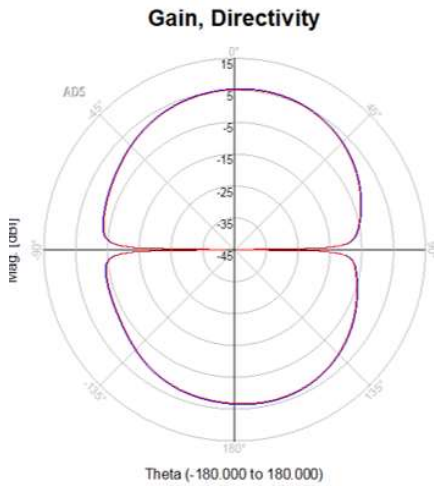
(a)



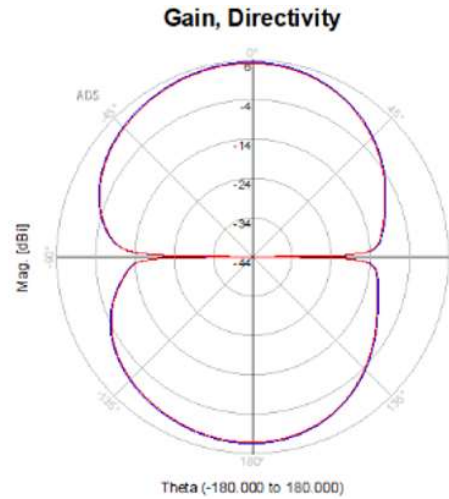
(b)

Şekil 5.26. Anten 1: 5.8 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$ (a)
 $\Phi=90$ (b)

Anten 1 için kazanç grafikleri yukarıda verilmiştir. Antenin 5.8 GHz'de geri dönüş kaybı 24.33 dB ve geri dönüş kazancı 6 dBi iken radyasyon verimliliği %74 olarak gözlemlenmiştir. Anten 13 birden fazla frekans bandında çalıştığı için her çalışma frekansında elde edilen kazanç grafikleri aşağıda gösterilmektedir.



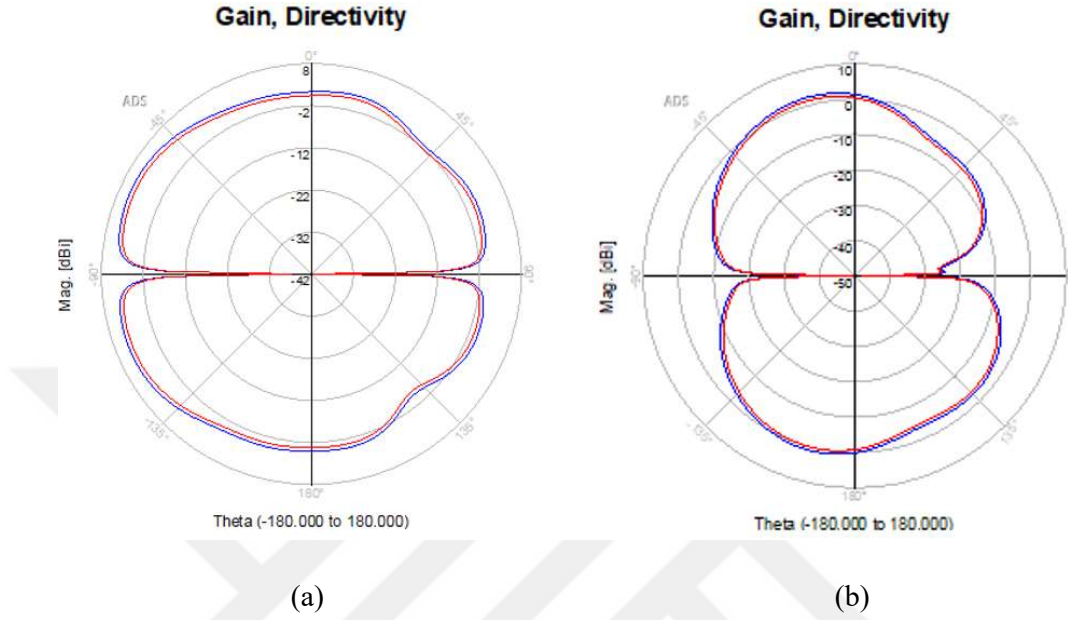
(a)



(b)

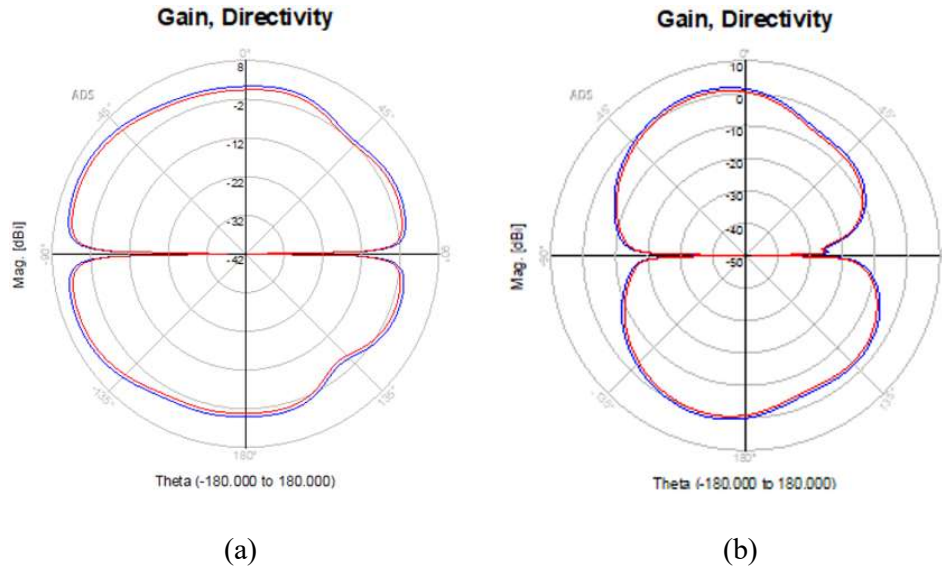
Şekil 5.27. Anten 13: 5.15 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$

(a) $\Phi=90$ (b)



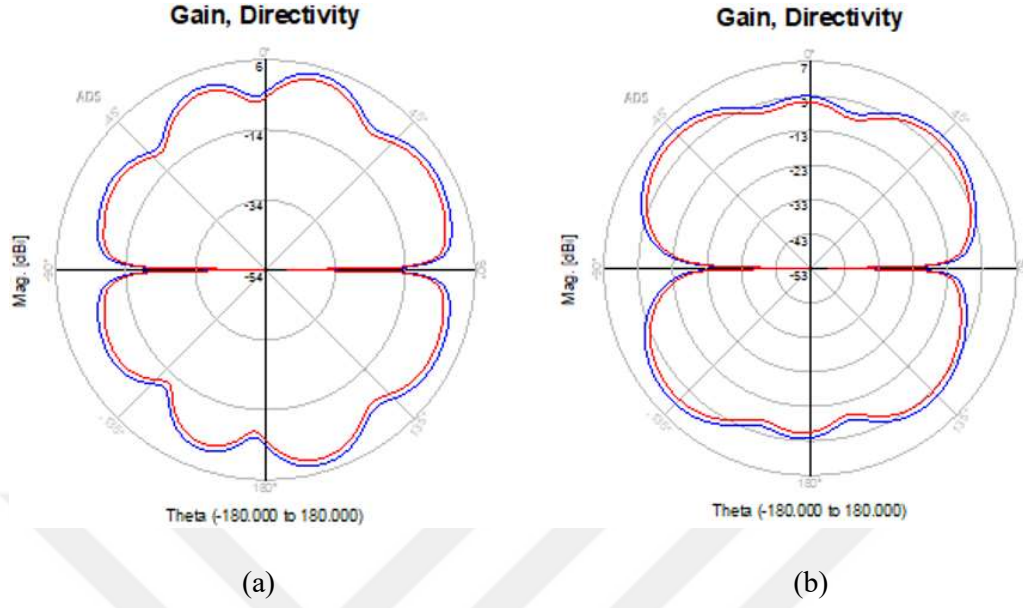
Şekil 5.28. Anten 13: 5.77 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$

(a) $\Phi=90$ (b)



Şekil 5.29. Anten 13: 6.6 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$ (a)

$\Phi=90$ (b)

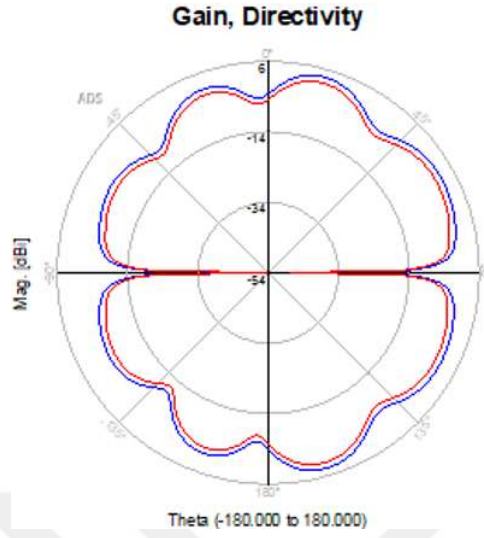


Şekil 5.30. Anten 13: 8.20 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0
(a) Phi=90 (b)

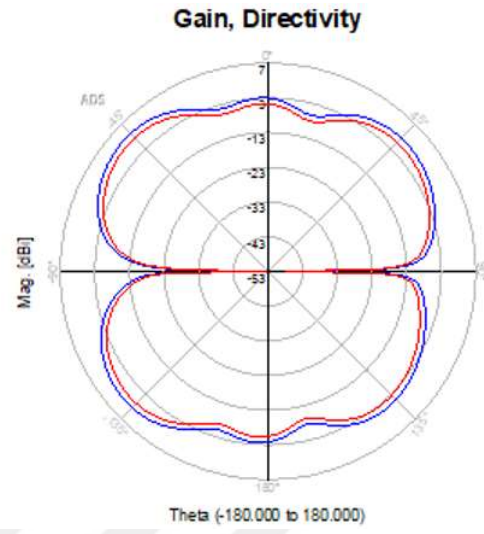
Tablo 5.3. Anten 13'ün çalışma frekanslarında elde edilen geri dönüş kaybı kazanç ve radyasyon verimliliği değerleri

Frekans (GHz)	Geri Dönüş Kaybı (dB)	Kazanç (dBi)	Radyasyon Verimliliği (%)
5.15	10.59	5.36	93.88
5.77	23.71	4.55	81.11
6.60	18.93	5.00	91.70
8.20	14.35	6.72	67.60

Kazanç grafikleri ve S_{11} parametre grafiğinden elde edilen değerler yukarıdaki tabloda verilmiştir. Kusursuz zemin yüzeyine sahip antenin 5.8 GHz frekansında elde edilen değerleriyle kıyaslandığında geri dönüş kaybı 24.32 dB iken 23.71 dB olarak gözlemlenmiş, kazanç 6 dBi değerinden 4.55 dBi değerine düşmüştür. Radyasyon verimliliği 5.8 GHz değerine oldukça yakın olan 5.77 değerinde kusursuz zemin zeminine sahip olan Anten 13'ün Anten 1'e göre %7.11 kadar artış gözlemlenmiştir. Bu tasarımda 5.8 GHz merkez frekansında kazanç ve geri dönüş kaybı Anten 1'e göre düşük olsa da antenin 4 farklı frekans bölgesinde çalışarak çok bantlı anten özelliği kazandığı gözlemlenmiştir.

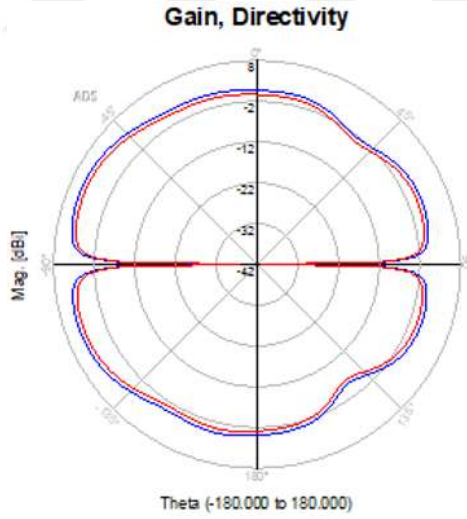


(a)

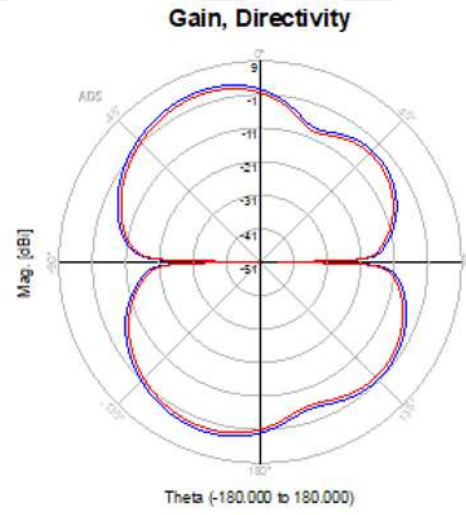


(b)

Şekil 5.31. Anten 14: 5.12 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$
(a) $\Phi=90$ (b)

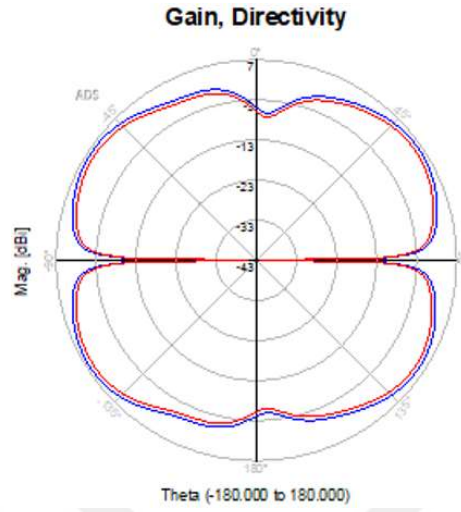


(a)

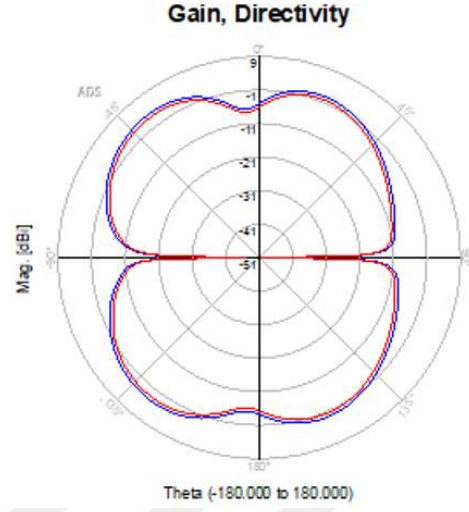


(b)

Şekil 5.32. Anten 14: 5.75 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$
(a) $\Phi=90$ (b)

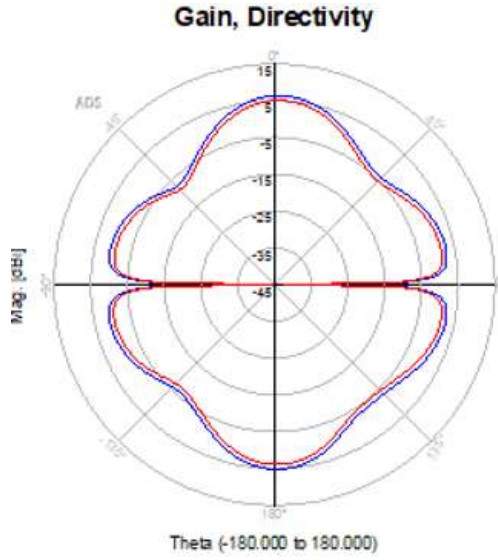


(a)

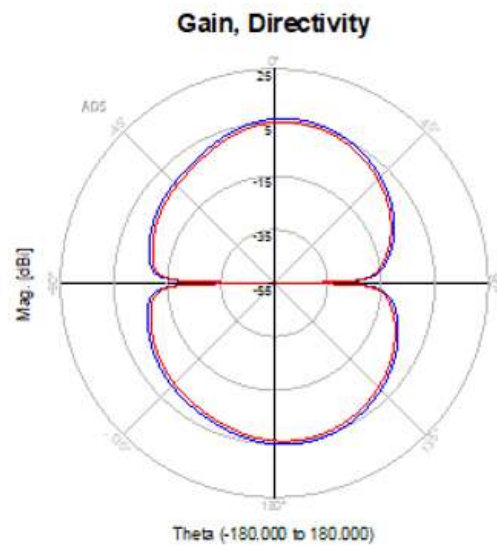


(b)

Şekil 5.33. Anten 14: 6.48 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$
(a) $\Phi=90$ (b)

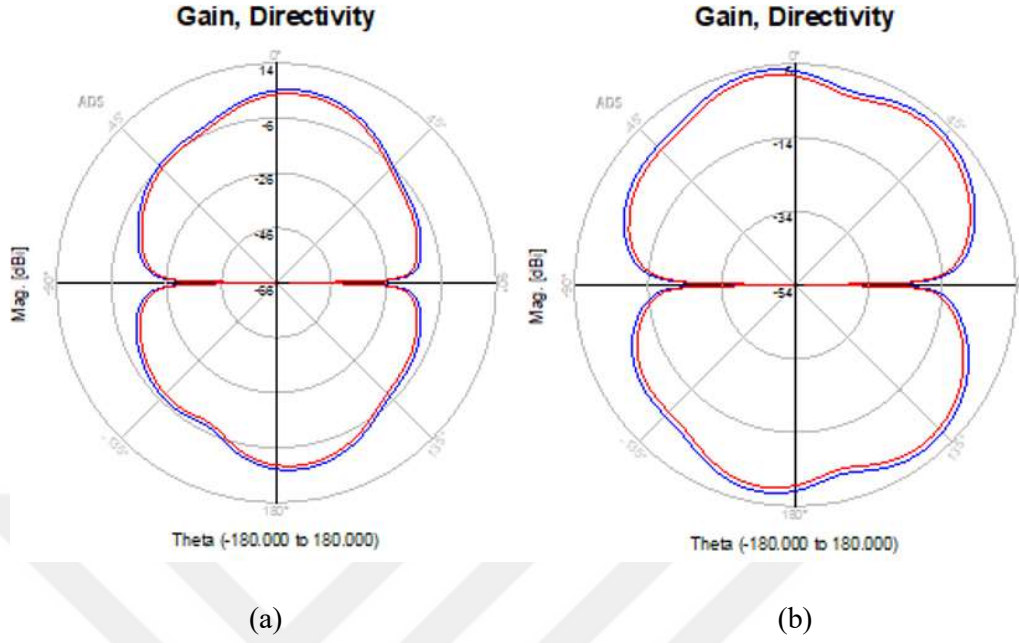


(a)



(b)

Şekil 5.34. Anten 14: 7.13 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$
(a) $\Phi=90$ (b)



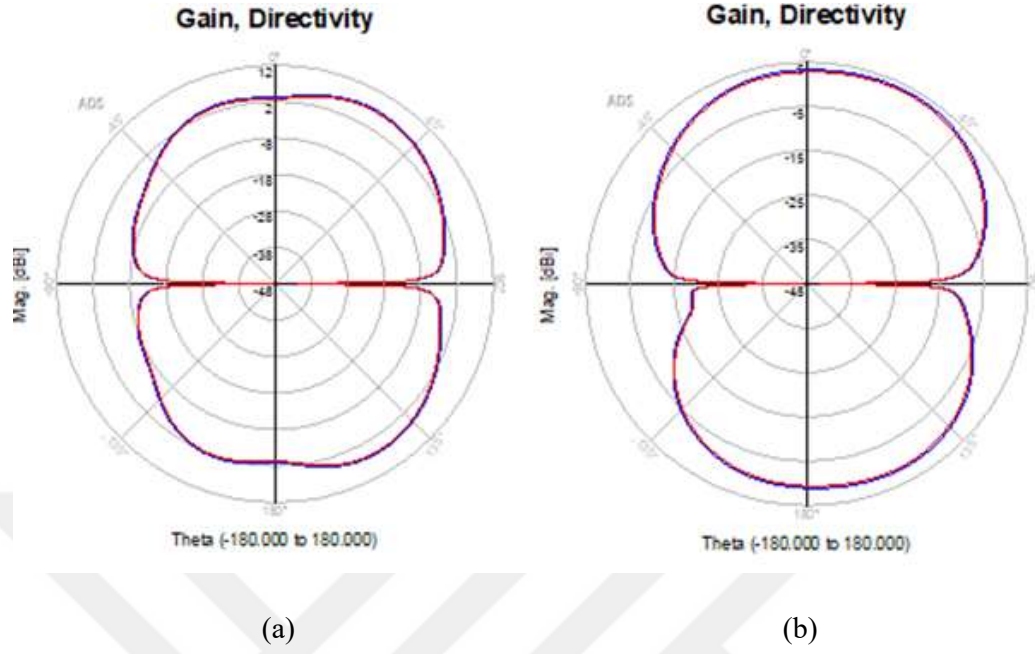
Şekil 5.35. Anten 14: 8.15 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi Phi=0
(a) Phi=90 (b)

Anten 14 için elde edilen kazanç grafiklerinden ve S_{11} parametre grafiğinden elde edilen değerler aşağıdaki tabloda toplanmıştır.

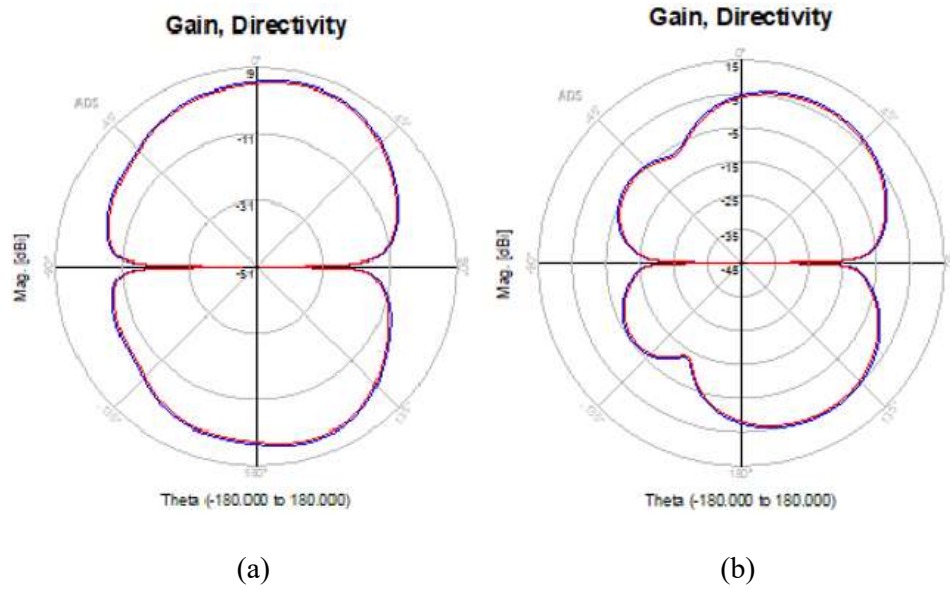
Tablo 5.4. Anten 14'ün çalışma frekanslarında elde edilen geri dönüş kaybı kazanç ve radyasyon verimliliği değerleri

Frekans (GHz)	Geri Dönüş Kaybı(dB)	Kazanç(dBi)	Radyasyon Verimliliği (%)
5.12	20.18	6.32	87.2
5.75	23.52	4.00	78.6
6.48	20.17	5.50	79.5
7.13	29.73	5.40	74.4
8.15	35.80	4.90	71.8

Anten 14 için elde edilen antenin, Anten 13 ile kıyaslaması yapıldığında Anten 14'e bir frekans bandı daha eklenerek beş farklı frekans bandında çalıştığı görülmüştür. Geri dönüş kaybı bir önceki tasarıma göre daha yüksektir ki bu anten tasarımında tercih edilen bir durumdur. Geri dönüş kaybının yüksek olması antenin ne kadar iyi eşleştiğini temsil eder.



Şekil 5.36. Anten 15: 5.75 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$
(a) $\Phi=90$ (b)



Şekil 5.37. Anten 16: 5.93 GHz'de kutupsal koordinat sisteminde kazanç gösterimi $\Phi=0$
(a) $\Phi=90$ (b)

Anten 15 için kazanç, Anten 1'e göre 5.75 GHz merkez frekansında 0.6 dBi artarak 6.6 dBi değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Radyasyon verimliliği %74 değerinden %90.2 değerine ulaşmıştır. Bu tasarım için elde edilen kazanç grafiği Şekil 5.36. da gösterilmektedir.

Anten 16 için merkez frekansı 5.93 GHz için geri dönüş kaybının 48.39 dB değerine kadar ulaştığı, metamalzemesiz antene göre kazancının 0.84 dBi artarak 6.84 dBi olduğu ve radyasyon verimliliğinin %74 değerinden %86.84 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir ve ilgili grafik Şekil 5.37. de gösterilmektedir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Yapılan çalışmada tekil mikroşerit yama antenin zemin yüzeyi, antenin çalışma frekansı aralığında metamalzeme özelliği gösteren S-SRR hücreleri kullanılarak kusurlu zemin yüzeyi elde edilmiştir. Çalışmada yapılan tasarımlarda S-SRR hücreleri arasındaki mesafe, S-SRR hücrelerinin zemin yüzeyine konumlandırma şekli, besleme hattının uzunluğu, besleme hattının altında kalan zemin yüzeyine S-SRR hücresi konumlandırılması, besleme hattının altında kalan zemin yüzeyine alana S-SRR hücreleri konumlandırılmaması, zemin yüzeyinde S-SRR hücreleri şeklinde boşluklar oluşturulması ve tam tersi olarak S-SRR hücreleri harici zemin yüzeyini boş bırakılmasının anten parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir. Tasarlanan metamalzemenin antene entegre edilmeden önce optimize edilmiş boyutlarında bir değişiklik yapılmamıştır. S-SRR hücresinin anten bölgesinde metamalzeme özelliği gösterebilmesi için yapılan optimizasyonlardaki hücre boyutuna yapılan müdahaleler ile ciddi düzeyde frekans bandının kaydığı gözlemlenmiştir. Bunun üzerine genel tasarımlarda optimizasyona gidildiğinde ve S-SRR hücrelerinin boyutuna müdahale edildiğinde kullanılan hücrelerin son halinin hala antenin çalışma frekansında metamalzeme olarak davranıp davranmadığı bir tartışma konusu olabileceğinden metamalzeme boyutları sadece CST programında tasarımı sırasında optimize edilmiştir.

S-SRR hücreleri şeklinde boşluklar oluşturarak kusurlu hale getirilen zemin yüzeyine sahip tasarımlarda, S-SRR hücreleri arası mesafe azaldıkça S_{11} parametreleri grafiklerinde var olan düşüşlerin birbirine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Yapılan tasarımlarda kusursuz zemine sahip antene göre daha yüksek geri dönüş kayıpları elde edilmiştir.

S-SRR hücreleri arasında birer boşluk bırakarak konumlandırılmış ve zemin yüzeyinde bu hücreler harici boşluklar oluşturarak kusurlu hale getirilen tasarımlarda en yüksek geri dönüş kayıpları elde edilmiş, bu tip zemin yüzeyine sahip tek merkez frekansında çalışan tasarımlar için kazancın arttığı gözlemlenmiştir. Besleme yolunun altında kalan zemin yüzeyini kusursuz halde bırakmanın S_{11} parametrelerini iyileştirdiği ve bant genişliğini etkilediği gözlemlenmiştir.

S-SRR hücreleri arasında birer boşluk bırakarak konumlandırılmış ve zemin yüzeyinde bu hücreler harici boşluklar oluşturarak kusurlu hale getirilen tasarımlarda antenin zemin yüzeyinin üstündeki konumunun da S_{11} parametrelerini büyük ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada antenin konumu değiştirilerek elde edilen iki modelde

antenlerin birden fazla frekans bandında çalışarak çok bantlı anten gibi davrandığı gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında birçok çalışmada olduğu gibi metamateryaller ile kusurlu zemin yüzeyi oluşturmanın geri dönüş kaybı, kazanç ve bant genişliği gibi değerleri iyileştirdiğini görmenin yanı sıra radyasyon verimliliğini de büyük ölçüde yükselttiği görülmüştür.

Kusurlu zemin oluşturulması ile tek bantta çalışan dikdörtgen yamaya sahip mikroşerit antenlerin, yama şeklinde değişikliğe gidilmeden çok bantlı anten gibi birden fazla frekans bandında çalışabileceği de açıkça görülmektedir.

Öneriler

Yapılan çalışmada tasarlanan zemin yüzeyi kombinasyonları ve simülasyonları ile elde edilen sonuların gelecekte yapılacak antenler ile ilgili çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir ve bundan sonraki yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir.

Mikroşerit yama antenleri doğaları gereği oldukça dar bir frekans bandında çalışmaktadır. Yapılan tasarımlarda bant genişliği kusursuz zemin yüzeyine sahip antene göre 2 katına ve fazlasına çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre daha geniş bantlı kusursuz zemin yüzeyine sahip antenlerde aynı sonucun gözlemlenip gözlemlenmeyeceğini görmek için daha geniş bantlı bir anten tasarımı yapılabilir. Bunun için;

- Altaş kalınlığı artırılabilir,
- Dielektrik kat sayısı daha düşük olan bir altaş tercih edilebilir,
- Antenin yama şekli değiştirilebilir,
- Besleme hattı farklı bir model seçilerek bu çalışmada karşılaşılan anten yaması ile gömme beslemeli hat arasında kalan boşlukların S-SSR hücrelerine göre konumunun anten parametrelerini etkilemesinin önüne geçilebilir,
- Tasarımlarda kullanılan kombinasyonlar farklı tip bir hücre ile denenerek sonuçları ne yönde etkileyeceği gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] C. A. BALANIS, Antenna theory: Analysis and design. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005
- [2] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl, and A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook. Boston: Artech House, 2001.
- [3] A. Pandey, in Practical Microstrip and printed antenna design, Artech House, 2019, p. 413.
- [4] IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," in IEEE Std 145-1993 , vol., no., pp.1-32, 18 July 1993, doi: 10.1109/IEEESTD.1993.119664.
- [5] J. T. Bernhard, P. E. Mayes, D. Schaubert, and R. J. Mailloux, "A Commemoration of Deschamps and Sichak's Microstrip Microwave Antennas: 50 Years of Development Divergence and New Directions," 2006.
- [6] J. L. Kerr, "Other Microstrip Antenna Applications," Proc. of the 1977 Antenna Applications Symposium, April 27-29, 1977.
- [7] J. W. Mink, "Circular Microstrip Antenna Elements," in 1980 IEEE Int.Antennas Propagat. Symp. Dig., 1980, pp. 605-608.
- [8] D. A. Eberly, "LEED EB case Study: Achieving platinum and the Energy Star label for corporate headquarters," Energy Engineering, vol. 105 no. 3, pp.23-37, 2008.
- [9] T. J. Pradeep and G. Kalaimagal, "Design of 4×2 Corporate Feed Microstrip Patch Antenna Using Inset Feeding Technique with Defective Ground Plane Structure," Advances in Intelligent Systems and Computing Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems, pp. 269–283, 2017.
- [10] Ahmed Abdelaziz and Ehab K. I. Hamad* Design of a Compact High Gain Microstrip Patch Antenna for Tri-Band 5 G Wireless Communication

- [11] O. Armağan and M. Kahriman, “2.45 GHz, 3.7 GHz ve 5.8 GHz Frekanslarda Çalışan Üç-Bant Yama Anten Tasarımı,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 4, no. 3, p. 189, 2016.
- [12] D. Gopi, A. R. Vadaboyina, and J. R. Dabbakuti, “DGS based monopole circular-shaped patch antenna for UWB applications,” *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, 2021.
- [13] M. Demirci and S. Ermiş, “5G Teknolojisi İçin Çift Bantlı (28/38 GHz) dikdörtgen Mikroşerit Anten Tasarımı,” *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 14, no. 2, pp. 171–181, 2021.
- [14] J. Singh, “Inset Feed Microstrip Patch Antenna,” *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 324–329, Feb. 2016.
- [15] H. Ö. Yılmaz and F. Yaman, "Metamaterial Antenna Designs for a 5.8-GHz Doppler Radar," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 4, pp. 1775-1782, April 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2914131
- [16] Çıngı, A., 2018. Mikrodalga Uygulamaları İçin Mükemmel Metamalzeme Sinyal Emici Tasarımı. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, pp.438-442.
- [17] T. Shaw and D. Mitra, “Design of highly directive slot antenna using metamaterial structure under optimal condition,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 31, no. 9, 2021.
- [18] Çelenk, Esra. (2012). Metamalzemelerin Anten Uygulaması. 10.13140/RG.2.2.23996.56961.
- [19] E. M. Kucukoner, A. Cinar, U. Kose, and E. Ekmekci, “Electrical size reduction of microstrip antennas by using defected ground structures composed of complementary split ring resonator,” *Advanced Electromagnetics*, vol. 10, no. 1, pp. 62–69, 2021.

- [20] F. Raval, Y. P. Kosta, and H. Joshi, "Reduced Size Patch Antenna Using Complementary Split Ring Resonator as Defected Ground Plane," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, no. 8, pp. 1126–1133, 2015.
- [21] L. Paul, M. Haque, S. Sarker, M. Ur Rashid, M. Haque, and T. Roy, "Design and performance exploration of a DGS metamaterial MPA by etching four dual isosceles triangular defects on the ground plane," *2018 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2)*, 2018.
- [22] İ. Yıldız, T. İkiz, Ş. Çolak, F. Karadağ, M. Karaaslan ve D. N. Gençdoğan, "Near-Zero-Index Split Ring Resonator: A Lens Antenna", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı. 24, ss. 474-478, Nis. 2021, doi:10.31590/ejosat.903929
- [23] A. Noor, "Metamaterial electromagnetic absorbers and plasmonic structures," Thesis, University of Manchester, 2010.
- [24] R. Li, Q. Zhang, Y. Kuang, X. Chen, Z. Xiao, and J. Zhang, "Design of a miniaturized antenna based on split ring resonators for 5G Wireless Communications," *2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, 2019.
- [25] C. Arora, S. S. Pattnaik, and R. N. Baral, "Microstrip Patch Antenna Array with Metamaterial Ground Plane for Wi-MAX Applications," *Advances in Intelligent Systems and Computing Proceedings of the Second International Conference on Computer and Communication Technologies*, pp. 665–671, 2015.
- [26] F. Raval, Y. P. Kosta, J. Makwana, and A. V. Patel, "Design & implementation of reduced size microstrip patch antenna with metamaterial defected ground plane," *2013 International Conference on Communication and Signal Processing*, 2013.
- [27] Y. E. M. Ali and K. A. S. Jasim, "Design of broadband microstrip patch antenna for WLAN/WiMAX applications," *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, vol.23, pp. 154-163, 2015.

- [28] A. M. Lima, N. H. O. Cunha, and J. P. D. Silva, "Effect of Metamaterial Cells Array on a Microstrip Patch Antenna Design," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 19, no. 3, pp. 327–342, 2020.
- [29] A. Rathore, "Harvesting radio frequency energy: Power electronics," *Electronics For You*, 25-Jul-2021. [Online]. Available: electronicsforu.com/market-verticals/power-electronics/harvesting-radio-frequency-energy. [Erişim: 13-May-2022].
- [30] IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands," in *IEEE Std 521-1984*, vol., no., pp.1-8, 30 Nov. 1984, doi: 10.1109/IEEESTD.1984.81588.
- [31] Appadvice, "Radio Frequency Spectrum by Sarah e Thornburg," AppAdvice, 26-Feb-2020. [Online]. Available: appadvice.com/app/radio-frequency-spectrum/1500504629. [Erişim: 10-Aug-2022].
- [32] R. Kumar, M. Kumar, J. S. Chohan, and S. Kumar, "Overview on metamaterial: History, types and applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 3016–3024, 2022.
- [33] Dirlik, T. (2020). *Cosimulation and optimization of patch antenna using metamaterial* (thesis).
- [34] Cui, T. J., Smith, D., & Liu, R. (Eds.). (2010). *Metamaterials: Theory, design, and applications*. Springer.
- [35] T. Dirlik, "Metamalzeme kullanılarak eş benzetim ile mikroşerit anten tasarımı ve optimizasyonu," Thesis, 2020. Başkent University, Turkey.