

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DAİRESEL YARIK HALKA REZONATÖR METAMALZEMELERİN ANTEN
KAZANCINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yılmaz PARMAKSIZ

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

OCAK 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DAİRESEL YARIK HALKA REZONATÖR METAMALZEMELERİN ANTEN
KAZANCINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yılmaz PARMAKSIZ

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

OCAK 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAİRESEL YARIK HALKA REZONATÖR METAMALZEMELERİN ANTEN
KAZANCINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yılmaz PARMAKSIZ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAİRESEL YARIK HALKA REZONATÖR METAMALZEMELERİN ANTEN
KAZANCINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yılmaz PARMAKSIZ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 12/01/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

ÖZET

DAİRESEL YARIK HALKA REZONATÖR METAMALZEMELERİN ANTEN KAZANCINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yılmaz PARMAKSIZ

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Ocak 2024; 41 sayfa

Metamalzemeler, negatif elektriksel geçirgenliğe ve manyetik geçirgenliğe sahip yapay yapılardır. Radyo Frekans sektöründe birçok farklı alanda tercih edilmektedir. Yapılan modellerde doğrultusunda farklı karakteristik özelliklere sahip tasarımlar ortaya çıkmaktadır.

Yapılan bu tez çalışmasında ilk aşamada numerik olarak hesaplanarak 8 GHz merkez frekansta çalışan bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımda dielektrik malzeme olarak FR-4 malzeme tercih edilmiştir. Daha sonrasında optimizasyon çalışmaları ile istenilen tasarım tamamlanmıştır. Mikroşerit anten tasarımının tamamlanmasıyla bir sonraki aşamada anten uygulamalarında da tercih edilen Dairesel Yarık Halka Rezonatör tasarımı yapılmıştır. Yapılan bu tasarım 7.7 GHz - 8.3 GHz frekans aralığında negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğe sahiptir. Dairesel Yarık Halka Rezonatör yapısında mikroşerit anten tasarımında da olduğu gibi FR-4 dielektrik malzeme kullanılmıştır. Yapılan metamalzeme tasarımı ile 6×7 bir yapı oluşturulup mikroşerit anten ile arasında 6 mm olacak şekilde analiz edilmiştir. Projenin özgün yanını da yansıtan 6×7 yapıya zemin düzlemi optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan optimizasyon ile en yüksek anten kazancı 2.5 mm uzunluğunda bakır yapılar eklenmesiyle meydana gelmiştir. Yapılan optimizasyon ve analiz sonuçlarında mikroşerit antenin kazancı yaklaşık 2.04 dBi'den 3.02 dBi'ye yükselmiştir. Gerçekleştirilen analiz ve optimizasyon çalışmaları CST Microwave Studio programı kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan bu tasarım ve optimizasyon çalışmaları ile, metamalzeme ve zemin düzlem yapılarının kullanılmasının mikroşerit antenin geri dönüş kaybı, duran dalga oranı, kazanç, ışıma örüntüsü gibi anten parametrelerinin etkisi analiz edilmiştir.

Literatürde birçok metamalzeme yapısının anten uygulamalarına etkisi üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan araştırmalarda, metamalzeme yapısındaki zemin düzleminin anten kazancına etkisi üzerine ek bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak yapılan bu tez çalışması ile metamalzemelerin anten uygulamaları konularında zemin düzlemi optimizasyonunun sağlanmasıyla anten kazancında artış meydana gelebileceği ifade edilmiştir. Özellikle teknolojik gelişmelerle birlikte anten tasarımları üzerine çalışmaların artarak devam edeceği düşünülmektedir. Bu tez çalışmasının ileride yapılacak metamalzeme ve anten tasarımlarına önemli bir katkı sağlayacağı görülmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Anten tasarım parametreleri, CST Microwave Studio, Dairesel Yarık Halka Rezonatör, Metamalzeme, Mikroşerit anten

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR METAMATERIALS ON ANTENNA GAIN

Yılmaz PARMAKSIZ

MSc Thesis in Electrical & Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

January 2024; 41 pages

Metamaterials are artificial structures with negative permittivity and permeability. It is preferred in many different areas in the Radio Frequency industry. In line with the modeling made, designs with different characteristics emerge.

In this thesis study, a microstrip antenna operating at 8 GHz center frequency was designed by numerical calculation in the first stage. FR-4 material was preferred as the dielectric material in the design. Afterwards, the desired design was completed with optimization studies. With the completion of the microstrip antenna design, the Circular Split Ring Resonator design, which is also preferred in antenna applications, was made in the next stage. This design has negative permittivity and permeability in the frequency range of 7.7 GHz - 8.3 GHz. FR-4 dielectric material is used in the Circular Split Ring Resonator structure, as in the microstrip antenna design. With the metamaterial design, a 6×7 structure was created and analyzed with a distance of 6 mm from the microstrip antenna. Ground plane optimization was performed on 6×7 structure, which also reflects the unique aspect of the project. With the optimization, the highest antenna gain was achieved by adding 2.5 mm long copper structures. As a result of the optimization and analysis, the gain of the microstrip antenna increased from approximately 2.04 dBi to 3.02 dBi. The analysis and optimization studies were carried out using the CST Microwave Studio program.

With these design and optimization studies, the effect of using metamaterial and ground plane structures on antenna parameters such as return loss, standing wave ratio, gain and radiation pattern of the microstrip antenna was analyzed.

In the literature, there are studies on the effects of many metamaterial structures on antenna applications. In the research conducted, there is no additional study on the effect of the ground plane in the metamaterial structure on the antenna gain. However, with this thesis study, it has been stated that antenna gain can be increased by ensuring ground plane optimization in antenna applications of metamaterials. It is thought that studies on antenna designs will continue to increase, especially with technological developments. It is anticipated that this thesis will make a significant contribution to future metamaterial and antenna designs.

KEYWORDS: Antenna design parameters, Circular Split Ring Resonator, CST Microwave Studio, Metamaterial, Microstrip antenna

COMMITTEE: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN



ÖNSÖZ

Anten teknolojisinin gelişmesiyle, üzerine yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Mikroşerit antenler de avantajları sebebiyle, birçok farklı alanda tercih edilen bir anten tipidir. Bu sebeple anten teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Seçmiş olduğum bu tez konusu, birçok alanda kullanılan mikroşerit antenlerin geliştirilmesi üzerineydi. Tez konumun seçiminde en önemli sebeplerden biri de yapılan çalışmanın birçok alana etki etmesi ve ileride yapılacak çalışmalara yol göstermesiydi. Tez çalışmam, mikroşerit antenlerdeki düşük bir kazanca sahip olması dezavantajının azaltılmasına yönelikti. Anten kazancı arttırmak için metamalzeme yapılar tercih ettim. Metamalzeme yapılar, geniş bir kullanım alanına sahip olması sebebiyle ileride yapılacak çalışmalara etki etmesi hedeflenmiştir. Yapılan bu çalışma ile metamalzeme yapılarla mikroşerit antenin kazancının iyileştirilmesi amaçlanmış ve zemin düzleminin etkisi ile de projenin özgün yanını ortaya koymuştur. Tez çalışmasının ileride yapılacak olan mikroşerit anten tasarımları ve optimizasyon çalışmalarına katkı sağlaması amaçlanmıştır. Aynı zamanda RF sektöründe de sıklıkla tercih edilen metamalzeme üzerine yapılacak çalışmalara da yol göstermesi hedeflenmiştir.

Tez çalışmalarım süresince bana her konuda destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Şükrü ÖZEN'e, takıldığım konularda bana fikir veren iş arkadaşlarıma, destekleriyle her zaman yanımda olan annem Erden PARMAKSIZ, babam Caner PARMAKSIZ ve kardeşim Elif PARMAKSIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
3. MATERYAL VE METOT.....	5
3.1. Anten Tasarım Parametreleri	5
3.1.1. Kazanç	5
3.1.2. Anten Polarizasyonu	6
3.1.2.1. Lineer (Doğrusal) Polarizasyon	7
3.1.2.2. Dairesel Polarizasyon	7
3.1.2.3. Eliptik Polarizasyon.....	8
3.1.3. Geri Dönüş Kaybı	9
3.1.4. Bant Genişliği	10
3.1.5. Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR).....	11
3.1.6. Yönlülük	11
3.1.7. Işıma Örüntüsü.....	12
3.1.8. Hüzme Genişliği	13
3.1.9. Anten Verimi	13
3.1.10. Anten Giriş Empedansı.....	14
3.1.11. Antenin Işıma Bölgeleri.....	15
3.2. Mikroşerit Anten	16
3.2.1. Mikroşerit Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları	18
3.2.2. Dikdörtgen Yama Yapısına Sahip Mikroşerit Anten Tasarımı	18
3.2.3. Dikdörtgen Yama Yapısına Sahip Mikroşerit Anten Eşdeğer Devre Modeli	20
3.3 Metamalzeme Yapılar	22
3.4. Nicholson Ross Weir (NRW) Metodu	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
4.1. Metamalzeme Tasarımı	28
4.2. C-SRR Yapısının Mikroşerit Anten Performansına Etkisi.....	31

5. SONUÇLAR	38
6. KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dairesel Yarık Halka Rezonatör Metamalzemelerin Anten Kazancına Etkisinin İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

12/01/2024

Yılmaz PARMAKSIZ

İmzası

(Handwritten signature area)

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\vec{B}$: Manyetik akı yoğunluk vektörü

c : Işık hızı

$\vec{D}$: Elektrik akı yoğunluk vektörü

D : Yönlülük

$\vec{E}$: Elektrik alan vektörü

e_0 : Toplam verimlilik

e_c : İletim verimliliği

e_{cd} : Anten ışıma verimi

e_d : Dielektrik verimliliği

e_r : Yansıma verimliliği

f_{max} : Üst frekans

f_{min} : Alt frekans

G : Kazanç

$\vec{H}$: Manyetik alan vektörü

$\vec{k}$: Dalga vektörü

P_{rad} : Toplam ışıyan güç

S_{11} : Geri dönüş kaybı

U_0 : Yön bağımsız kaynağın ışıma şiddeti

U_{max} : Kaynağın maksimum ışıma Şiddeti

Z_0 : İletim hattının karakteristik empedansı

Z_L : Yük empedansı

ϵ : Elektriksel geçirgenlik

ϵ_0 : Havanın elektriksel geçirgenliği

ϵ_r : Bağıl elektriksel geçirgenlik (Dielektrik sabiti)

ϵ_{reff} : Etkin elektriksel geçirgenlik

λ : Dalga boyu

λ_0 : Serbest uzaydaki dalga boyu

λ_c : Kesim frekans dalga boyu

μ : Manyetik geçirgenlik

μ_0 : Havanın manyetik geçirgenliği

μ_r : Bağıl manyetik geçirgenlik

μ_{reff} : Etkin manyetik geçirgenlik

T: İletim katsayısı

U: Işıma Şiddeti

w: Açısal frekans

Γ : Yansıma katsayısı,

n: Kırılma indisi

Kısaltmalar

BW: Bant Genişliği

C-SRR: Dairesel Yarık Halka Rezonatör

dB: Desibel

DNG: Çift Negatif

DPS: Çift Pozitif

ENG: Epsilon Negatif

FNBW: İlk Sıfır Hüzme Genişliği

GHz: Gigahertz

GPS: Küresel Konumlama Sistemi

HPBW: Yarı Güç Hüzme Genişliği

LHM: Solak Malzeme

mm: Milimetre

MNG: Mü Negatif

NRW: Nicholson Ross Weir

PEC: Mükemmel Elektrik İletken

PMC: Mükemmel Manyetik İletken

RF: Radyo Frekans

SRR: Yarık Halka Rezonatör

S-SRR: Karesel Yarık Halka Rezonatör

VSWR: Gerilim Duran Dalga Oranı

Wi-Fi: Kablosuz Bağlantı Alanı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mikroşerit anten geometrik yapısı	4
Şekil 3.1. Anten kazancı ve izotropik anten arasındaki ilişki	6
Şekil 3.2. Lineer (doğrusal) polarizasyon	7
Şekil 3.3. Dairesel polarizasyon	8
Şekil 3.4. Eliptik polarizasyon	9
Şekil 3.5. Antenin bant genişliği	10
Şekil 3.6. 3D ışıma örüntüsü ve kulakların gösterimi	12
Şekil 3.7. Doğrusal formda güç örüntüsü ve kulakların gösterimi	13
Şekil 3.8. Antenin Thevenin eşdeğer devresi (Balanis 2005)	14
Şekil 3.9. Anten ışıma bölgeleri	15
Şekil 3.10. Mikroşerit antende saçaklanma görüntüsü	16
Şekil 3.11. Mikroşerit anten yama yapıları	17
Şekil 3.12. Mikroşerit besleme yapısı	18
Şekil 3.13. Mikroşerit anten tasarım parametreleri 3D model	19
Şekil 3.14. Mikroşerit antenin ışıma çizgileri (2D)	19
Şekil 3.15. Doğrudan temaslı mikroşerit besleme ve eşdeğer devresi (Balanis 2005) ...	20
Şekil 3.16. ϵ ve μ parametrelerine göre malzemelerin sınıflandırılması	22
Şekil 3.17. a) Sağ el kuralına göre vektörel hareket; b) Sol el kuralına göre vektörel hareket	24
Şekil 3.18. Kırılma indisinin pozitif ve negatif durumları (Koçer 2023)	25

Şekil 3.19. a) Karesel yarık halka rezonatör; b) Dairesel yarık halka rezonatör; c) Üçgensel yarık halka rezonatör; d) Omega rezonatör (Dirlik 2020)	25
Şekil 4.1. a) C-SRR yapısının önden görüntüsü; b) C-SRR yapısının arkadan görüntüsü	28
Şekil 4.2. C-SRR yapının sınır yüzey görüntüsü	29
Şekil 4.3. C-SRR yapının S11 grafiği.....	29
Şekil 4.4. C-SRR yapının S21 grafiği.....	30
Şekil 4.5. C-SRR yapının etkin elektriksel geçirgenlik (ϵ_{eff}) ve manyetik geçirgenliklerinin (μ_{eff}) reel formda grafiği	30
Şekil 4.6. C-SRR yapının kırılma indisinin reel ve imajiner formda grafiği.....	30
Şekil 4.7. a) Mikroşerit antenin önden görüntüsü; b) Yandan görüntüsü	31
Şekil 4.8. a) 6×7 C-SRR yapısı önden görünümü; b) Arkadan görünümü	32
Şekil 4.9. Simülasyon programında 6×7 C-SRR ve mikroşerit anten yerleşimi	33
Şekil 4.10. Zemin düzleminin uzunluğunun mikroşerit antenin S11 parametresine etkisi	33
Şekil 4.11. Zemin düzleminin uzunluğunun mikroşerit antenin VSWR parametresine etkisi	34
Şekil 4.12. Zemin düzleminin uzunluğunun mikroşerit antenin kazancına etkisi ($\Phi=0$)	34
Şekil 4.13. 8 GHz polar formda mikroşerit antenin ışıma örüntüsü sonucu ($\Phi=0$)	35
Şekil 4.14. 8 GHz polar formda $d=2.5$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR yapının kullanılmasının mikroşerit antende ışıma örüntüsü sonucu ($\Phi=0$).....	35
Şekil 4.15. Mikroşerit anten ve $d=2.5$ mm 6×7 C-SRR için polar formda kazanç grafiği karşılaştırılması ($\Phi=0$).....	36
Şekil 4.16. 8 GHz 3D mikroşerit antenin ışıma örüntüsü	36

Şekil 4.17. 8 GHz 3D $d=0$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR yapının kullanılmasının mikroşerit antende ışıma örüntüsü	37
Şekil 4.18. 8 GHz 3D $d=2.5$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR yapının kullanılmasının mikroşerit antende ışıma örüntüsü	37



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. C-SRR tasarım parametreleri ve boyut bilgileri	28
Çizelge 4.2. Mikroşerit antenin tasarım parametreleri ve değerleri.....	32
Çizelge 5.1. 8 GHz frekans için, zemin düzlemi yapının eklenmesinin anten tasarım parametrelerine etkisi ($\Phi=0$).....	38
Çizelge 5.2. Tez çalışması ve literatürde bulunan metamalzeme yapı tasarım örnekleri	39



1. GİRİŞ

Teknolojik ilerlemeler, birçok sektöre ışık tutarak mevcut kullanılan ürünlere katkı sağlamış ve yeni ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu sektörlerden biri de birçok alana doğrudan etki eden ve buna bağlı olarak da sürekli geliştirme çalışmalarının devam ettiği kablosuz haberleşme sektörüdür. Kablosuz haberleşme sektöründe çalışmaların artarak devam sebeplerinden biri geçmişe göre veri miktarlarında sürekli olarak artış yaşanmasıdır. Bunun sonucunda ise, veri kapasitesi ve iletim hızları üzerine ihtiyaçlar meydana etmesinin en önemli gelmektedir.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde antenler, elektromanyetik dalgaları aracılığı ile verilerin sağlıklı bir şekilde bir ortamdan diğer bir ortama aktarılmasını sağlamaktadır. Bu sebeple, antenler kablosuz haberleşme sistemlerinin en önemli yapılarından biridir. Antenlerin, kullanım alanlarına ve ihtiyaçlar doğrultusuna göre tasarımları belirlenmektedir. Anten tasarım parametrelerine başlıca; yönlülük, kazanç, polarizasyon, bant genişliği, hüzmeye genişliği örnek olarak verilebilir. Antenler, haberleşme sektöründe etkin kullanılmasıyla beraber üzerine ilgiyle çalışılan konulardan biri haline gelmiştir.

Kablosuz haberleşmenin tarihi, elektromanyetik dalgaların keşfine kadar uzanmaktadır. Elektromanyetik dalgaların keşfi, ilk olarak James Clerk Maxwell tarafından 1867 yılında, üzerine matematiksel çalışmalar yapmasıyla başlamıştır. 1887 yılında Heinrich Hertz, deneysel anlamda antenler kullanarak ilk çalışmaları gerçekleştirmiştir. 1920 yıllarından itibaren iletişim sektöründe telgraf ve radyo alanlarında kullanılmaya başlanmıştır.

Mikroşerit antenler, hafif olması, kolay bir üretime sahip olması, küçük değişikliklerle farklı tasarımlar oluşturulabilmesi gibi avantajları sebepleriyle birçok farklı alanda tercih edilen anten yapılarından biridir. Özellikle teknolojik gelişmeler ışığında anten tasarımlarının da minimize edilmesiyle mikroşerit antenler üzerine çalışmalar artarak devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalara, farklı yama tasarımları, dizi anten tasarımları ve optimizasyon çalışmaları örnek olarak gösterilebilir. Yapılan bu çalışmalar sayesinde mikroşerit antenin dar bir bant genişliğine sahip olması, düşük bir anten kazancı ve verime sahip olması gibi dezavantajlarının azalmasına ve tasarım parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik katkı sağlamaktadır. Tasarımları yapılan mikroşerit anten yapıları genellikle mikrodalga frekans aralığı üzerinedir. Günümüzde de üzerine çalışmaların gerçekleştirildiği anten tasarımı ve bunun sonucunda yapılan optimizasyon çalışmaları ile anten tasarımında dezavantajların iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. Mikroşerit antenler, zemin düzlemi, dielektrik malzeme, yama yapısı ve besleme yapısı olmak üzere 4 yapıdan oluşmaktadır. Kullanılan dielektrik malzeme, yama yapısı ve besleme yöntemleri ile akademik ve ticari alanlarda da farklı anten tasarımları üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Mikroşerit antenlerin dezavantajlarını iyileştirmek amacıyla günümüzde de ilgiyle çalışılan konulardan biri de metamalzeme kullanımıdır. Metamalzeme kullanımıyla mikroşerit antenlerin sınırlı bir bant genişliğine sahip olması, düşük bir kazancı ve verimi olması gibi dezavantajlarının azaltılarak ihtiyaç duyulan frekans aralığında kazanç ve bant genişliği gibi anten tasarımı parametrelerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Metamalzeme üzerine ilk çalışma, 1960'lı yıllarda Rus bilim insanı Victor Veselago ile başlamıştır. Veselago yapmış olduğu teorik çalışmada metamalzeme yapısını Maxwell denklemleri ile ifade etmiştir. Veselago'nun gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarda elektrik alan ($\vec{E}$), manyetik alan ($\vec{H}$) ve dalga vektörlerinin ($\vec{k}$) yönleri sebebiyle bu tür malzemeleri Solak Malzeme (LHM) olarak isimlendirmiştir. Metamalzemeler yapay yapılardır ve tasarım çeşitliliğine sahiptir. Metamalzemeler tercih edilen model yapısı, kullanılan dielektrik malzeme, boyut bilgileri doğrudan etki etmektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ilk aşamada frekans, yama yapısı, dielektrik malzeme bilgileri referans alınarak mikroşerit beslemeli dikdörtgen yama yapısına sahip bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tasarım sırasında ilk aşamada numerik olarak anten tasarım parametreleri hesaplanmış, sonrasında optimizasyonlar ile istenilen merkez frekans ve koşullarda tasarımlar analiz edilmiştir. Tasarım sırasında dielektrik malzeme olarak FR-4 malzeme tercih edilmiş olup, dielektrik sabiti (ϵ_r) 4.3 F/m ve kalınlık değeri 1.6 mm olarak modellenmiştir. Tasarımı yapılan mikroşerit anten, 8 GHz frekansta -18.9 dB geri dönüş kaybına (S_{11}) ve $\Phi=0$ için 2.04 dBi kazanca sahiptir. Mikroşerit anten tasarımının tamamlanmasıyla, bir sonraki aşamada metamalzeme yapı tasarlanmıştır. Metamalzeme yapı tasarımında çeşitli çalışmalarda da tercih edilen “Dairesel Yarık Halka Rezonatör (C-SRR)” yapı tasarlanmıştır. Tasarlanan C-SRR yapı, 7.7 GHz - 8.3 GHz frekans aralığında elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) negatif değere sahiptir. Metamalzeme yapının tasarımının tamamlanmasıyla 6×7 C-SRR bir yapı oluşturulmuştur. 6×7 C-SRR yapı ile mikroşerit anten arasına 6 mm mesafe konularak analiz edilmiştir. Yapılan analiz çalışmalarında 6×7 C-SRR yapıya, zemin düzleminin anten üzerine performans etkisinin analiz edilmesi amacıyla iletkenlik değeri 5.8001×10^7 , kalınlığı ise 0.035 mm sahip bakır yapılar eklenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmalarıyla metamalzeme yapının zemin düzleminin anten performansına etkisi yorumlanmıştır. Yapılan optimizasyonlar ve analiz çalışmaları için CST Microwave Studio simülasyon programı kullanılmıştır.

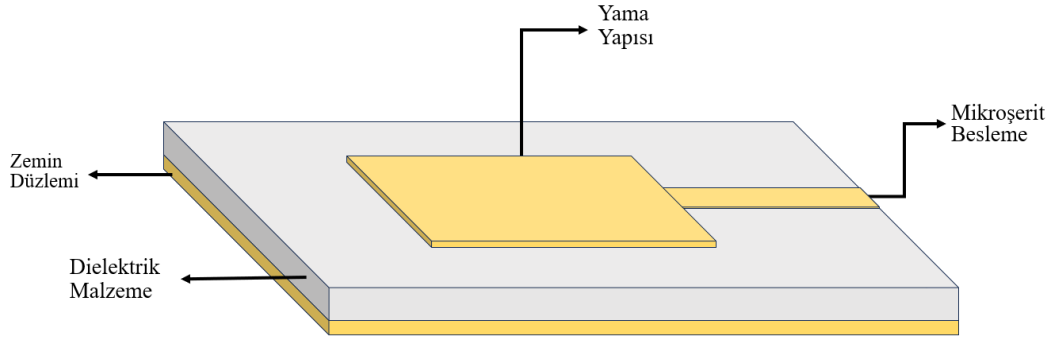
Bu tez çalışmasında metamalzeme yapının zemin düzleminin, mikroşerit anten üzerine performans optimizasyonu yapılmış ve metamalzeme yapı ile antenin tasarım parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yapılan tez çalışması aynı zamanda ileride yapılabilecek farklı metamalzeme tasarımları ve bunların beraber optimize edilerek anten performansı üzerine etkisi akademik çalışmalarda da önemli bir yere sahip olması hedeflenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Antenler, teknolojik gelişmelerle birlikte haberleşme sektöründe oluşan veri miktarlarında oluşan artışa ve bu kapsamda ihtiyaçların artmasıyla birçok sektöre doğrudan etki etmektedir. Bunun sonucunda ise üzerine yapılan çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Antenler üzerine yapılan ilk çalışma James Clerk Maxwell tarafından oluşturulan Maxwell denklemlerine kadar uzanmaktadır. Maxwell denklemleri elektromanyetik konusunun temelini oluşturmaktadır. 1873 yılında James Clerk Maxwell tarafından ilk yayın oluşturulmuştur. 1886 yılında Heinrich Hertz, Maxwell tarafından ortaya atılan elektromanyetik varlığın ışınmasını kanıtlamıştır. Yaptığı deneysel çalışmada, bir çift kutuplu anten arasındaki boşluktan, bir elektrik kıvılcımı oluşturmuştur. Yapılan bu çalışma kablosuz iletişimin de deneysel çalışması olarak literatürde ifade edilmektedir. Antenler üzerine çalışmaların devam edilmesiyle 1890 yıllarında kullanılan antenler, deneyler için kullanılmıştır. 1901 yılında Guglielmo Marconi Atlantik okyanusunun karşısıyla iletişim kurabilmek için, 200 metrelik uçurtma anteni kullanmıştır (Balanis 1992). 2 Dünya Savaşı zamanında antenler radyo ve TV gibi alanlarda kullanılmış ve günlük hayatın içine girmiştir. 1960'lı yıllardan itibaren modern anten teknolojisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar, sayısal yöntemler üzerine yapılırken daha önce yapılamayan karmaşık anten sistemlerin çözülmesini ve analizlerin yapılmasını sağlamıştır.

Mikroşerit antenler üzerine çalışma ilk olarak, 1953 yılında Deschamps tarafından başlamıştır (Tansarıkaya 2007). 1955 yılında H. Gutton ve G. Baissino mikroşerit anten üzerine patent çalışması gerçekleştirmiştir. İlk mikroşerit anten tasarımı ve baskı devre çalışmaları 1970'li yıllarda Howel ve Munson tarafından yapılmıştır (Ulu 2020). 1973 yılında Munson, mikroşerit antenlerin düşük profilleri üzerine çalışmalar yapmıştır (Ataş vd. 2018). Mikroşerit antenler, en üst kısımda oluşan yama yapısı, orta kısımda kullanılan dielektrik malzeme, besleme yapısı ve zemin düzleminde bulunan iletkenliği sağlayan toprak yapısı olmak üzere 4 yapıdan oluşmaktadır. Mikroşerit antenler, hafif olmaları, kolay bir üretime sahip olmaları, küçük boyutları sebebiyle kolay bir entegrasyona sahip olmaları gibi avantajları sebepleriyle farklı alanlarda tercih edilen bir anten tipidir. Şekil 2.1'de dikdörtgen yama yapısına ve mikroşerit beslemeye sahip bir mikroşerit anten geometrik yapısı belirtilmektedir. Kullanım alanları ve ihtiyaçlar doğrultusunda farklı besleme ve yama yapısına sahip mikroşerit anten tasarımları tasarlanabilmektedir.

Mikroşerit antenlerin birçok farklı alanda tercih edilebilmesi sebebiyle üzerine tasarım ve optimizasyon çalışmaları artarak devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalarla, mikroşerit antenlerin dar bir bant genişliklerine sahip olması, kazançlarının düşük olması gibi dezavantajların azalmasını sağlamaktadır. Bu çalışmalardan biri de metamalzeme yapılar kullanılmasıdır. Metamalzeme yapılar kullanılarak, mikroşerit antenlerin dezavantajlarının azaltılması sağlanmaktadır. İhtiyaçlar doğrultusunda farklı geometrik yapılarda metamalzemeler tasarlanabilmektedir.



Şekil 2.1. Mikroşerit anten geometrik yapısı

1968 yılında Rus fizikçi Victor Veselago, metamalzemelerin teorik çalışmalarını Maxwell denklemleri kullanarak yapmıştır. Yaptığı bu teorik çalışmaları, elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) değerlerinin negatif olabileceğini açıklamış ve bunları sol-elli malzeme (LHM) olarak isimlendirmiştir. 1999 yılında metamalzeme ismi ilk kez Roger Waalser tarafından ortaya atılmıştır (Öney 2022). Metamalzemeler üzerine çalışmaların devam etmesiyle 2002 yılında metamalzeme kullanılan anten tasarımı Enoch ve arkadaşları tarafından ortaya atılmıştır. 2005 yıllarından itibaren anten uygulamalarında metamalzeme tasarımlar kullanılmaya başlanılmıştır (Doğan 2012). Literatürde mikroşerit antenlerde metamalzeme kullanımının anten performansları etkisi üzerine yurt içi ve yurt dışında akademik çalışmalar bulunmaktadır.

Dirlik (2020) yapmış olduğu çalışmada, 3.5 GHz frekansta geniş bantlı antenler tasarlamıştır. Metamalzeme için, karesel yarık halka rezonatör (S-SRR), 3.00-4.00 GHz frekans bandında negatif elektriksel geçirgenliğe ve manyetik geçirgenliğe sahiptir. Birim hücre metamalzeme 4x4 yapıda oluşturularak, mikroşerit antenle birlikte kullanılıp anten kazancının artırılmasını sağlamıştır. Antenler ve metamalzeme optimizasyonları için genetik algoritma yöntemini uygulamıştır.

Li vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada, 10 GHz frekansta yama antenin, kazancının artırılması için metamalzeme birim hücre tasarlamıştır. Metamalzeme hücre 3 katmana sahiptir. Üst katman yapının, optimizasyon sonucunda simülasyon ve ölçümlerde radyasyon yüzeyindeki maksimum kazancının %70-%80 arasında elde edildiği ifade edilmiştir.

Zani vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada, C-band için metamalzeme zemin üzerine bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarım ile anten kazancı 4.17 dBi'den 5.66 dBi'ye yükselmiştir. Geri dönüş kaybında ise, -22.08 dB'den -24.2 dB'ye değişmiştir. Bu sonuçla metamalzeme antende daha iyi bir geri dönüş kaybı elde edilmiştir. Metamalzeme kullanımı ile anten, hedeflenen yöne daha keskin bir şekilde odaklanılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Antenler, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla bir noktadaki verinin diğer bir noktaya iletimini sağlayan metalik yapılardır. Antenler alıcı, verici veya hem alıcı hem verici olarak çalışabilmektedir (Sözen 2019). Alıcı anten, elektromanyetik dalgaları iletim hattı içerisinde yayılmasını sağlarken, verici anten ise iletim hattı içerisinde aldığı verileri elektromanyetik dalgalar ile aktarılmasını sağlamaktadır. Antenler kullanımı ile elektromanyetik dalgaların belirli bir yönde yayılımı sağlanmaktadır. Antenlere haberleşmenin kullandığı her alanda ihtiyaç duyulmaktadır, bu sebeple geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Kullanım alanlarına göre antenler çeşitlilik göstermektedir. Kullanılan anten tiplerine tel antenler, açıklık antenler, dizi antenler, yansıtıcı antenler, lens antenler ve mikroşerit antenler örnek olarak verilebilir (Balanis 2005).

3.1. Anten Tasarım Parametreleri

Anten tasarımları, kullanım alanları ve ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmektedir. Tasarımların belirlenmesi sırasında çeşitli parametreler kullanılarak analiz edilmekte ve tasarımlar buna göre devam etmektedir. Kullanılan başlıca anten tasarım parametreleri 3.1.1-3.1.11 aralığında ifade edilmektedir.

3.1.1. Kazanç

Kazanç, anten tasarımı için önemli parametrelerden biridir. Genel tanımı, bir antenin en yüksek ışıma yaptığı yöndeki ışıma şiddetinin, aynı giriş gücüne sahip bir izotropik antenin ışıma şiddetine oranı olarak ifade edilebilir ve birimi dBi'dir. Sadece teorik olarak ifade edilebilen izotropik anten, her yöne eşit ışıma sağlayan anten olarak tanımlanmaktadır. Bir antenin izotropik anten olması için mükemmel bir küre olması gerekmektedir. Küresel bir izotropik antenin anten kazancı 0 dBi olarak ifade edilir.

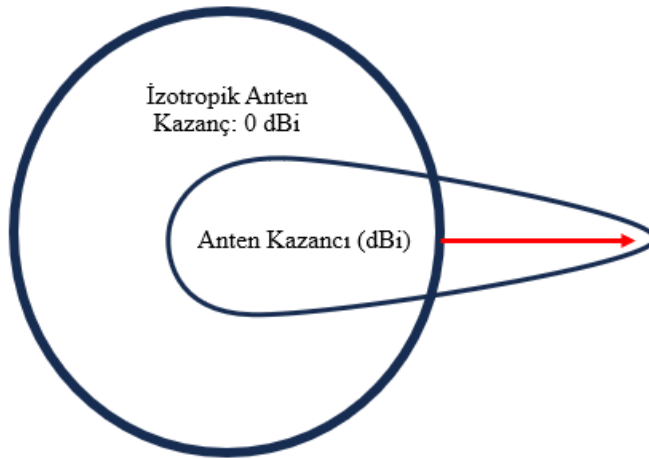
Anten kazancı, antenin verici veya alıcı olma kabiliyetine göre farklı tanımlara sahiptir. Verici antende anten kazancı, antenin giriş gücünü belirli bir yönde elektromanyetik dalgalarına dönüştürmesidir. Alıcı bir antende anten kazancı belirli bir yönde gelen elektromanyetik dalgaların elektrik gücüne dönüştürmesidir.

Denklem 3.1'de anten kazancı formülü belirtilmektedir. Anten kazancı, antenin ışıma verimi ve yönlülük arasındaki ilişki denklem 3.2'de belirtilmektedir.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (3.1)$$

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (3.2)$$

Denklem 3.1-3.2'de belirtilen; $G(\theta, \phi)$: Anten kazancını, e_{cd} : Antenin ışıma verimini, $U(\theta, \phi)$: Antenin ışıma şiddeti, P_{rad} : Anten ışıma yaptığı toplam gücü, $D(\theta, \phi)$: Antenin yönlülüğünü ifade etmektedir.



Şekil 3.1. Anten kazancı ve izotropik anten arasındaki ilişki

3.1.2. Anten Polarizasyonu

Polarizasyon, kutuplanma ile de ifade edilebilmektedir. Tanımı, bir antenin yayılımı veya iletimi sırasındaki elektromanyetik alanın zamana göre z ekseninde çizdiği eğridir. Antenin verici veya alıcı olma özelliğine göre antenden yayılımı veya antene iletimi olarak da ifade edilmektedir. Antende yön belirtilmediği takdirde polarizasyon, antenin maksimum kazanç sahip olduğu yöne göre hesaba katılmaktadır. Işıma örüntüsü için önemli bir parametredir.

Negatif z düzleminde, yayılan bir dalganın zamana göre alan yönü denklem 3.3'te belirtilmektedir.

$$\xi(z; t) = \hat{a}_x \xi_x(z; t) + \hat{a}_y \xi_y(z; t) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te belirtilen alan yönünün düzlemlere göre karmaşık eşlenikleri denklem 3.4-3.5'te ifade edilmektedir (Alpagu 2019).

$$\xi_x(z; t) = \text{Re}[E_x^- e^{j(wt+kz)}] = \text{Re}[E_{x0} e^{j(wt+kz+\phi_x)}] \quad (3.4)$$

$$= E_{x0} \cos(wt + kz + \phi_x)$$

$$\xi_y(z; t) = \text{Re}[E_y^- e^{j(wt+kz)}] = \text{Re}[E_{y0} e^{j(wt+kz+\phi_y)}] \quad (3.5)$$

$$= E_{y0} \cos(wt + kz + \phi_y)$$

Denklemlerde belirtilen;

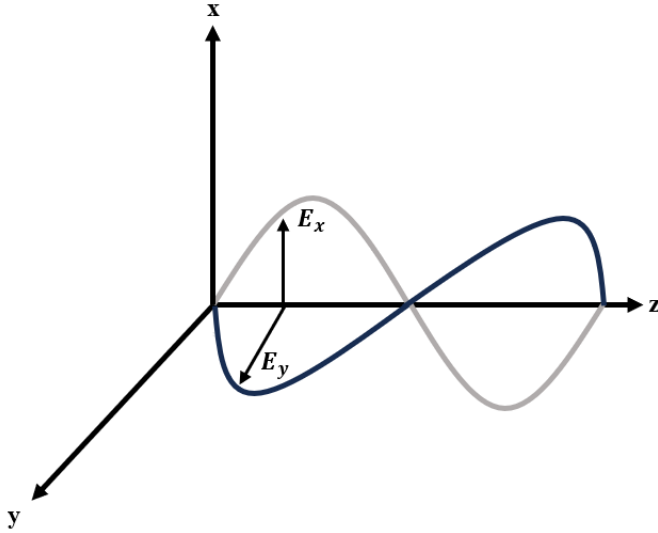
E_{x0} : X bileşeninin maksimum genliğini,

E_{y0} : Y bileşeninin maksimum genliğini ifade etmektedir.

Polarizasyon, lineer (doğrusal) polarizasyon, dairesel polarizasyon ve eliptik polarizasyon olarak 3 grupta incelenmektedir.

3.1.2.1. Lineer (Doğrusal) Polarizasyon

Lineer (doğrusal) polarizasyon elektrik alan vektörünün uzayda yatay veya dikey olduğu polarizasyon tipidir. Bir antenin lineer polarizasyon olması için iki bileşen arasındaki zaman faz farkı ilişkisinde denklem 3.6'da belirtildiği gibi aynı fazda veya aralarında faz farkının 180° tam katları olması gerekmektedir.

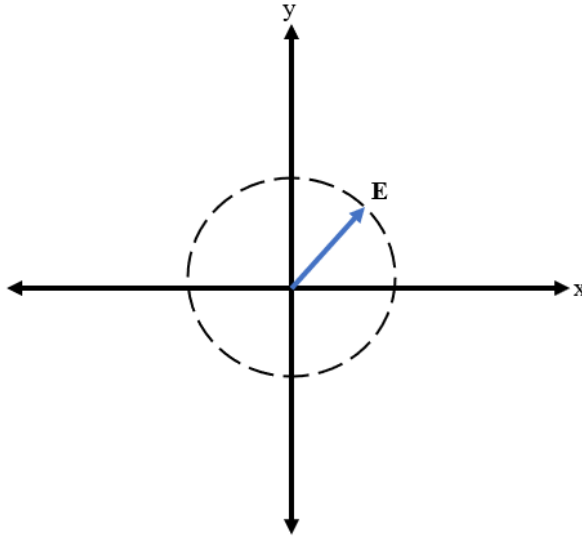


Şekil 3.2. Lineer (doğrusal) polarizasyon

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3.6)$$

3.1.2.2. Dairesel Polarizasyon

Tüm düzlemlerle birlikte yatay ve düşey olarak yayılım durumunda dairesel polarizasyon meydana gelmektedir. Dairesel polarizasyon farklı durumlarda elde edilebilir. Bunlardan ilki, iki farklı anten kullanılarak gerçekleştirilebilir. İki farklı antende dairesel polarizasyon olması için, kullanılan antenler, eş genlikte ancak aralarındaki faz farkının 90° veya 90° tek katları olması gerekmektedir. Bir diğer durumda ise lineer polarizasyona sahip antenden dairesel polarizasyon elde edilmesidir. Lineer polarizasyona sahip bir anten, eş genlik ve aralarında 90° faz farkı ile beslenmesi durumunda dairesel polarizasyona sahiptir (Çalışkan 2014). Dairesel polarizasyonda alan vektörü, yatay ve düşeydeki her düzlemde enerji yayar. Dairesel polarizasyon faz farkına göre, sol el dairesel polarizasyon ve sağ el dairesel polarizasyon olarak ikiye ayrılır. Eğer dairesel polarizasyon saat yönündeyse (CW) sağ el dairesel polarizasyon, saat yönünün tersi ise (CCW) sol el dairesel polarizasyon olarak ifade edilmektedir. Denklem 3.8'te belirtildiği gibi faz farkı hesaplamalarında, dalga yayılımının tersi alındığında (+z yönü) fazlar yer değiştirir (Balanis 2005).



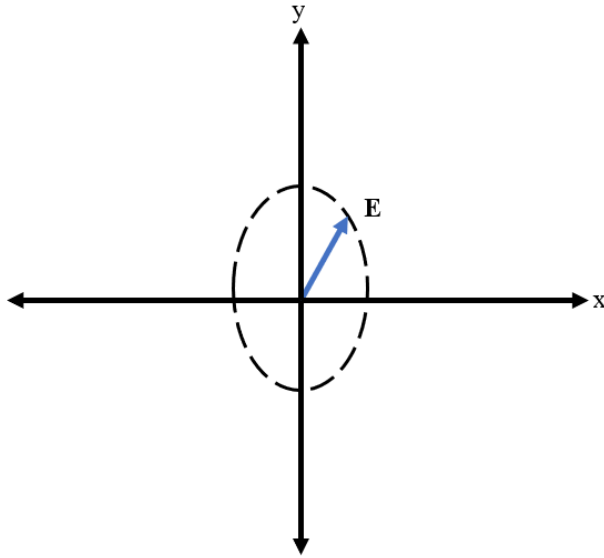
Şekil 3.3. Dairesel polarizasyon

$$|\xi_x| = |\xi_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (3.7)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0,1,2,3\dots; \text{ (CW için)} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0,1,2,3\dots; \text{ (CCW için)} \end{cases} \quad (3.8)$$

3.1.2.3. Eliptik Polarizasyon

Eliptik polarizasyon, elektrik alan vektörünün hareketi elips gösterecek şekilde yayılımını meydana geldiği polarizasyondur. Eliptik polarizasyon 2 farklı durum için ifade edilir. Bunlardan ilki elektrik alan vektörünün iki doğrusal bileşen arasında genliklerin birbirinden farklı olduğu ve faz farklarının $\pi/2$ tek katları durumunda geçerlidir. İkinci durum ise herhangi bir genlik değeri gereksinimi bulunmadan farklı iki bileşen arasındaki zaman faz farkının $\pi/2$ tam katlarından farklı olduğu durumlardır. Eliptik polarizasyon, dairesel polarizasyonda olduğu gibi sağ el eliptik polarizasyon (CW) ve sol el eliptik polarizasyon (CCW) olarak ayrılmaktadır. Sağ el eliptik polarizasyon ise alan vektörünün saat yönünde hareket etmesidir. Sol el eliptik polarizasyon, elips şeklinde oluşan alan vektörünün saat yönünün tersinde meydana gelmesidir. Eliptik polarizasyonun elde edilmesindeki 2 farklı durum için zaman faz farkı ve genlik arasındaki ilişki denklem 3.9-3.11 arasında belirtilmektedir.



Şekil 3.4. Eliptik polarizasyon

1.durum için;

$$|\xi_x| \neq |\xi_y| \Rightarrow E_{x0} \neq E_{y0} \quad (3.9)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi; & \text{(CW için)} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi; & \text{(CCW için)} \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.10)$$

2.durum için;

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi = \begin{cases} > 0; & \text{(CW için)} \\ < 0; & \text{(CCW için)} \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.11)$$

3.1.3. Geri Dönüş Kaybı

Geri dönüş kaybı, bir antenin karakteristiğine bağlı yayılımı veya iletimi durumlarında sinyal gücünün ne kadarının geri yansıdığını ifade etmektedir. Antenlerde geri dönüş kaybı, empedans uyumlanmadığı zaman yansıyan dalgalarla meydana gelir. Antenlerde geri dönüş kaybı S_{11} olarak ifade edilir ve birimi dB'dir. Bir antende geri dönüş kaybı -10 dB ve daha düşük olduğunda o frekans aralığında antenin çalıştığını ifade etmektedir (Shui 2021).

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (3.12)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right| \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklemlerde ifade edilen;

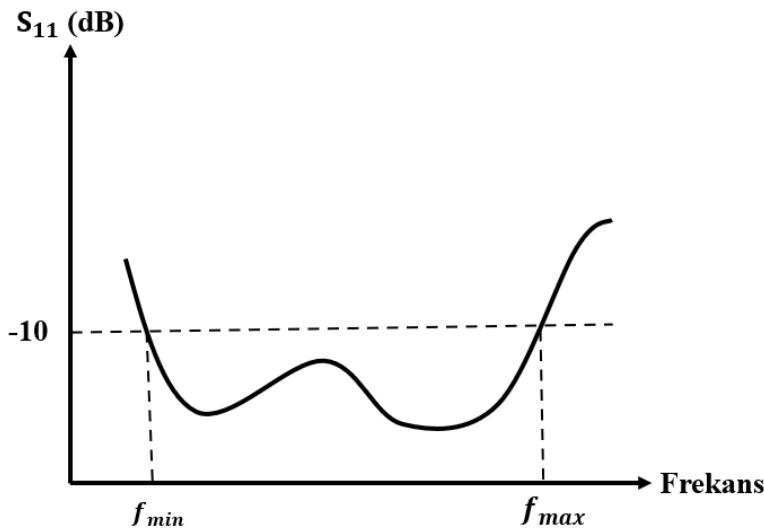
Γ : Yansıma katsayısını,

Z_L : Yük empedansını,

Z_0 : İletim hattının karakteristik empedansını tanımlamaktadır.

3.1.4. Bant Genişliği

3.1.3 bölümünde de ifade edildiği gibi bir antenin çalıştığı frekans aralığında geri dönüş kaybının -10 dB kalması beklenmektedir. Bant genişliği, antenin çalıştığı üst frekans ($f_{\max}$) ile alt frekans ($f_{\min}$) arasındaki fark olarak hesaplanmaktadır. Bant genişliği, yüzdesel olarak da ifade edilebilmektedir. Denklem 3.16'da bant genişliğinin yüzde olarak nasıl hesaplandığı ifade edilmektedir. Bant genişliği, geniş bant genişliği ve dar bant genişliği olmak üzere kullanım amaçlarına göre ikiye ayrılmaktadır. Güvenlik, GPS gibi bölgelerde dar bant kullanılırken haberleşme sistemleri için geniş bant tercih edilmektedir (Gül 2019).



Şekil 3.5. Antenin bant genişliği

$$BW = f_{\max} - f_{\min} \quad (3.14)$$

$$f_c = (f_{\max} + f_{\min})/2 \quad (3.15)$$

$$BW(\%) = \left[\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \right] \times 100 = \left[\frac{f_{\max} - f_{\min}}{(f_{\max} + f_{\min})/2} \right] \times 100 \quad (3.16)$$

Denklem 3.14-3.16'da belirtilen;

$f_{\max}$: Üst frekansı,

$f_{\min}$: Alt frekansı,

f_c : Merkez frekansı göstermektedir.

3.1.5. Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)

Gerilim duran dalga oranı (VSWR), antenden gelen gücün empedans eşleşmemesinden kaynaklı olarak oluşan kaybın bir ölçüsüdür. VSWR değeri, antenin iletim hattındaki maksimum gerilim değerinin minimum gerilim değerine oranı olarak hesaplanmaktadır. VSWR değeri teorik olarak en küçük 1 olabilir ancak antenlerde empedans kaynaklı çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. VSWR değeri ne kadar küçükse, anten empedans uyumunun o kadar iyi olduğunu ifade etmektedir. VSWR değerinin büyük olduğu durumda antenin enerjisinin büyük bir miktarının geri yansıdığı anlamını taşımaktadır. Antenin çalıştığı frekans aralığı içinde VSWR değerinin 2'den küçük olması beklenmektedir.

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.17)$$

Denklem 3.17'de belirtilen;

$V_{\max}$: İletim hattı üzerindeki maksimum gerilim değerini,

$V_{\min}$: İletim hattı üzerindeki minimum gerilim değerini tanımlar.

3.1.6. Yönlülük

Yönlülük, antenin belirtilen yöndeki ışıma şiddetinin tüm yönlerde meydana gelen ortalama ışıma şiddetine oranıdır. D ile ifade edilir. Matematiksel olarak yönlülük denklem 3.18'deki gibi hesaplanır. Bir antenin yönlülük değeri ne kadar büyük olursa, antenin odak noktasının iyi olduğu ve daha uzak yerlere ışıma yapabileceğini ifade eder. Bir antenin yönlülük değeri ifade edilmesiyse maksimum ışıma şiddetinin yapıldığı yer için hesaplama yapılır.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (3.18)$$

$$D_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (3.19)$$

Denklem 3.18-3.19'da;

P_{rad} : Toplam ışıyan gücü (W),

D: Yönlülüğü (boyutsuz),

U_0 : Yön bağımsız kaynağın ışıma şiddetini (W/birim katı aç),

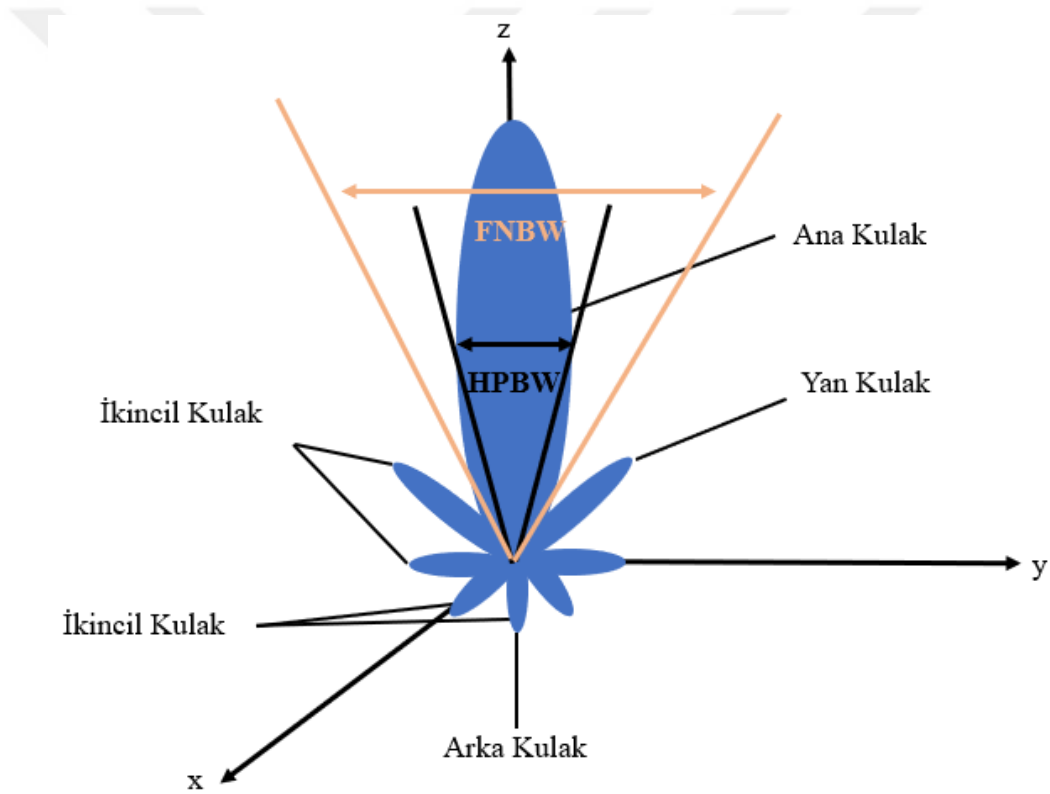
U: Işıma şiddetini (W/birim katı aç),

$U_{\max}$: Kaynağın maksimum ışıma şiddetini (W/birim katı aç) tanımlamaktadır.

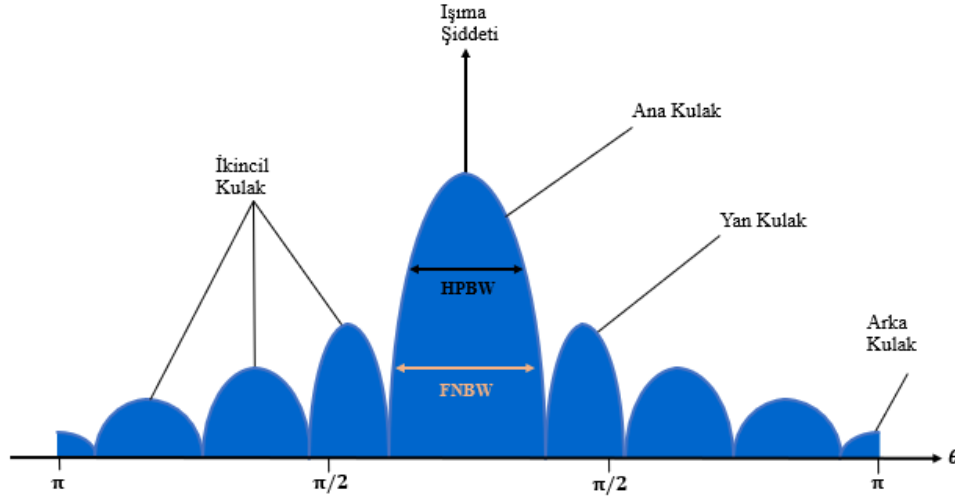
3.1.7. Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü, yayılan elektrik alanın matematiksel veya grafiksel formda uzay koordinatlarında modellenmesidir. Yapılan bu modelleme antenin karakteristik özelliklerini ortaya koymaktadır.

Işıma örüntüsü, ana lob, yan lob ve arka loblardan oluşur. Ana lob antenin en yüksek ışıma yaptığı bölgedir. Yan loblar ise antenin ana lobu dışındaki istenmeyen bölgedir. Yan loblar mümkün oldukça düşük olarak istenmesinin sebebi, oluşan yan loblar sonucunda, enerjinin boşa harcanması ve o bölgede çalışan diğer ekipman veya antenler arasında istenmeyen girişimler oluşturabilmesidir. Anten tasarımlarında genellikle yan lobların -20 dB'den daha düşük olması istenmektedir. Arka lob, ana lobun tam tersi yönünde meydana gelen ışımadır. Işıma örüntüsü antenin karakteristiğinin görülmesini sağlar. Işıma deseni modellenmesine bakılarak antenin hangi yönde ışıma yaptığı, yaptığı ışıma şiddeti, faz ve polarizasyon karakteristikleri belirtilmiş olur.



Şekil 3.6. 3D ışıma örüntüsü ve kulakların gösterimi



Şekil 3.7. Doğrusal formda güç örüntüsü ve kulakların gösterimi

3.1.8. Hüzme Genişliği

Hüzme genişliği, gücün büyük bir bölümünün yayıldığı bölge olan ana lobun açısal açıklığıdır. Antenlerde birden fazla hüzme genişlikleri bulunmaktadır. Ancak en çok kullanılan hüzme genişliği, Yarı Güç Hüzme Genişliği (HPBW) ve İlk Sıfır Hüzme Genişliği (FNBW)'dir. Şekil 3.6'da hüzme genişliklerinin ışıma örüntüsünde gösterimi belirtilmektedir.

FNBW, ana loba bitişik gücün ilk 0'a eşit olduğu yerler arasındaki açıdır. HPBW, gücün maksimum olduğu yerden 3 dB altında bulunan yerdeki açısal genişliktir. Ölçülen yer maksimum gücün yarıya düştüğü bölgeyi tanımlamaktadır. Radyan veya derece cinsinden, yatay veya dikey olarak ifade edilir. Hüzme genişliği, antenin kapsama alanını ve yönlülüğünü ifade etmektedir. Hüzme genişliğinin dar olması, uzun menziller için uygunken, geniş bir hüzme genişliği dar bir alanı kapsamaktadır.

3.1.9. Anten Verimi

Anten verimi, antenin girişinde ışıma yaptığı sıradaki kayıpları hesaba katmak için hesaplanmaktadır. Antenlerde meydana gelen kayıplar sonucunda antenin verimi azalmaktadır. Antenin polarizasyonu, empedans uyumsuzluğu ve oluşan geri dönüş kayıpları, dielektrik kayıplar, anten verimine etki eden faktörlere örnek olarak verilebilir.

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (3.20)$$

Denklem 3.20'de, e_0 : Toplam verimliliği, e_r : Yansıma verimliliği, e_c : İletim verimliliği, e_d : Dielektrik verimliliği ifade etmektedir.

3.1.10. Anten Giriş Empedansı

Anten giriş empedansı, antenin giriş terminalindeki gerilim değerinin akım değerine oranı ya da antenin elektrik alanının manyetik alanına oranı olarak ifade edilir. Elde edilen bu empedans reel ve imajiner formda hesaplanır. Denklem 3.21’de antenin giriş empedansı ifade edilmektedir.

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3.21)$$

Denklem 3.21’de belirtilen formülde,

Z_A : Antenin a ve b terminalleri arasındaki empedansını (Ω),

R_A : Antenin a ve b terminalleri arasındaki direncini (Ω),

X_A : Antenin a ve b terminalleri arasındaki reaktansını (Ω) ifade etmektedir.

Denklem 3.21’de belirtilen R_A , antenin ışıma direnci ve antenin kayıp direncinden oluşmaktadır. Denklem 3.22’de ifade edilmektedir.

$$R_A = R_r + R_L \quad (3.22)$$

R_r : Antenin ışıma direncini,

R_L : Antenin kayıp direncini göstermektedir.

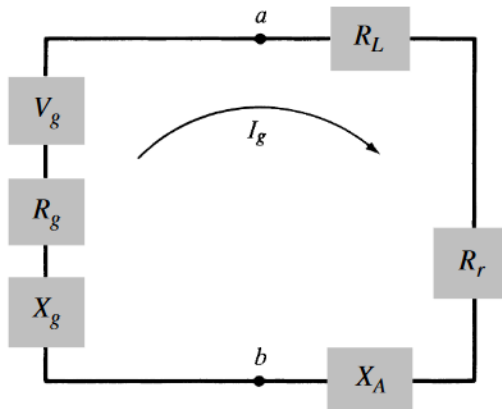
Şekil 3.8’de Thevenin eşdeğer modellemesi belirtilmiştir. Belirtilen modellemede;

R_g : Üreteç empedansının direncini (Ω),

X_g : Üreteç empedansının reaktansını (Ω),

Z_g : Antenin iç empedansını tanımlamaktadır.

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (3.23)$$



Şekil 3.8. Antenin Thevenin eşdeğer devresi (Balanis 2005)

3.1.11. Antenin Işıma Bölgeleri

Antenin ışıma yaptığı bölgeler reaktif yakın alan, ışıyan yakın alan (Fresnel) ve uzak alan (Fraunhofer) bölgeleri olmak üzere 3 başlık altında incelenmektedir. Bu ayrım antenin uzunluğu (D), dalga boyu ve sınır değerlere (R_1, R_2) göre ifade edilmektedir. Şekil 3.9'da antenin ışıma yaptığı bölgeler belirtilmiştir. Antenin ışıma yaptığı her bölge için, anten boyutu dalga boyu ilişkisi bulunmaktadır.

Reaktif yakın alan bölgesi, antene yakın olan kısmı ifade etmektedir. Reaktif yakın alan bölgesi denklem 3.24'te ifade edildiği koşul durumunda meydana gelir.

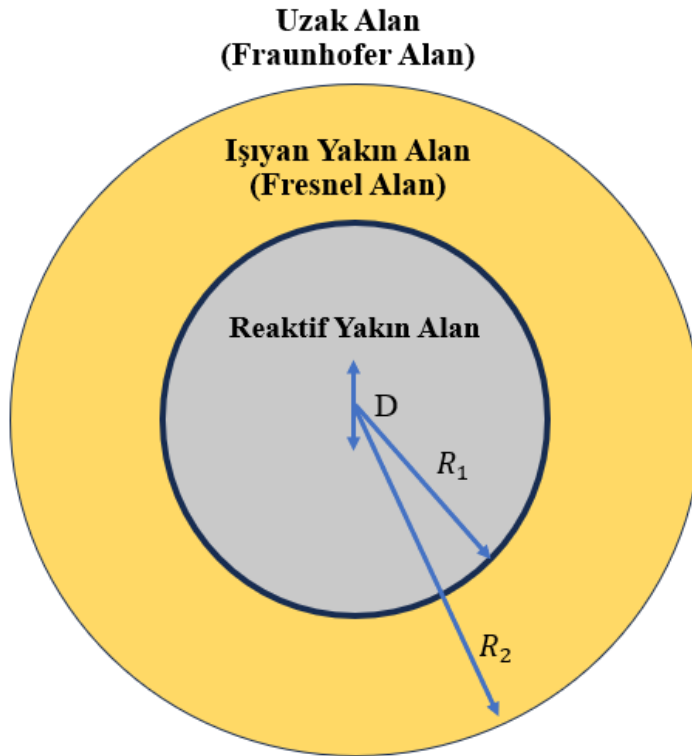
$$R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (3.24)$$

Işıyan yakın alan, reaktif yakın alan bölgesi ile, uzak alan arasındaki bölgeyi ifade eder. Antenin ışıma karakteristiği, reaktif yakın alan bölgesine göre daha etkilidir. Eğer antenin boyutu, dalga boyundan küçükse bu bölge oluşamayabilir. Bu bölgenin sınır bölgeleri denklem 3.25'te belirtilmektedir.

$$0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda \quad (3.25)$$

Uzak alan bölgesi, açısal alan dağılımının bağımsız olduğu bölgeyi ifade etmektedir. Antenin ışıma karakteristiği bu bölgede mesafeye göre değişmez. Denklem 3.26'da sınır bölgeleri ifade edilmiştir.

$$R > 2D^2/\lambda \quad (3.26)$$



Şekil 3.9. Anten ışıma bölgeleri

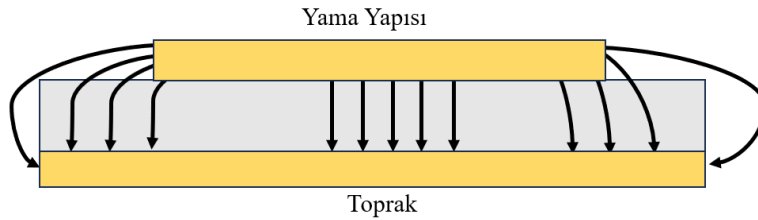
3.2. Mikroşerit Anten

Mikroşerit antenler üzerine ilk çalışma, 1953 yılında Deschamps ile başlamıştır. Devamında 1955 yılında, H. Gutton ve G. Baissino patent çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Ancak 1970 yıllarından itibaren mikroşerit antenler üzerine çalışmalar başlamıştır. Mikroşerit antenler, yama anten olarak da ifade edilmektedir. Zemin düzlemi, yama yapısı, dielektrik malzeme ve besleme yapısı olmak üzere 4 bölümden meydana gelmektedir. Avantajları sebepleri ile birçok farklı alanda tercih edilen anten tiplerinden biridir. Bu sebeple üzerine çalışmalar artarak devam etmektedir.

Kullanım alanlarına başlıca;

- Radyo ve telsiz sistemleri,
- Uydu görüntüleme sistemleri,
- GPS,
- Wi-Fi,
- Biyomedikal alanları örnek olarak verilebilir.

Mikroşerit antenin çalışma prensibi temel olarak, ince bir metalik yapının üzerine dielektrik bir altlık malzeme kullanılarak tasarlanır. Dielektrik yapının üzerinde bir yama yapısı bulunmaktadır. İletken yapının yama yapısı uyarılmasıyla, yama yapısında yer düzlemine göre hareket eden bir elektromanyetik dalga meydana gelir. Yer düzleminden hareket eden dalgalar boşluğa yayılır. Yama yapısının kenar noktalarında saçaklanma (fringing effect) meydana gelir. Oluşan saçaklanma ile antende ışıma oluşur. Saçaklanma etkisi, tasarımı yapılan mikroşerit antenin yama yapısına, kullanılan dielektrik malzeme, besleme yapılarına göre değişkenlik göstermektedir.

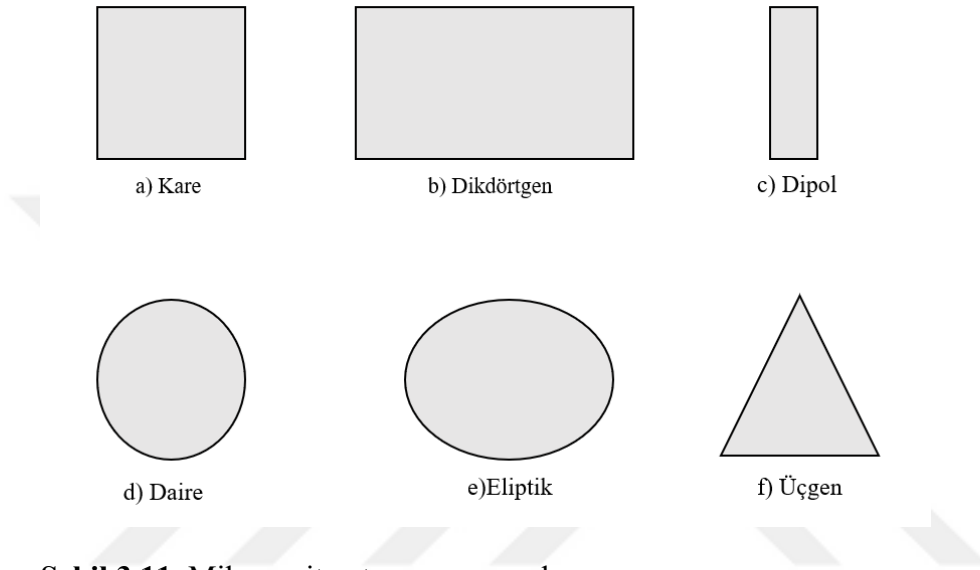


Şekil 3.10. Mikroşerit antende saçaklanma görüntüsü

Mikroşerit anten tasarımlarında farklı dielektrik malzemeler de kullanılabilir. Dielektrik malzeme seçiminde, düşük dielektrik sabitine (ϵ_r) sahip ve kalın bir altlık malzeme kullanımı tercih edilir. Bu tarzda bir altlık malzeme seçimi, bant genişliğinin artmasına ve antenin verimli çalışmasına sebep olmaktadır. Bu sayede kayıpları en aza indirebilecek tasarımlar gerçekleştirilir. Ancak özellikle mikrodalga devrelerinde sınırlamaya ihtiyaç duyulmasından kaynaklı olarak yüksek ϵ_r değerine sahip ve kalın dielektrik malzemeler tercih edilmektedir. Fakat bu tür özelliğe sahip malzemeler, düşük dielektrik sabitli malzemelere göre daha düşük verime sahiptirler (Balanis 2005). Dielektrik malzeme olarak literatür çalışmalarında FR-4 sıklıkla tercih edilen malzemelerden biridir. Bu malzemenin tercih edilmesinin sebepleri başlıca; düşük maliyete sahip olması ve kolay bir şekilde temin edilebilmesidir. FR-4 malzeme epoksi reçine ve fiber camın birlikte kullanılmasıyla meydana gelen yalıtkan bir malzemedir (Ulu 2020). Malzemenin ϵ_r değeri $3.8 \leq \epsilon_r \leq 4.8$ aralığındadır. Çalışmalarda FR-4

malzemenin $\epsilon_r=4.3$, malzemenin kalınlığı ise 1.6 mm olarak tanımlanabilmektedir (Keskin 2019).

Mikroşerit anten tasarımlarında birçok yama yapısı kullanılmaktadır. Yama yapıları örnekleri şekil 3.11’de belirtilmektedir. Yapılan çalışmalarda yama yapısı olarak kare, dikdörtgen ve daire yapıları üretim kolaylığı ve ışıma karakteristiklerine göre tercih edilen yama yapılarının başında gelmektedir. Şekil 3.11’de belirtilen yama yapıları dışında, mikroşerit anten tasarımlarında, anten karakteristiklerine bağlı olarak farklı yama yapıları da tercih edilebilmektedir.

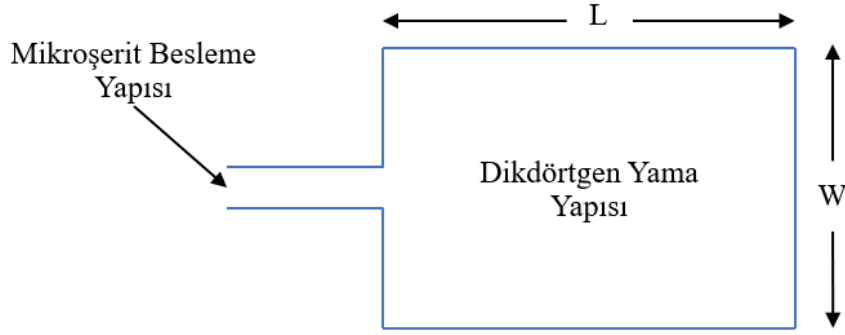


Şekil 3.11. Mikroşerit anten yama yapıları

Mikroşerit antenlerde sıklıkla tercih edilen besleme yöntemleri başlıca;

- Mikroşerit besleme
- Koaksiyel besleme
- Açıklık Kuplajlı
- Yakınlık Kuplajlı besleme yöntemleridir.

Mikroşerit besleme, eş yüzeyli besleme olarak da isimlendirilmektedir. Yama yapısının tek taraflı üretilmesiyle, kolay bir üretime sahiptir. Ancak dielektrik malzemenin kalınlığının artmasına sebep olur, bu da bant genişliğinin %2-%5 oranında azalmasına ve dielektrik malzemenin kalınlığının artması giriş empedansını besleme şeridinin arasına eklenmesiyle oluşur. Anten tasarımlarında empedans uyumu önemli bir parametredir. Mikroşerit besleme uzunluğu, antenin empedans uyumuna göre belirlenmektedir (Can 2010).



Şekil 3.12. Mikroşerit besleme yapısı

3.2.1. Mikroşerit Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları

- Küçük boyutludur ve düşük bir ağırlığa sahiptir.
- Küçük yapılara kolay bir şekilde entegre edilebilir.
- Seri üretim kolaylığına sahiptir.
- Küçük değişiklikler ile farklı beslemeler yapılarak, farklı polarizasyonlarda kullanılabilirler.
- Mikrodalga devrelerine kolayca entegre edilebilirler.
- Farklı frekanslarda çalışabilirler.

Dezavantajlar

- Dar bir bant genişliğine sahiptir.
- Düşük bir anten kazancına sahiptir.
- Dielektrik malzeme dışında iletken kayıpları sebebiyle düşük bir verimliliğe sahiptir.
- Yarı düzlemde ışıma yapabilmektedir.
- Besleme kayıplarının yüksektir.
- Besleme ve bağlantı noktalarında kaynaklı olarak kayıplara sahiptir (Mishra 2016).

3.2.2. Dikdörtgen Yama Yapısına Sahip Mikroşerit Anten Tasarımı

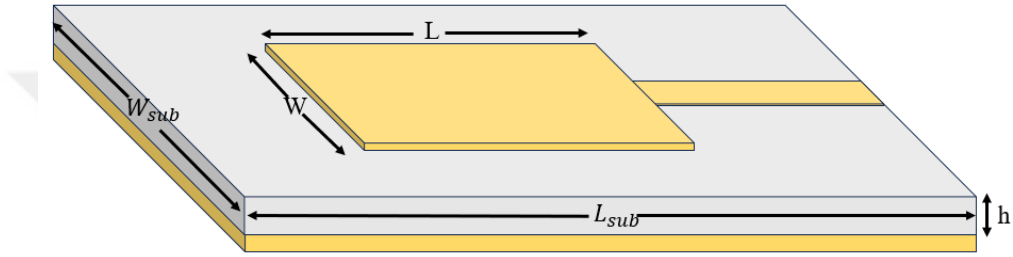
Dikdörtgen yama yapısına sahip mikroşerit anten yapısında,

- Yama kalınlığı (t) ince bir yapı seçilir ($t \ll \lambda_0$). (λ_0 Serbest uzaydaki dalga boyunu ifade etmektedir.)
- Yama uzunluğu (L) $\lambda_0/3 \leq L \leq \lambda_0/2$.
- Dielektrik malzemenin yüksekliği (h) ($h \ll \lambda_0$) $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$
- Kullanılan dielektrik malzemelerin, dielektrik sabit değerleri (ϵ_r) değerleri $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır.

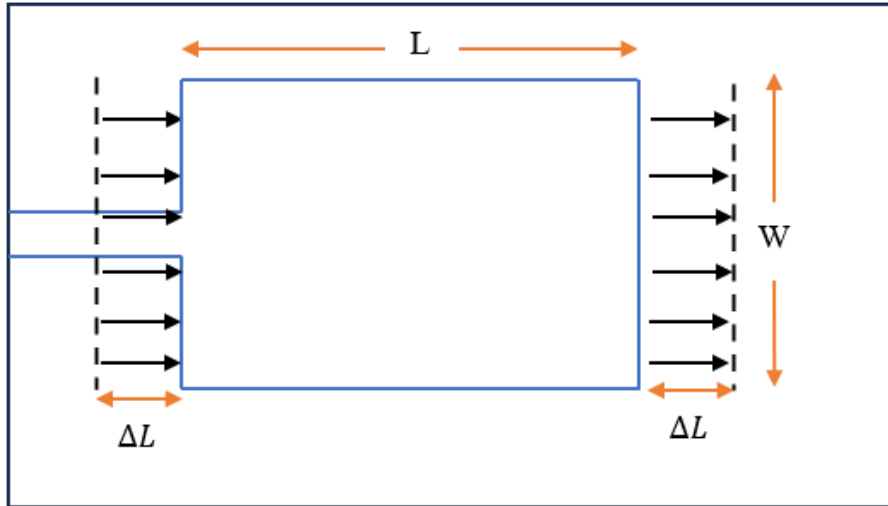
Dikdörtgensel mikroşerit anten tasarımı için aşağıdaki belirtilen parametreler ve formüller kullanılarak tasarımlar oluşturulmaktadır.

Mikroşerit anten tasarımında;

- f_r : Rezonans frekansı,
- W : Yamanın genişliğini,
- ϵ_r : Yalıtkan malzemenin dielektrik katsayısını,
- ϵ_{eff} : Efektif dielektrik sabiti,
- ΔL : Besleme hattının genişliği,
- h : Dielektrik malzemenin kalınlığı,
- L_{sub} : Kullanılan dielektrik malzemenin uzunluğunu,
- W_{sub} : Kullanılan dielektrik malzemenin genişliğini,
- L_{eff} : Yamanın etkin uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 3.13. Mikroşerit anten tasarım parametreleri 3D model



Şekil 3.14. Mikroşerit antenin ışıma çizgileri (2D)

Mikroşerit antenin genişlik ve uzunluk parametreleri denklem 3.27-3.33 arasında ifade edilmektedir (Aldamirejee 2022).

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (3.27)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.28)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (3.29)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.30)$$

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (3.31)$$

$$L_{\text{sub}} = L + 6h \quad (3.32)$$

$$W_{\text{sub}} = W + 6h \quad (3.33)$$

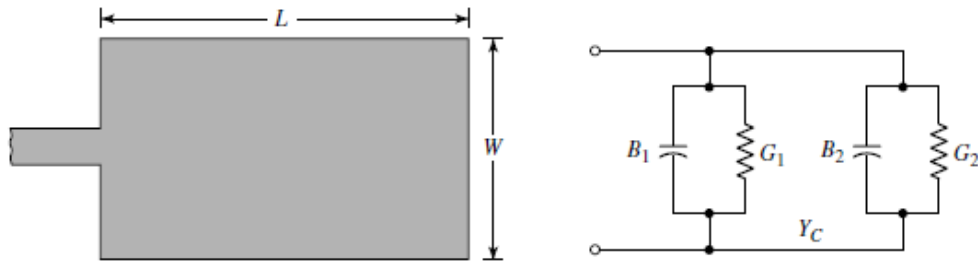
$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.34)$$

Mikroşerit antende meydana gelen saçaklanma etkisinin eklenmesiyle denklem 3.34'te belirtilen rezonans frekansı formülü denklem 3.35'te belirtildiği gibi hesaplanmaktadır. Denklem 3.28'de hesaplanan ϵ_{eff} , $W/h > 1$ durumu içindir (Balanis 2005).

$$f_r = \frac{1}{2(L + 2\Delta L) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (3.35)$$

3.2.3. Dikdörtgen Yama Yapısına Sahip Mikroşerit Anten Eşdeğer Devre Modeli

Mikroşerit anten yapıların eşdeğer devre modelleri iletkenliği (G) ve süseptanstan (B) oluşan paralel γ admintanslarından meydana gelmektedir. Eşdeğer devre modeli çözümü için denklem 3.36-3.44 arasında belirtilmektedir.



Şekil 3.15. Doğrudan temaslı mikroşerit besleme ve eşdeğer devresi (Balanis 2005)

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (3.36)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (3.37)$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0 h)] \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (3.38)$$

$$Y_2 = Y_1, \quad G_2 = G_1, \quad B_2 = B_1 \quad (3.39)$$

$$G_1 = \frac{2P_{\text{rad}}}{|V_0|^2} \quad (3.40)$$

$$P_{\text{rad}} = \frac{|V_0|^2}{2\pi\eta_0} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}\right) \cos\theta}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (3.41)$$

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (3.42)$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}\right) \cos\theta}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (3.43)$$

$$= -2 + \cos(X) + X \text{Si}(X) + \frac{\sin(X)}{X}$$

$$X = k_0 W$$

$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_0} \right)^2 & W \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda_0} \right) & W \gg \lambda_0 \end{cases} \quad (3.44)$$

3.3 Metamalzeme Yapılar

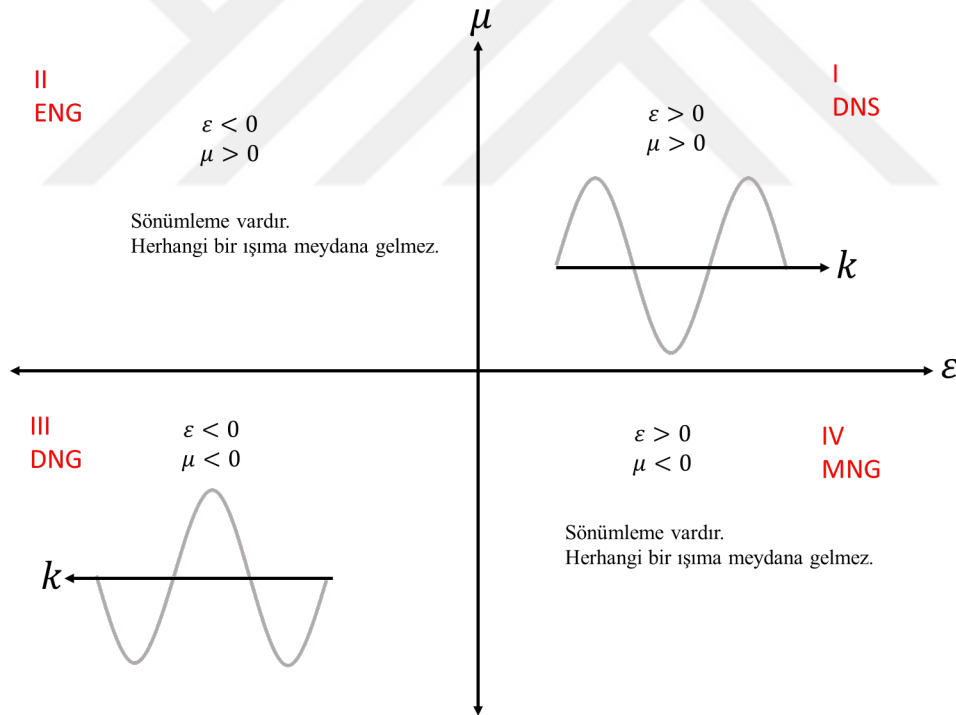
Bir malzemenin elektromanyetik dalga karakteristiği, elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) parametrelerine göre tanımlanmaktadır. Bu parametrelere göre malzemeler 4 sınıfta incelenmektedir (Darwesh 2019).

$\epsilon > 0$ ve $\mu > 0$ malzemeler, Çift Pozitif (DPS) malzemeler olarak isimlendirilmektedir. Dielektrik malzemeler (FR-4 vb.) bu alana örnek olarak verilebilir.

$\epsilon < 0$ ve $\mu > 0$ malzemeler, Epsilon Negatif (ENG) malzemeler olarak isimlendirilmektedir. Elektromanyetik dalgalar sönümlenir ve herhangi bir iletim meydana gelmez. Plazmalar bu malzemelere örnektir.

$\epsilon < 0$ ve $\mu < 0$ malzemeler, Çift Negatif (DNG) malzemeler olarak isimlendirilmektedir. Sadece yapay olarak üretilen malzemeler bu sınıfta yer almaktadır. Metamalzeme yapılar bu sınıfta yer almaktadır.

$\epsilon > 0$ ve $\mu < 0$ malzemeler, Mü Negatif (MNG) malzemeler olarak isimlendirilmektedir. ENG malzemelerde olduğu gibi elektromanyetik dalga sönümlenir ve herhangi bir iletim meydana gelmez. Ferrit malzemeler bu sınıfa örnek olarak verilebilir.



Şekil 3.16. ϵ ve μ parametrelerine göre malzemelerin sınıflandırılması

Malzeme yapılarının ϵ ve μ parametrelerine göre karakteristik özellikleri Maxwell Denklemleri ile ifade edilebilmektedir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.45)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.46)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.47)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.48)$$

Maxwell Denklemlerinde belirtilen;

$\vec{E}$: Elektrik alan vektörünü (V/m),

$\vec{D}$: Elektrik akı yoğunluğunu vektörü (C/m²),

$\vec{H}$: Manyetik alan vektörünü (A/m),

$\vec{B}$: Manyetik akı yoğunluğu vektörünü (Web/m²) ifade etmektedir (Pozar 2011).

Maxwell denklemlerinde akı ve alan vektörlerinin ϵ ve μ arasındaki ilişki aşağıda belirtildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (3.49)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (3.50)$$

Denklem 3.49 ve 3.50’de belirtilen;

ϵ_0 : Havanın elektriksel geçirgenliğini ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-7}$ (F/m)),

μ_0 : Havanın manyetik geçirgenliğini ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)),

ϵ_r : Bağlı elektriksel geçirgenliği,

μ_r : Bağlı manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

Kırılma indisi (n), ϵ ve μ parametreleri ile hesaplanmaktadır. ϵ ve μ parametreleri ile arasındaki ilişkisi denklem 3.51’de belirtilmektedir.

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3.51)$$

Düzlem dalga vektörü ($\vec{k}$) için, elektrik alan ve manyetik alan formülleri, denklem 3.52-3.53’te ile ifade edilir. Belirtilen denklemlerde $n > 0$ ’dır. $n > 0$ olduğu durumlarda sağ el kuralı ile yön tayini gerçekleştirilmektedir. Çift Pozitif malzemelerin (DPS) elektromanyetik dalga vektör yönü sağ el kuralına göre ifade edilmektedir.

$$\vec{k} \times \vec{E} = w\mu\vec{H} \quad (3.52)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -w\epsilon\vec{E} \quad (3.53)$$

Denklemlerde belirtilen, w : Açısal frekansı ifade etmektedir.

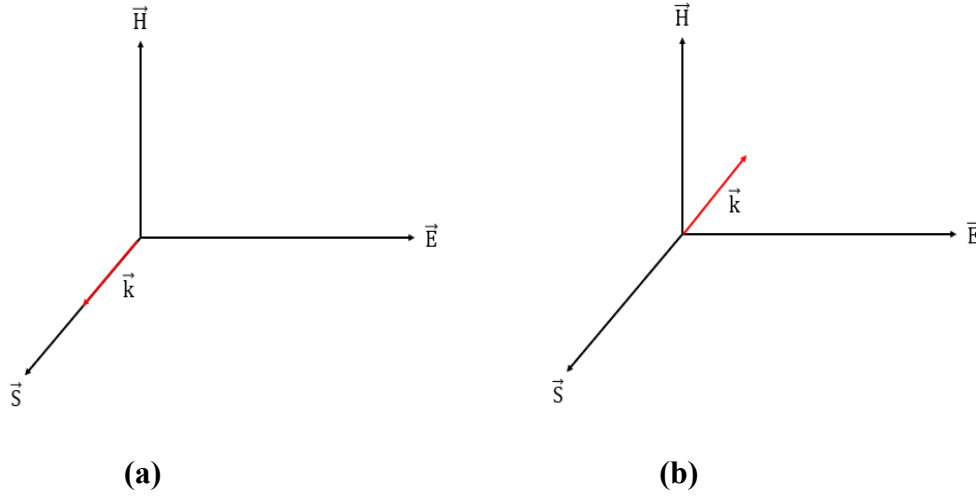
Çift Negatif malzemeler (DNG) sınıfında yer alan metamalzemeler, kırılma indisi negatiftir ve sol el kuralı geçerli olmaktadır (Doğan 2019). Sol el kuralına göre elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine göre elektrik alan ve manyetik alan ilişkisi, denklem 3.54-3.55'te ifade edilmektedir. Şekil 3.17'de sağ el kuralı ve sol el kuralı için $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{k}$, $\vec{S}$ vektörleri arasındaki ilişkisi belirtilmektedir.

$$\vec{k} \times \vec{E} = -w|\mu|\vec{H} \quad (3.54)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = w|\epsilon|\vec{E} \quad (3.55)$$

Pointing vektörü ($\vec{S}$) elektrik alan ve manyetik alan vektörlerinin çarpımı ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.56'da belirtilmektedir (Ülgü 2017).

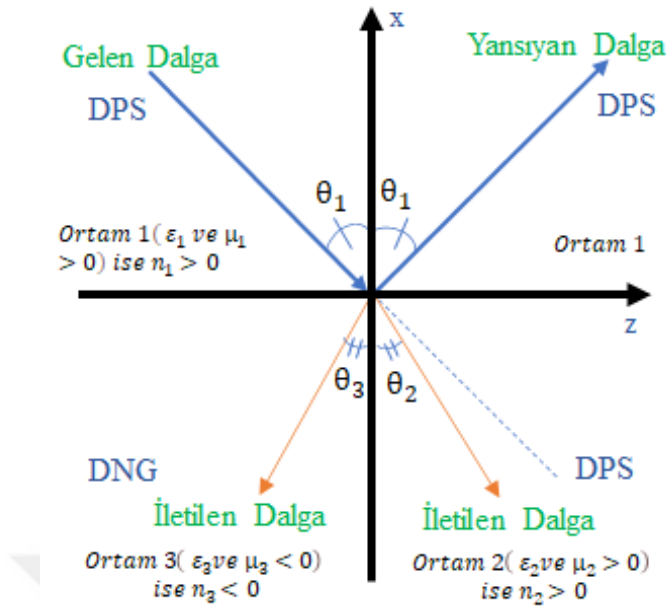
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.56)$$



Şekil 3.17. a) Sağ el kuralına göre vektörel hareket; b) Sol el kuralına göre vektörel hareket

Kırılma indislerinin aralarında yaptığı açı Snell yasası ile ifade edilir. Snell yasası, bir ışının başka bir yüzeye geçerken aralarında yaptığı açılarının sinüslerinin, kırılma indislerine oranı ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.57'de Snell yasasının formülü belirtilmektedir.

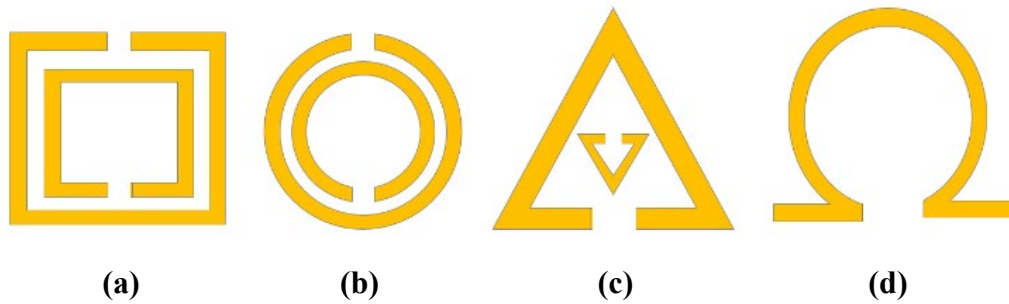
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_2}{\epsilon_1\mu_1}} \quad (3.57)$$



Şekil 3.18. Kırılma indisinin pozitif ve negatif durumları (Koçer 2023)

Metamalzemeler, dalga boyundan daha küçük metal rezonatörlerin yüzeylerinden oluşmaktadır. Küçük olmaları sayesinde elektronik ekipmanlara da kolay bir şekilde entegre edilebilmektedir. Birçok farklı alanda metamalzeme kullanılmaktadır (Dalkılıç 2017). Bu alanlara örnek olarak anten, mikro sensörler, jeofizik, optik alanları örnek olarak verilebilir (Doğan 2012).

Anten uygulamalarında metamalzeme kullanılmasıyla antenlerde enerjinin belirli bir miktarının depolanmasını sağlar ve kayıplarda azalmaya sebep olur. Anten uygulamalarında kullanılan yapılardan biri de literatürde çeşitli çalışmaların da bulunduğu Yarı Halka Rezonatör (SRR) yapılarıdır. SRR yapısı LC devresi olarak ifade edilebilir. SRR yapısında bulunan boşluk kapasitans etki gösterirken, rezonatör yapı indüktif bir etki göstermektedir. Şekil 3.19’da yarı halka rezonatör yapıları belirtilmektedir.



Şekil 3.19. a) Karesel yarı halka rezonatör; b) Dairesel yarı halka rezonatör; c) Üçgensel yarı halka rezonatör; d) Omega rezonatör (Dirlik 2020)

3.4. Nicholson Ross Weir (NRW) Metodu

S parametreleri ile elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik parametrelerinin hesaplanabilmesiyle ilgili çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden biri de Nicholson Ross Weir Yöntemi'dir. Bu yöntem için S_{11} ve S_{21} parametreleri kullanılarak elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri hesaplanabilmektedir (Çakır 2016) (Ateş 2017).

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (3.58)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (3.59)$$

S_{11} ve S_{21} denklemleri kullanılarak elde edilen değişken X parametresi denklem 3.60'da ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır. S parametreleri kullanılarak kök hesabında $|\Gamma_1| < 1$ olması gerekmektedir.

$$X = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)}{2S_{11}} \quad (3.60)$$

Denklem 3.61 ve denklem 3.62'de belirtildiği gibi Yansıma katsayısı (Γ) ve İletim katsayısı (T) hesaplanabilmektedir.

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (3.61)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3.62)$$

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r^* \mu_r^* - \frac{\lambda_0}{\lambda_c}} \quad (3.63)$$

$$\frac{1}{\Lambda} = j \left(\frac{\gamma}{2\pi} \right) \quad (3.64)$$

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma_1}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.65)$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\epsilon_r \mu_r - \frac{1}{\lambda_0^2} \right) = - \left(\left(\frac{1}{2\pi L} \right) \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (3.66)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \frac{1}{T} \right]^2 \right) \quad (3.67)$$

Elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik hesaplamalarında ifade edilen;

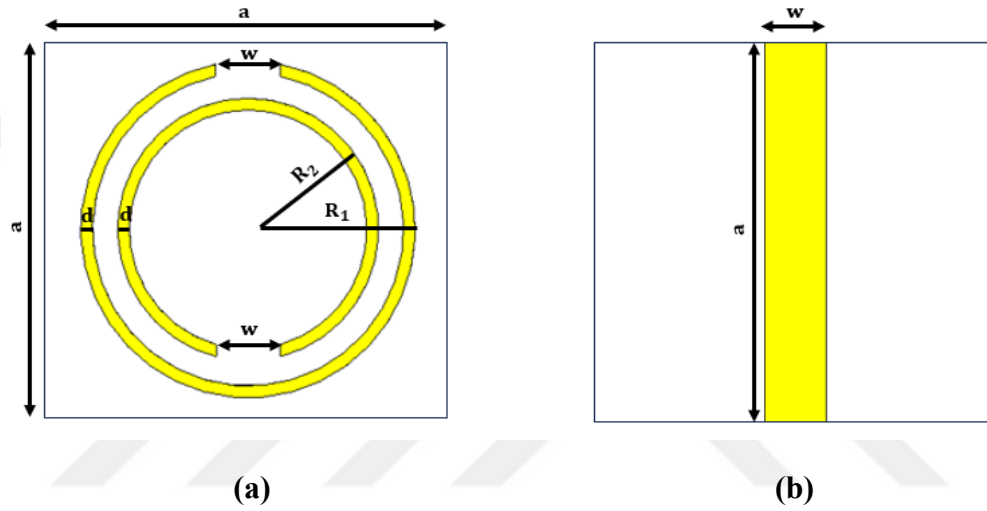
λ_0 : Serbest uzayda dalga boyu,

λ_c : Kesim frekans dalga boyunu tanımlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Metamalzeme Tasarımı

Anten uygulamalarında metamalzeme kullanımı ile ilgili çeşitli modeller tercih edilmektedir. Bu modellerden biri de dairesel yarık halka rezonatörlerdir (C-SRR). C-SRR yapı, CST Microwave Studio programında birim hücre olarak modellenmiştir. C-SRR yapısında, dielektrik malzeme olarak FR-4 malzeme tercih edilmiştir. FR-4 malzemenin elektriksel geçirgenliği 4.3 F/m kalınlığı ise 1.6 mm'dir. Rezonatörler ve zemin düzlemi için bakır malzeme tercih edilmiş olup elektriksel iletkenlik değeri 5.8001×10^7 kalınlığı ise 0.035 mm olarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de C-SRR yapının önden ve arkadan görüntüsü belirtilmektedir.

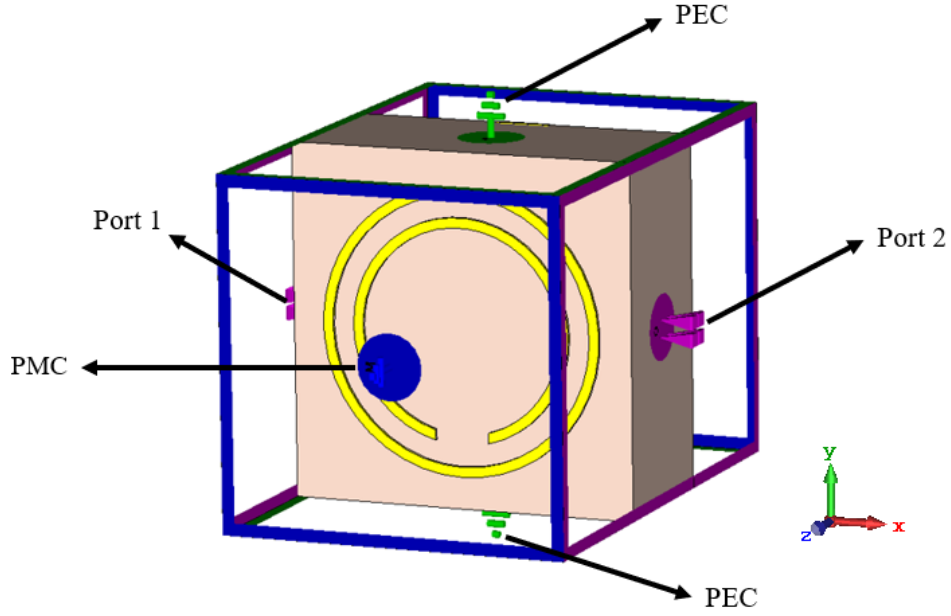


Şekil 4.1. a) C-SRR yapısının önden görüntüsü; b) C-SRR yapısının arkadan görüntüsü

Çizelge 4.1. C-SRR tasarım parametreleri ve boyut bilgileri

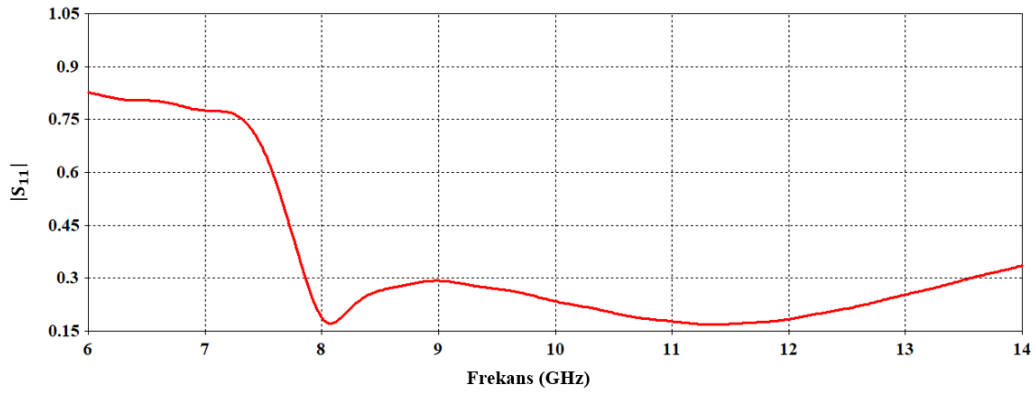
Parametre	Boyut (mm)
a	3.2
R_1	1.45
R_2	1.135
w	0.6
d	0.17

Modellemelerinin tamamlanmasıyla, sınır yüzeylerde manyetik alanın teğet bileşenini sıfıra yaklaştırmak için mükemmel manyetik iletken (PMC) ($\mu_r \rightarrow \infty$) ve elektrik alan teğet bileşenini sıfıra yaklaştırmak için mükemmel elektrik iletken (PEC) ($\epsilon_r \rightarrow \infty$) olarak sınır yüzey şartları sağlanarak analiz edilmiştir. Metamalzemenin sınır yüzey görüntüsü şekil 4.2’de belirtilmektedir.

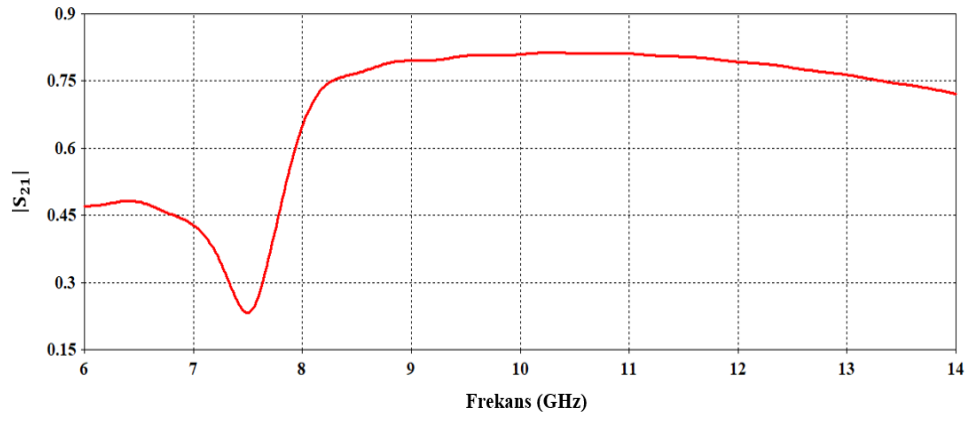


Şekil 4.2. C-SRR yapının sınır yüzey görüntüsü

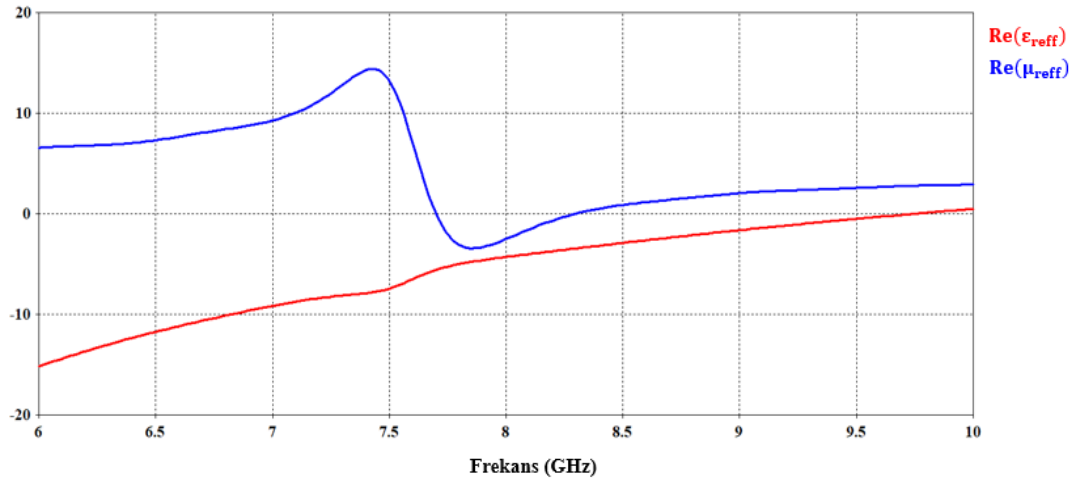
Tasarımı tamamlanan C-SRR yapının 6 GHz - 14 GHz frekans aralığında S parametreleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te ifade edilmiştir.



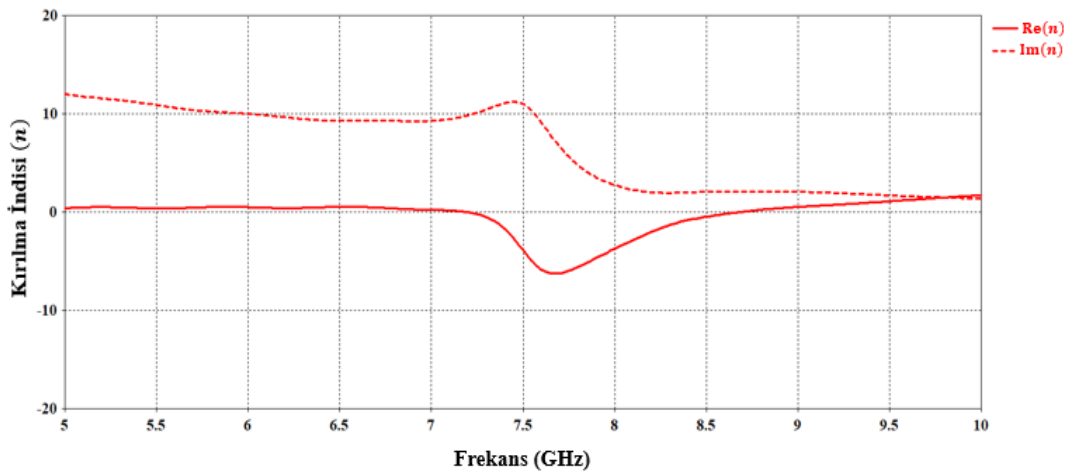
Şekil 4.3. C-SRR yapının $|S_{11}|$ grafiği



Şekil 4.4. C-SRR yapının $|S_{21}|$ grafiği



Şekil 4.5. C-SRR yapının etkin elektriksel geçirgenlik (ϵ_{eff}) ve manyetik geçirgenliklerinin (μ_{eff}) reel formda grafiği



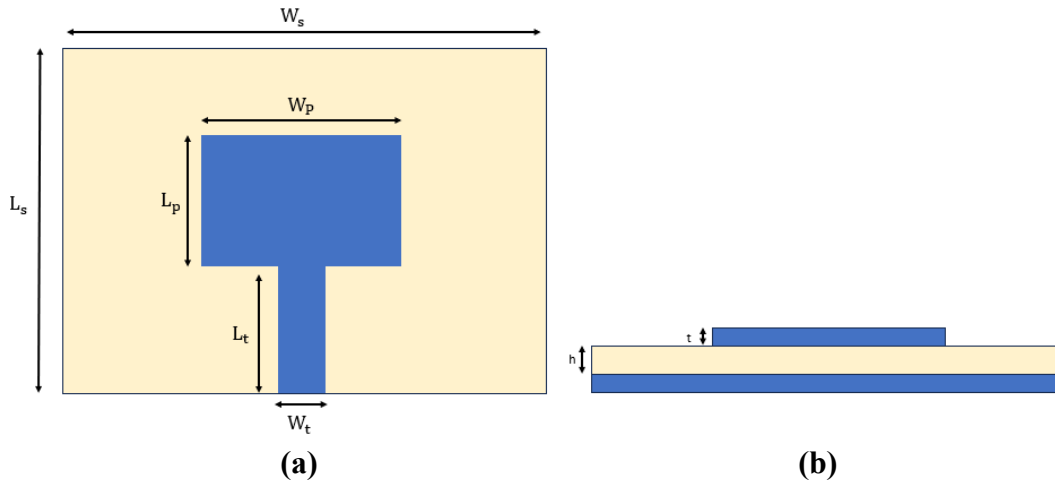
Şekil 4.6. C-SRR yapının kırılma indisinin reel ve imajiner formda grafiği

Metamalzeme, etkin reel elektriksel geçirgenlik ve etkin reel manyetik geçirgenlik değerleri sıfırdan küçük olması beklenir. Tasarlanan C-SRR için, 7.7 GHz - 8.3 GHz frekans aralığında her iki parametrede negatif özellik göstermektedir ve bu sebeple belirtilen frekans aralığında yapının metamalzeme özelliği gösterdiği ifade edilebilir. Şekil 4.6’da belirtilen kırılma indisi grafiğine bakıldığında zaman, 7.2 GHz - 8.7 GHz frekans aralığında $\text{Re}(n) < 0$ ’dır. Ancak metamalzemeler ϵ_{reff} ve μ_{reff} değerlerinin sıfırdan küçük olduğu durumda sol el kuralını sergilemektedir. Bu sebeple ϵ_{reff} ve μ_{reff} grafiklerine 7.7 GHz - 8.3 GHz frekans aralığının dışındaki bölgelerde negatif değerlerdir ve sol el kuralına uymazlar. Bundan dolayı, 7.7 GHz - 8.3 GHz frekans aralığı metamalzeme özelliği gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.2. C-SRR Yapısının Mikroşerit Anten Performansına Etkisi

Mikroşerit anten tasarımında, dikdörtgen yama yapısı ve mikroşerit beslemeye sahip bir anten tasarımı yapılmıştır. Yapılan mikroşerit anten tasarımı için, parametrelerinin belirlenmesinde bölüm 3.1’de belirtilen anten tasarım parametreleri ve formüller kullanılarak numerik olarak hesaplamalar tamamlanmıştır. Bir sonraki aşamada CST Microwave Studio simülasyon programında numerik olan parametrelerin modellenmesi yapıp optimizasyon çalışmaları ile uygun tasarım elde edilmiştir.

Tasarımı yapılan mikroşerit anten için dielektrik malzeme ve toprak yapısında, metamalzeme tasarımı da kullanılan FR-4 malzeme ve bakır tercih edilmiştir. Mikroşerit antenin önden ve yandan görüntüsü şekil 4.7’de belirtilmiştir.



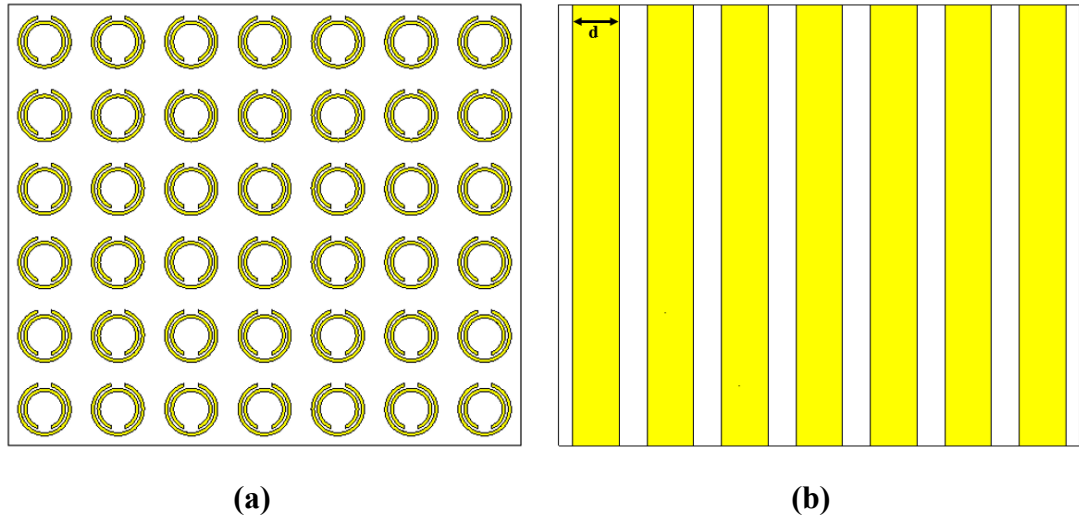
Şekil 4.7. a) Mikroşerit antenin önden görüntüsü; b) Yandan görüntüsü

Mikroşerit antende 8 GHz frekansta çalışan bir tasarım tamamlanmıştır. Mikroşerit antenin tasarımının parametreleri Çizelge 4.2’de ifade edilmektedir.

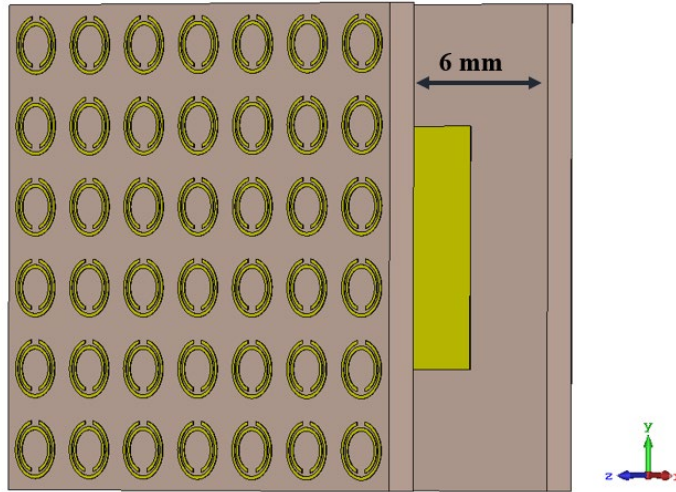
Çizelge 4.2. Mikroşerit antenin tasarım parametreleri ve değerleri

Anten Tasarım Parametreleri	Değeri (mm)
L_s	24
L_p	12
W_s	28
W_p	16.8
L_t	6
W_t	3.1
t	0.035
h	1.6

Tasarımı tamamlanan mikroşerit anten ilk aşamada metalmalzeme bulunmadan analiz edilmiştir. Daha sonrasında, 6×7 C-SRR’den oluşan bir yapı tasarlanıp mikroşerit anten ile arasında 6 mm mesafe bırakılmıştır. 6×7 yapının önden ve arkadan gösterimi Şekil 4.8’te ifade edilmiştir. Projenin özgün yanını da ortaya koyan durum, oluşturulan bu yapıda bakır zeminin çeşitli boyutsal analizleri yapıp mikroşerit anten üzerine performansının incelenmesidir. Şekil 4.9’da 6×7 C-SRR yapısı ile mikroşerit anten yerleşimi ifade edilmektedir.

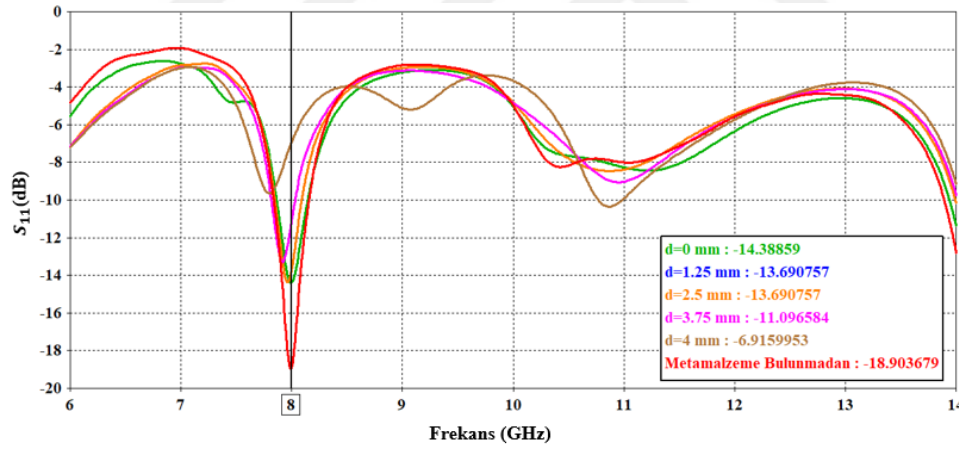


Şekil 4.8. a) 6×7 C-SRR yapısı önden görünümü; **b)** Arkadan görünümü



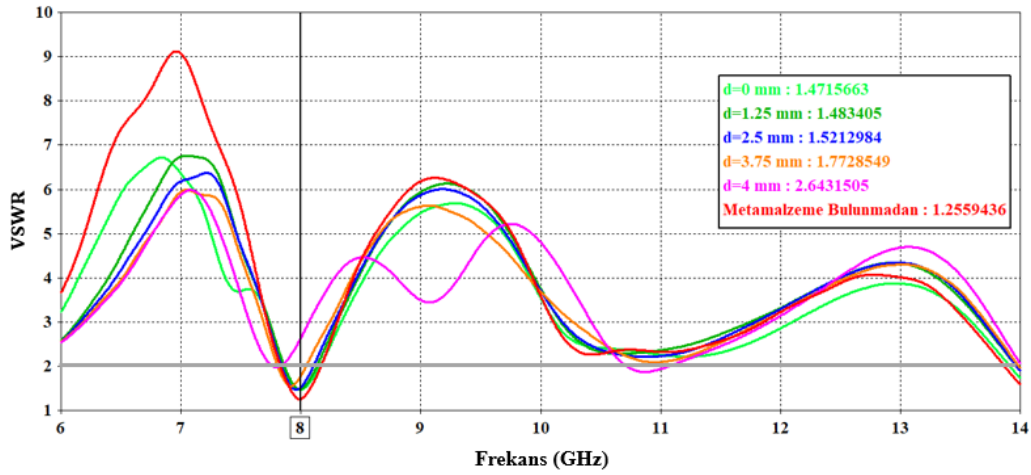
Şekil 4.9. Simülasyon programında 6×7 C-SRR ve mikroşerit anten yerleşimi

Şekil 4.9’da da belirtildiği gibi 6×7 C-SRR yapı ve mikroşerit anten konumlandırılmasının sonraki aşamasında 6×7 C-SRR yapıda bulunan zemin düzlemi ile ilgili çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon ve analiz çalışmalarına göre zemin düzleminin uzunluğu, mikroşerit anten üzerine performans etkisi aşağıdaki şekillerde ifade edilmektedir.



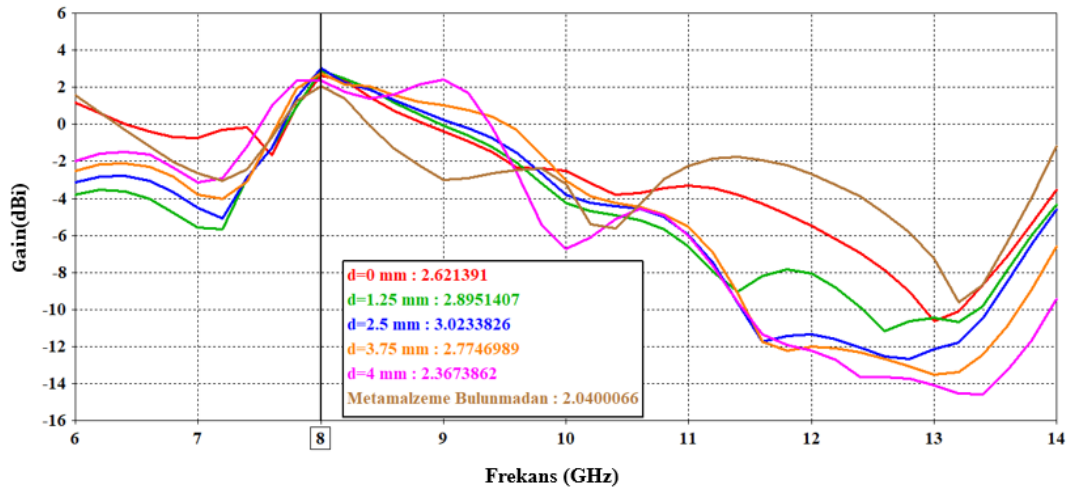
Şekil 4.10. Zemin düzleminin uzunluğunun mikroşerit antenin S_{11} parametresine etkisi

Optimizasyon çalışmalarında 8 GHz’de S_{11} parametresine bakıldığı zaman, ilk olarak metamalzeme bulunmadan mikroşerit antenin S_{11} parametresi yaklaşık olarak -18.9 dB’dir. Zemin düzlemi optimizasyonları aşamasında $d=0$ için, S_{11} değeri -14.39 dB elde edilmiştir. $d=1.25$ mm ve $d=2.5$ mm için, geri dönüş kaybı yaklaşık olarak -13.69 dB’dir. $d=3.75$ mm zemin düzlemine sahip metamalzeme kullanımında ise -11.1 dB sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, $d=4$ mm zemin düzleminde S_{11} parametresi -6.92 dB’dir. Ancak $d=4$ mm için antenin diğer zemin düzlemi optimizasyon sonuçlarından farklı olarak 10.77 GHz - 10.98 GHz frekans aralığında S_{11} parametresi -10 dB’nin altına düşmüştür. Genel olarak metamalzeme kullanımında zemin düzleminin d uzunluğunun artmasıyla S_{11} parametresi yükselmiş olup, $d=4$ mm dışında bütün zemin düzlemleri uzunluğunda 8 GHz için -10 dB’nin altında bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Zemin düzleminin uzunluğunun mikroşerit antenin VSWR parametresine etkisi

Şekil 4.10'da çıkan sonuçların da gösterdiği gibi metamalzeme kullanımındaki zemin düzlemi parametresine bakıldığı zaman S_{11} parametresinde yükselme meydana gelmiştir. S_{11} parametresinin yükselmesinden kaynaklı olarak VSWR parametresinde de metamalzeme kullanımı sonrasında yükseliş meydana gelmiştir. Anten tasarımlarında VSWR değerinin 2'nin altında olması beklenmektedir. Şekil 4.11'de belirtilen grafiğe bakıldığı zaman, metamalzeme bulunmadan mikroşerit anten için 8 GHz'te VSWR değeri yaklaşık olarak 1.26'dır. Metamalzeme kullanımı ile herhangi bir zemin düzlemi bulunmadan ($d=0$ mm) VSWR değeri 1.47, $d=1.25$ mm için 1.48, $d=2.5$ mm için 1.52, $d=3.75$ mm için 1.77'dir. $d=4$ mm için S_{11} parametresi de -10 dB'nin üstüne çıktığı durum olup VSWR değeri de 2.64'tür. $d=4$ mm için yaklaşık 10.88 GHz'te VSWR 2 değerinin altına düşmüş olup 1.87'dir.

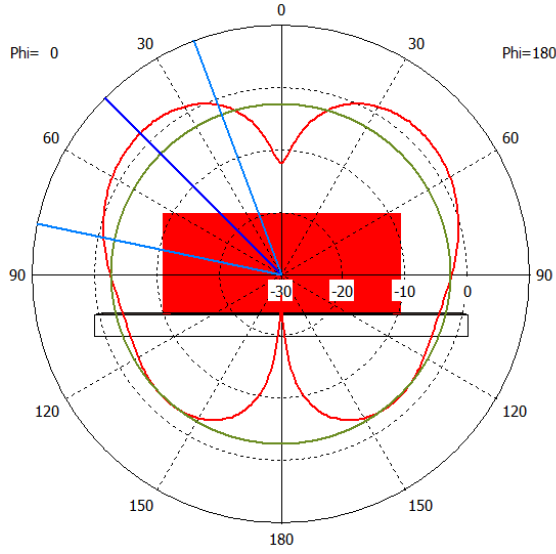


Şekil 4.12. Zemin düzleminin uzunluğunun mikroşerit antenin kazancına etkisi ($\Phi=0$)

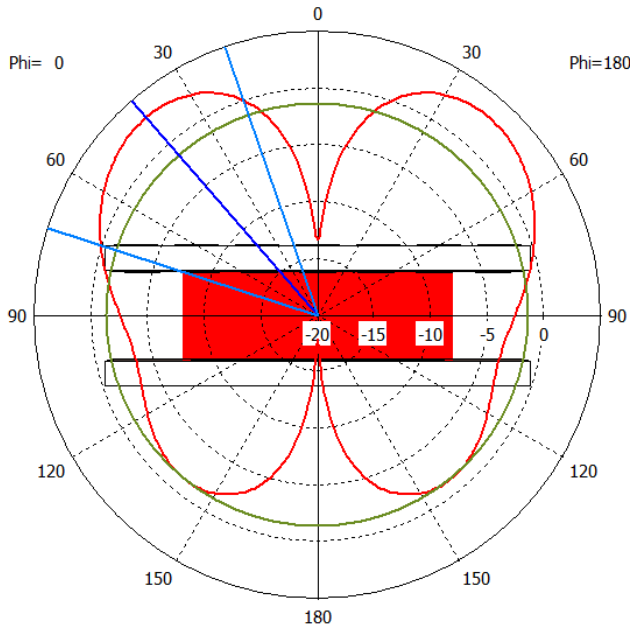
Zemin düzlemi ile ilgili yapılan optimizasyonlar sonucunda $\Phi=0$ durumu için kazanç değerlerine bakıldığı zaman metamalzeme kullanılmadığı durumda 2.04 dBi'dir. Zemin düzlemindeki d parametresinin bütün durumları için kazanç artmıştır. Ancak $d=4$

mm için S_{11} değeri -10 dB'nin ve VSWR değeri de 2'nin üstündedir. $d=0$ mm için antenin kazancı 2.62 dBi, $d=1.25$ mm için 2.9 dBi, $d=2.5$ mm için 3.02 dBi, $d=3.75$ mm için 2.77 dBi ve $d=4$ mm de 2.37 dBi kazanç elde edilmiştir.

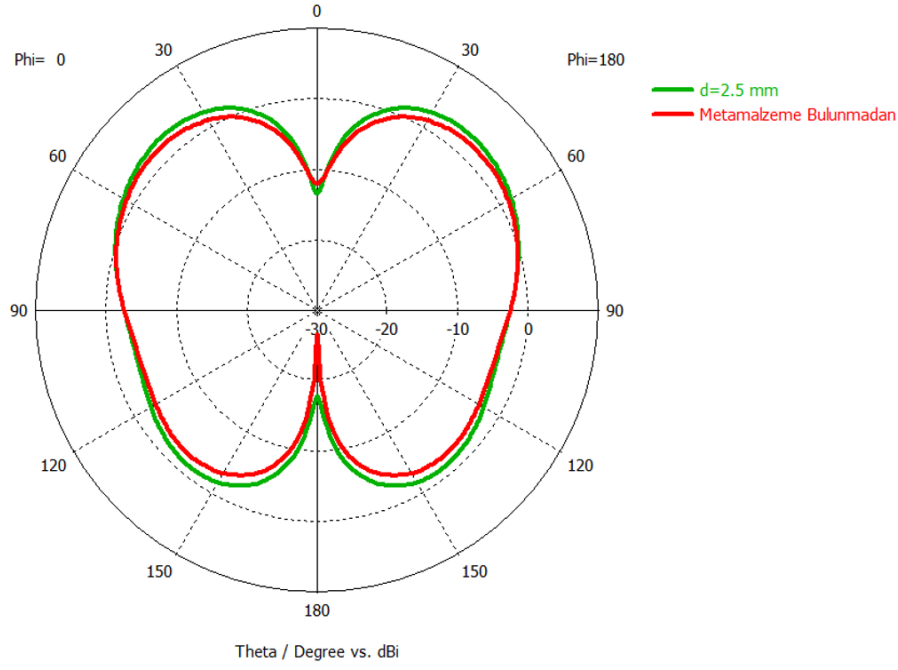
8 GHz'te $\Phi=0$ için en yüksek anten kazancı $d=2.5$ mm de elde edilmiştir. Metamalzeme bulunmadan ve $d=2.5$ mm C-SRR yapı ile polar formda kazanç grafiği şekil 4.13-4.14'te belirtilmektedir.



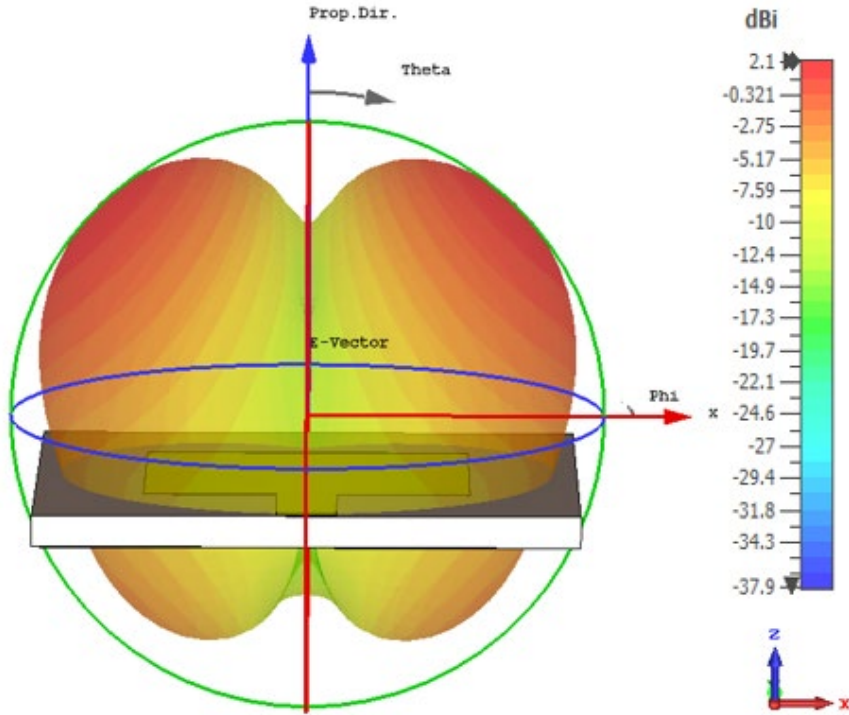
Şekil 4.13. 8 GHz polar formda mikroşerit antenin ışıma örüntüsü sonucu ($\Phi=0$)



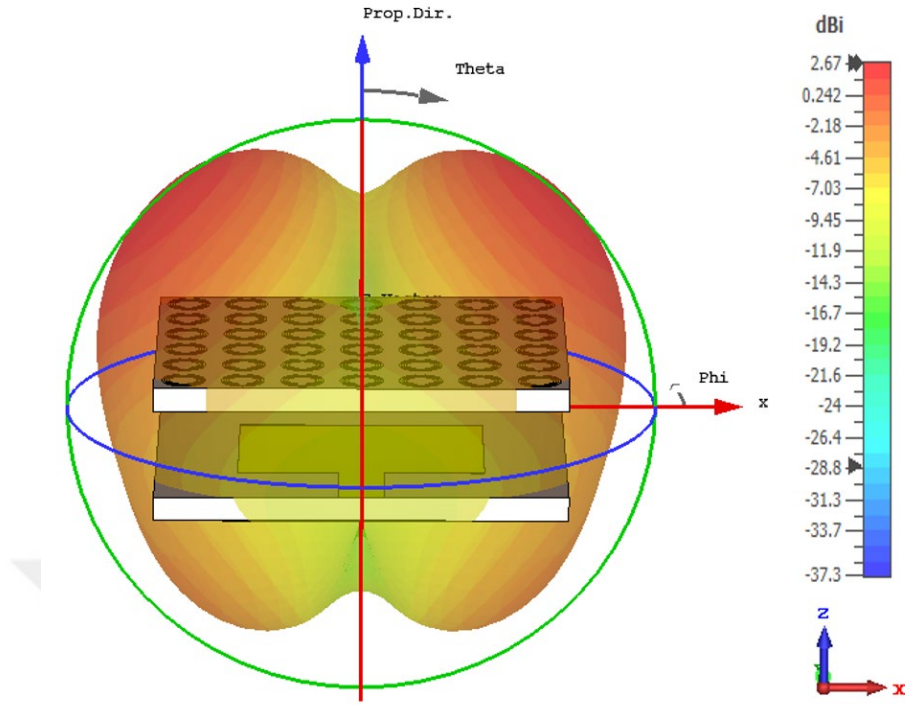
Şekil 4.14. 8 GHz polar formda $d=2.5$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR yapının kullanılmasının mikroşerit antende ışıma örüntüsü sonucu ($\Phi=0$)



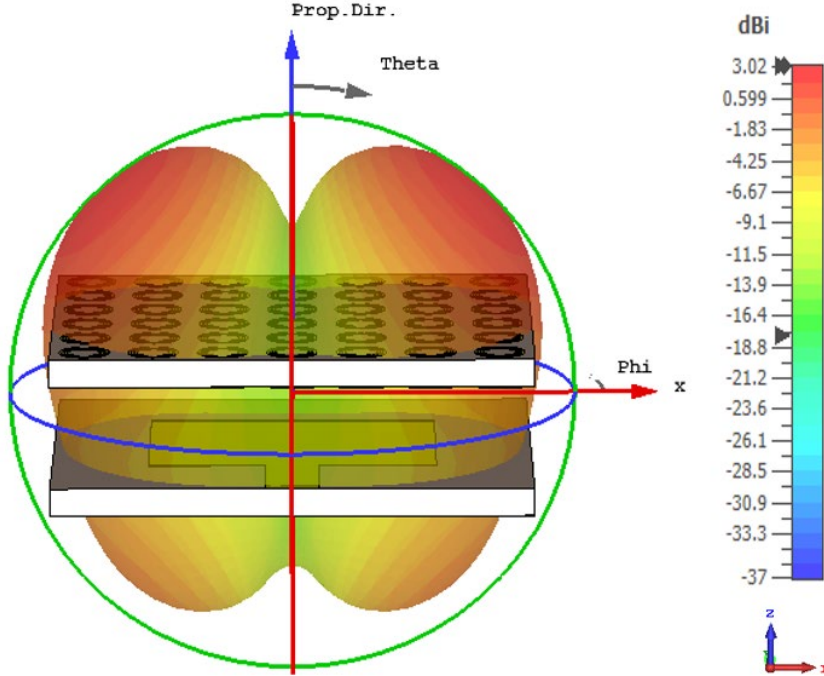
Şekil 4.15. Mikroşerit anten ve $d=2.5$ mm 6×7 C-SRR için polar formda kazanç grafiği karşılaştırılması ($\Phi=0$)



Şekil 4.16. 8 GHz 3D mikroşerit antenin ışıma örüntüsü



Şekil 4.17. 8 GHz 3D $d=0$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR yapının kullanılmasının mikroşerit antende ışıma örüntüsü



Şekil 4.18. 8 GHz 3D $d=2.5$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR yapının kullanılmasının mikroşerit antende ışıma örüntüsü

5. SONUÇLAR

Mikroşerit antenler, haberleşme alanında sıklıkla tercih edilen anten tiplerinden biridir. Artan ihtiyaçlar doğrultusunda üzerine çalışmalar sürekli devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar ile mikroşerit antenlerin, dar bir bant genişliğe sahip olması, düşük bir anten kazancı ve verimliliğe sahip olması gibi dezavantajların azaltılması sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasında da mikroşerit antenin daha yüksek bir anten kazancına sahip olması amaçlanmıştır. Günümüzde de mikroşerit antenlerinin, kazancını arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında metamalzeme tercih edilmiştir. Metamalzemeler, anten uygulamaları dışında RF sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir. Tez çalışmasının özgün yanını da yansıtan, metamalzeme yapıdaki zemin düzleminin uzunluğunun anten performansına etkisi analiz edilmiş olup ve en yüksek anten kazancının sağlandığı uzunluk $d=2.5$ mm olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.1’de metamalzeme bulunmadan, $d=0$ mm 6×7 C-SRR ve $d=2.5$ mm zemin düzleminde 6×7 C-SRR kullanılmasının anten parametrelerine etkisi ifade edilmektedir.

Çizelge 5.1. 8 GHz frekans için, zemin düzlemi yapının eklenmesinin anten tasarım parametrelerine etkisi ($\Phi=0$)

Anten Parametreleri	Metamalzeme Bulunmadan	$d=0$ mm 6×7 C-SRR	$d=2.5$ mm 6×7 C-SRR
S_{11}	-18.9 dB	-14.39 dB	-13.69 dB
VSWR	1.25	1.47	1.52
Ana Hüzme Genliği	2.04 dBi	2.62 dBi	3.02 dBi
Ana Hüzme Yönlülüğü	45°	42°	41°
Açısal Genişlik (3dB)	57.9°	57.3°	53.0°
Yan Hüzme seviyesi	-4.7 dB	-4.5 dB	-4.3 dB

Yapılan bu tez çalışmasında zemin düzlemi optimizasyonu yapılması ile zeminde hiçbir yapı bulunmadığı duruma göre anten kazancı 2.62 dBi yerine 2.5 mm uzunluğunda yapıların eklenmesiyle 3.02 dBi kazanç elde edilmiştir. Yapılan zemin düzlemi optimizasyonu, metamalzemenin de anten kazancına etkisinde daha yüksek bir katkı sağlamış olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Literatürde anten uygulamalarında metamalzeme kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu konu üzerine yapılan çalışma örnekleri ve bu tez tasarımı çizelge 5.2’de ifade edilmektedir.

Çizelge 5.2. Tez çalışması ve literatürde bulunan metamalzeme yapı tasarım örnekleri

Kaynak	Metamalzeme Yapısı	Frekans (GHz)	Kullanılan Dielektrik Malzeme	Mikroşerit Anten Kazancı (dBi)	Metamalzeme Kullanımı ile Mikroşerit Anten Kazancı (dBi)
Dirlik (2020)	S-SRR	3.5 GHz	FR-4	1.41	3.64
Ha vd. (2011)	Planar	3.8 GHz	Teflon	2.36	3.85
Zani vd. (2010)	S-SRR	4.7 GHz	FR-4	4.17	5.66
Bu tez d=0 mm için	C-SRR	8 GHz	FR-4	2.04	2.62
Bu tez d=2.5 mm için	C-SRR	8 GHz	FR-4	2.04	3.02

Çizelge 5.2’de ifade edilen örneklerde de mikroşerit antenlerde anten kazancını arttırmak için metamalzemeler tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalarında gösterdiği gibi metamalzemeler tasarım çeşitliliğine sahiptir. Tasarlanan metamalzeme ve metamalzemenin anten üzerindeki konumu anten kazancına etki etmektedir.

Bu tez çalışmasında zemin düzleminin optimizasyonun yapılmasıyla, metamalzeme performansının anten tasarım parametrelerine katkı sağlaması ifade edilmiştir. Metamalzemeler, anten uygulamaları dışında da RF sektöründen birçok alanda tercih edilmektedir. Yapılan bu optimizasyon çalışmasının ileride bu alanla ilgili yapılacak çalışmalara da önemli bir katkı sağlaması amaçlanmıştır.

İlerleyen süreçte mikroşerit antenler için farklı metamalzeme tasarımları yapılarak anten üzerindeki konumunun anten performansına etkisi ile ilgili optimizasyon çalışmalarının yapılması hedeflenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Aldamirejee, S. A. 2022. Using A Microstrip Patch Antenna to Improve Gain and Bandwidth. Ms Thesis, Altinbas University, Istanbul, 60 p.
- Alpagu, E. 2019. X-Band Isoflux Microstrip Patch Antenna Array Design for Low Earth Orbit Satellites. Master's Thesis, Yıldız Technical University, Istanbul, 83 p.
- Ataş, İ., Kurt, M. B., and Abbasov, T. 2018. “Doğrusal ve Düzlemsel Mikroşerit Dizi Antenlerin Tasarımı ve Kazanç Yönünden Karşılaştırılması”, DUJE, vol. 9, no. 2, pp. 617–624.
- Ates, K., Ozen, S., & Carlak, H. F. 2017, May. The Freshness Analysis of An Apple and A Potato Using Dielectric Properties at the Microwave Frequency Region. In 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS) (pp. 1688-1693). IEEE.
- Balanis, C. A. 1992. Antenna Theory: A Review. Proceedings of the IEEE, 80(1), 7-23.
- Balanis, C. A. 2005. Antenna Theory Analysis and Design, 1073 p.
- Can, M. S. 2010. Faz Dizili Dairesel Mikroşerit Antenlerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 103 s.
- Çakır, M. 2016. İnşaat Yapı Malzemelerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi ve Elektromanyetik Ekranlama Etkinliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 66 s.
- Çalışkan, A. 2014. Geniş Bantlı TEM ve Ridged Horn Anten Dizisi Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 84 s.
- Dalkılınç, E. E. 2017. Metamalzeme Sinyal Emici Tabanlı Mikrodalga Sensörler. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, 67 s.
- Darwesh, A. F. D. 2019. Bandwidth and Gain Enhancement of Microstrip Antenna Using metamaterials. M. Sc. Thesis, Gaziantep University, Gaziantep, 88 p.
- Dirlik, T. 2020. Metamalzeme Kullanılarak Eş Benzetim ile Mikroşerit Anten Tasarımı ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Ankara, 74 s.
- Doğan, E. C. 2019. Fraktal Anten Parametrelerinin Metamalzeme Yardımıyla İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, 92 s.
- Doğan, E. 2012. Metamalzemelerin Anten Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, 69 s.
- Gül, F. C. 2019. Design of Microstrip Patch Antennas for 5G Mobile Communication Systems. Master's Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 93 p.
- Ha, J., Kwon, K., Lee, Y., & Choi, J. 2011. Hybrid Mode Wideband Patch Antenna Loaded with A Planar Metamaterial Unit Cell. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(2), 1143-1147.
- Keskin, S. E. B. 2019. 2.4 GHz Geniş Bant Mikroşerit Anten Tasarımı. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 5(1), 1-14

- Koçer, M. 2023. 5G Uygulamaları İçin Dairesel Polarizasyonlu ve Metayüzeyli Mikroşerit MIMO Anten Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 109 s.
- Li, D., Szabó, Z., Qing, X., Li, E. P., & Chen, Z. N. 2012. A High Gain Antenna with An Optimized Metamaterial Inspired Superstrate. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(12), 6018-6023.
- Mishra, R. 2016. An Overview of Microstrip Antenna. HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR), 21(2), 39-55.
- Öney, S. 2022. Kusurlu Zemin Yüzeyinde Kare Yarık Halka Rezonatörü Kullanılan Metamalzeme Mikroşerit Anten Tasarımı ve Performans İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Ankara, 69 s.
- Pozar, D. M. 2011. Microwave Engineering. John Wiley & Sons. 756 p.
- Shuı, H. 2021. Giyilebilir Elektronik Uygulamalar İçin Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya 52 s.
- Sözen, E. 2019. 5 GHz Mikroşerit Anten Tasarımı ve Besleme Çeşitlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Haliç Üniversitesi, İstanbul, 64 s.
- Tansarıkaya, İ. 2007. Geniş Bantlı Yama Anten Tasarımı (Doctoral Dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 69 s.
- Ulu, E. 2020. Mikrodalga Bölgesinde Süper-Formül Yaklaşımıyla Mikroşerit Anten Tasarımları. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 77 s.
- Ülgü, M. 2017. Anten Parametrelerinin İyileştirilmesinde Omega Şekilli Metamalzeme Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, 56 s.
- Zani, M. Z. M., Jusoh, M. H., Sulaiman, A. A., Baba, N. H., Awang, R. A., & Ain, M. F. 2010. Circular Patch Antenna on Metamaterial. In 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (pp. 313-316). IEEE.

ÖZGEÇMİŞ
YILMAZ PARMAKSIZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2021-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2017-2021	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Tasarım Mühendisi 2021-Devam Ediyor	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
--	-------------------------------------